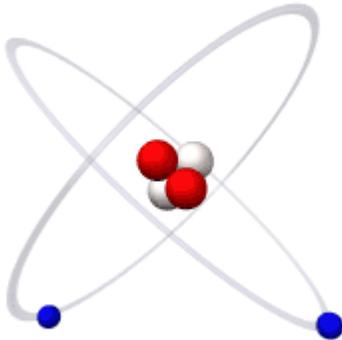


Hélium superfluide

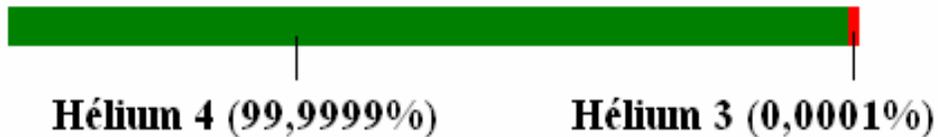
Applications aux procédés de
Cryogénie

Introduction – L'Hélium



- $Z = 2$.
- Point de fusion très bas.
- Chimiquement inerte.

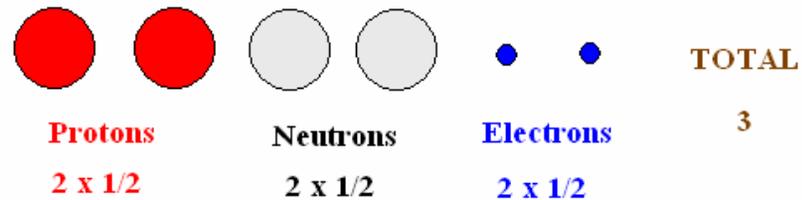
- Deux isotopes naturels



Propriétés statistiques

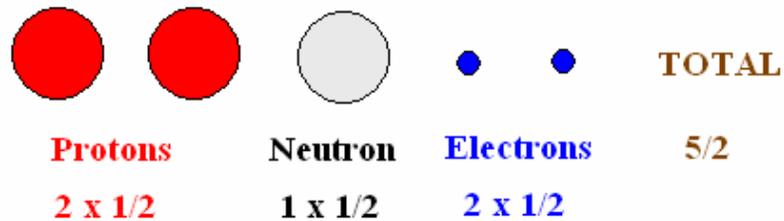
BILAN DE SPIN POUR LES DEUX ISOTOPES

➤ Hélium 4



L'Hélium 4 obéit à la statistique de Bose-Einstein.

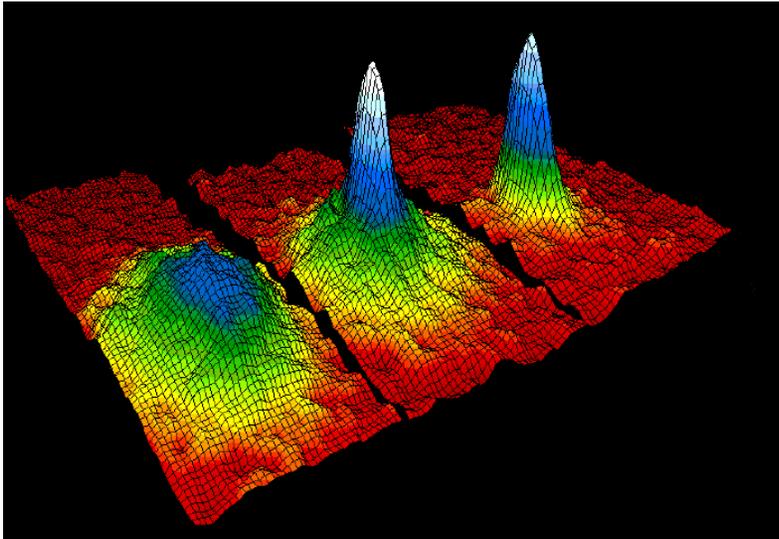
➤ Hélium 3



L'Hélium 3 obéit à la statistique de Fermi-Dirac.

Superfluides – Condensats de BE

- Condensat de Bose-Einstein : bosons proches du 0 absolu.



Valeurs de k en fonction de la distribution

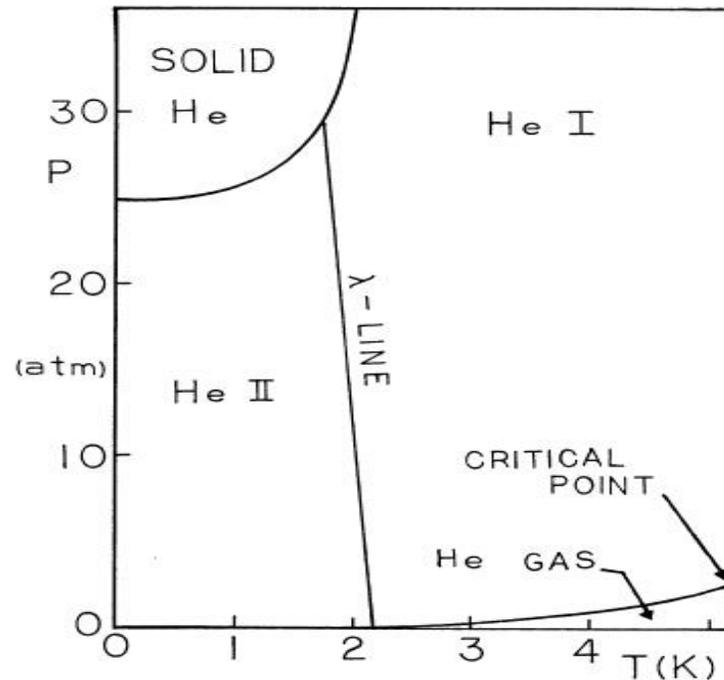
- Les bosons se retrouvent tous dans des états quantiques très proches de l'état fondamental.
- Conservation de la cohérence quantique à niveau macroscopique.
- Nouvelles propriétés : absence de viscosité, supraconductivité, échappement spontané ...

Superfluides - Hélium 4

➤ L'Hélium 4 est bosonique : il présente un caractère superfluide en dessous de $T_{\lambda} = 2,17\text{K}$.

➤ Couramment, on appelle l'hélium normal He I et l'hélium superfluide He II.

➤ L'hélium II présente les caractéristiques d'un superfluide : sa viscosité est extrêmement faible et d'autant plus faible que T est basse.



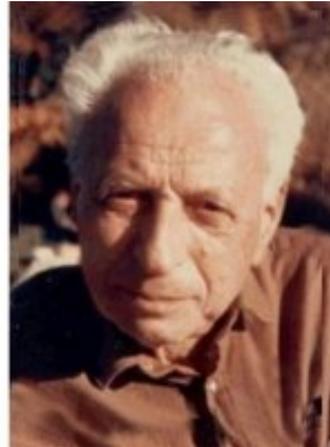
Ecart au condensat

- On a remarqué expérimentalement que l'hélium II ne se comportait pas exactement comme un condensat de Bose-Einstein :
 - Présence d'une certaine viscosité qui augmente avec T .
 - Le condensat est un gaz parfait de bosons, alors que l'hélium superfluide présente des interactions entre particules.

Lev Landau



Laszlo Tisza

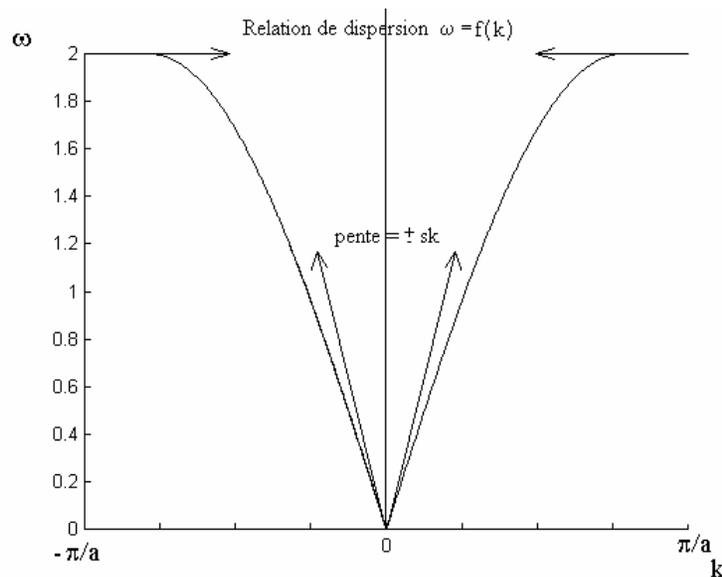


Ces deux hommes vont proposer des modèles permettant de modéliser le comportement de « quasi » condensat de Bose-Einstein.

Les excitations élémentaires (1)

La relation de dispersion classique.

- Dans le cas d'une matière condensée idéale :



- Dans le cas général des phonons, la relation de dispersion prend la forme suivante :

$$\omega^2 = \frac{4\gamma}{m} \sin^2 \frac{ka}{2}$$

- Quasi-linéarité pour k faible.
- $\omega = sk$ pour $k \rightarrow 0$.

Les excitations élémentaires (2)

Le modèle de Landau

- Le modèle de Landau permet d'expliquer les propriétés particulières de l'Hélium.
- Landau conserve le caractère linéaire de la dispersion à l'origine.

$$E = cp \quad \text{ou} \quad \omega = ck$$

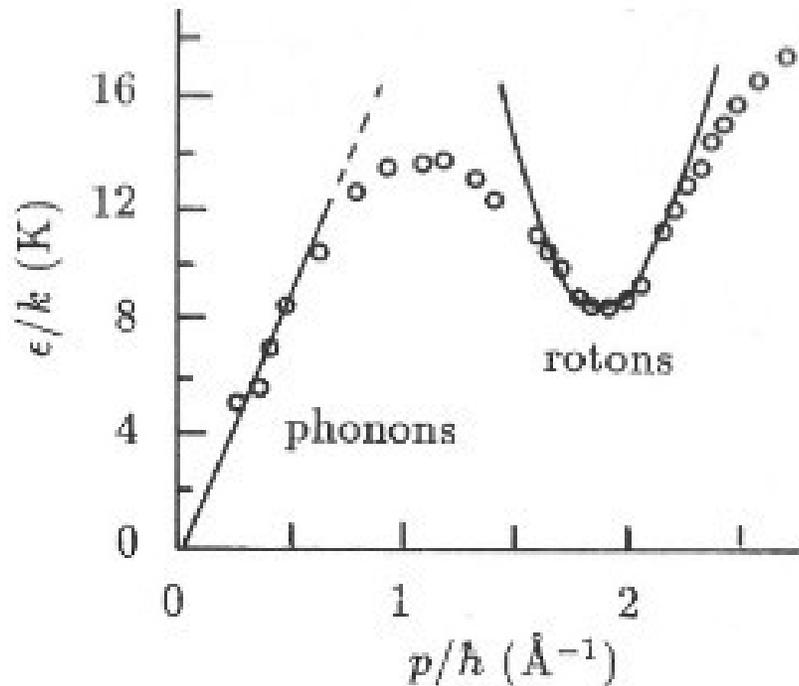
Cette zone de la courbe de dispersion s'appelle la zone des phonons.

- On greffe à cette droite une zone dite des rotons, qui correspond aux degrés de libertés de rotation des molécules.

$$E = \Delta + \frac{(p - p_0)^2}{2m_0}$$

Les excitations élémentaires (3)

La courbe d'excitation – La viscosité.



➤ Dans cette théorie, la viscosité s'interprète par la création de phonons et de rotons.

➤ En deçà de la vitesse critique, aucune excitation élémentaire n'est créée : pas de viscosité.

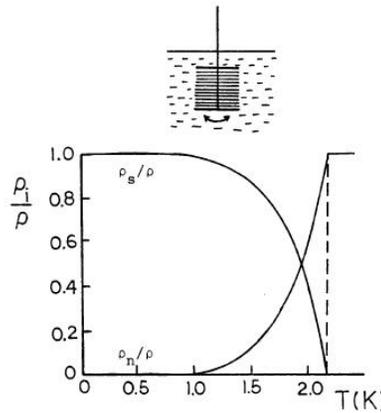
➤ Au dessus de cette vitesse, les excitations font interagir les molécules et la viscosité apparaît.

Le modèle à deux fluides (de Tisza)

De la statistique à la thermodynamique

- On introduit le modèle à deux fluides pour décrire He4 :
 - Pour refléter les écarts au condensat parfait.
 - Pour pouvoir travailler avec T jusqu'à 2K.
- Composante superfluide :
 - Viscosité nulle.
 - Propriétés de transport idéales.
 - Entropie nulle.
- Composante normale :
 - Viscosité finie.
 - Propriétés classiques.

Composante sans aucune excitation élémentaire.



Création de phonons et de rotons.

L'effet de fontaine (1)

Prévision théorique par la loi de London

- De manière générale en thermodynamique, on écrit :

$$dg = -sdT + vdP$$

g est le potentiel chimique (intensif) de la solution d'Hélium.

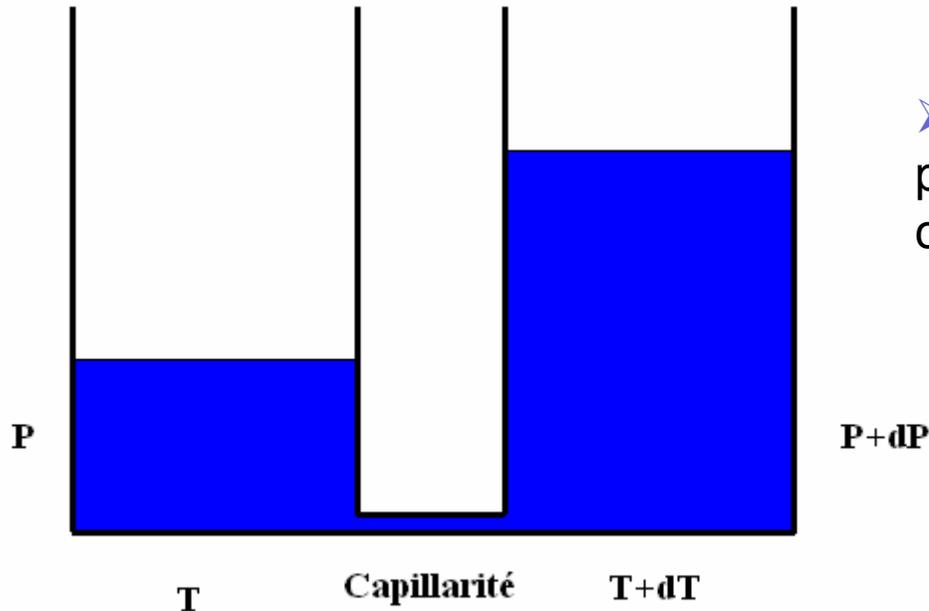
- La très grande conductivité due à la superfluidité annule instantanément tout gradient de potentiel chimique ($dg = 0$).

- D'où la loi de London : $dP = \frac{s}{v} dT$

- Tout gradient de température entraîne un gradient de pression et donc un déplacement du fluide.

L'effet de fontaine (2)

Intuitivement avec le modèle à deux fluides.



➤ La capillarité n'autorise le passage que de la composante superfluide.

➤ Saut de pression de part et d'autre de la capillarité.

➤ En chauffant, la partie droite voit son entropie augmenter, elle absorbe donc de la composante superfluide de la partie de gauche pour compenser.

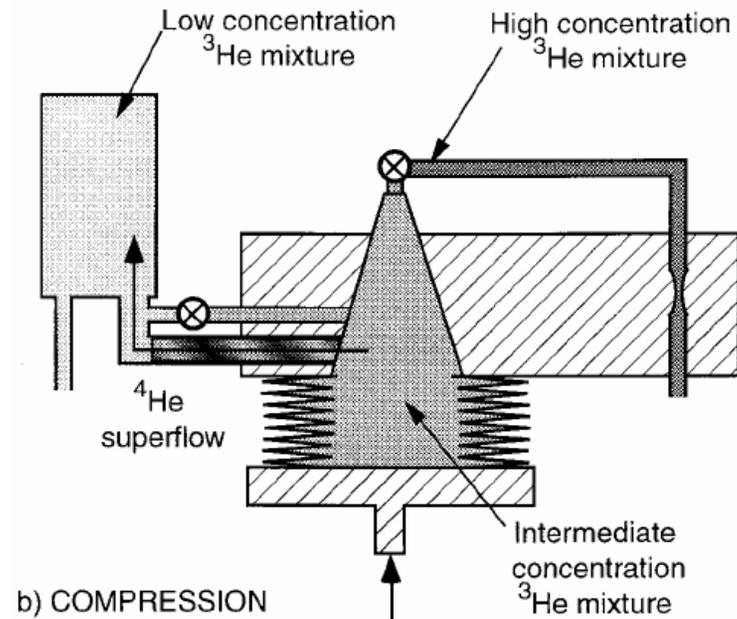
Les enjeux de la cryogénie

- Conception de réfrigérateurs pour la recherche sur l'Hélium.
- Refroidissement pour le stockage industriel de gaz sous forme liquide.
- Centrales de refroidissement embarquées dans l'espace.
- Production de fluide cryogénique pour les supraconducteurs.
- Micro-centrales pour le refroidissement de l'électronique.



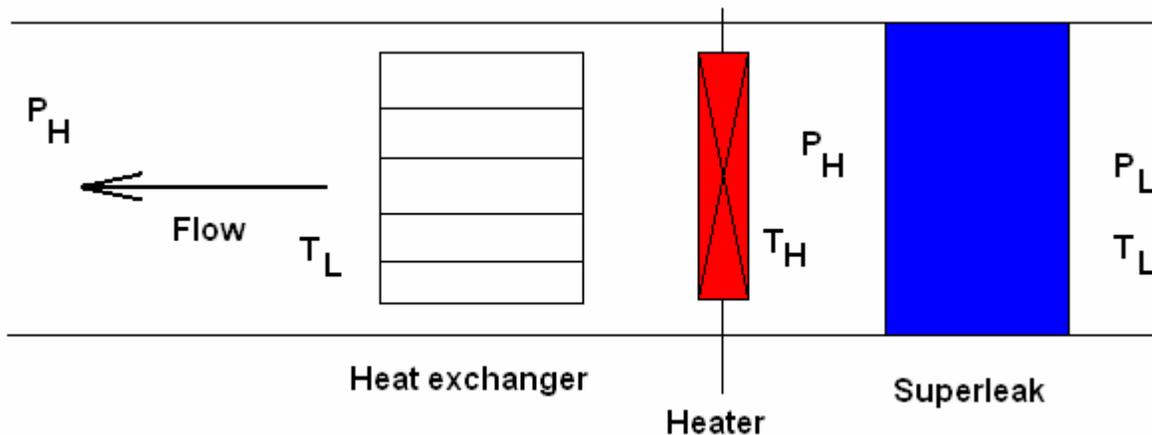
Le problème du compresseur

- Le compresseur (la pompe) mécanique présente de multiples inconvénients pour l'utilisation en micro-centrales.
- Encombrement, manque de fiabilité, rendement faible ...
- D'où la recherche d'une nouvelle technique ...



Le compresseur à effet de fontaine

- L'idée est d'utiliser l'effet de fontaine pour créer le travail de pompage.

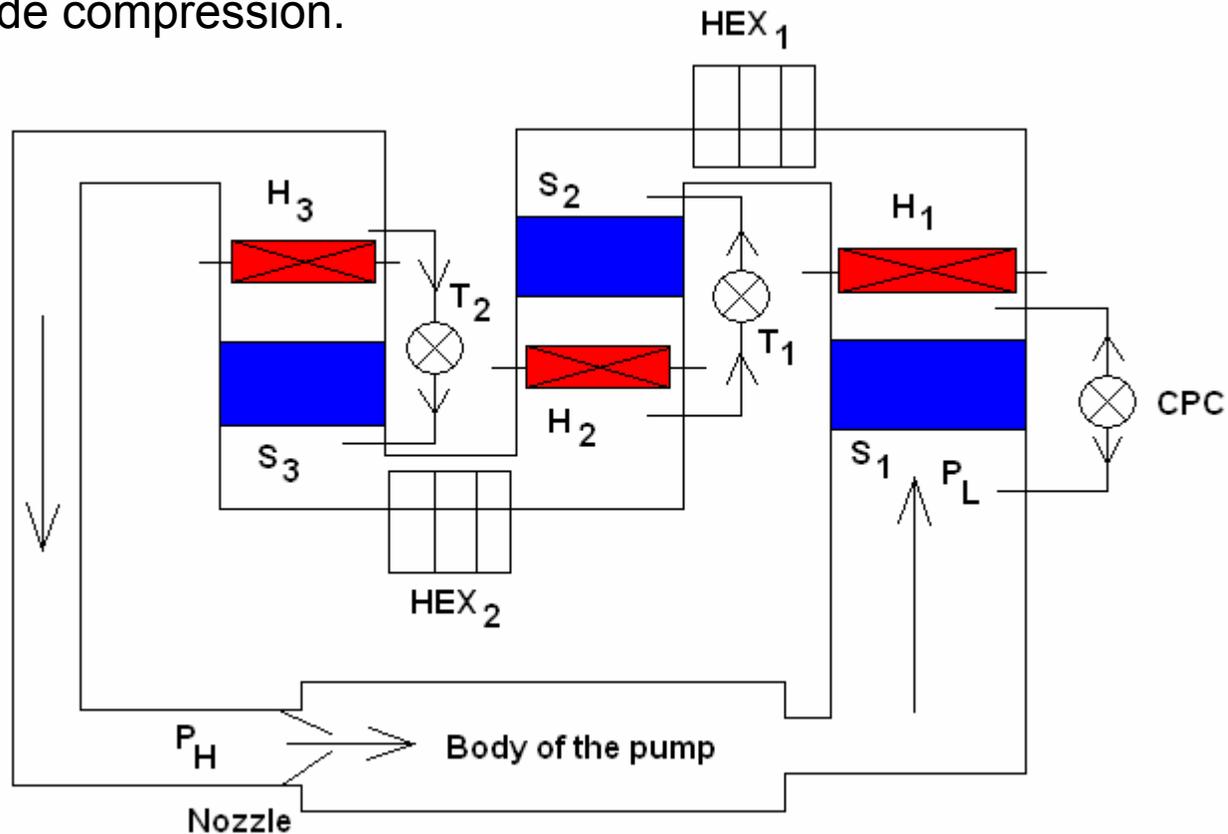


- La résistance chauffante augmente sensiblement la température du milieu (typiquement les températures de fonctionnement sont de 1K et 1,8K) et provoque une surpression en sortie de pompe ainsi qu'un écoulement.

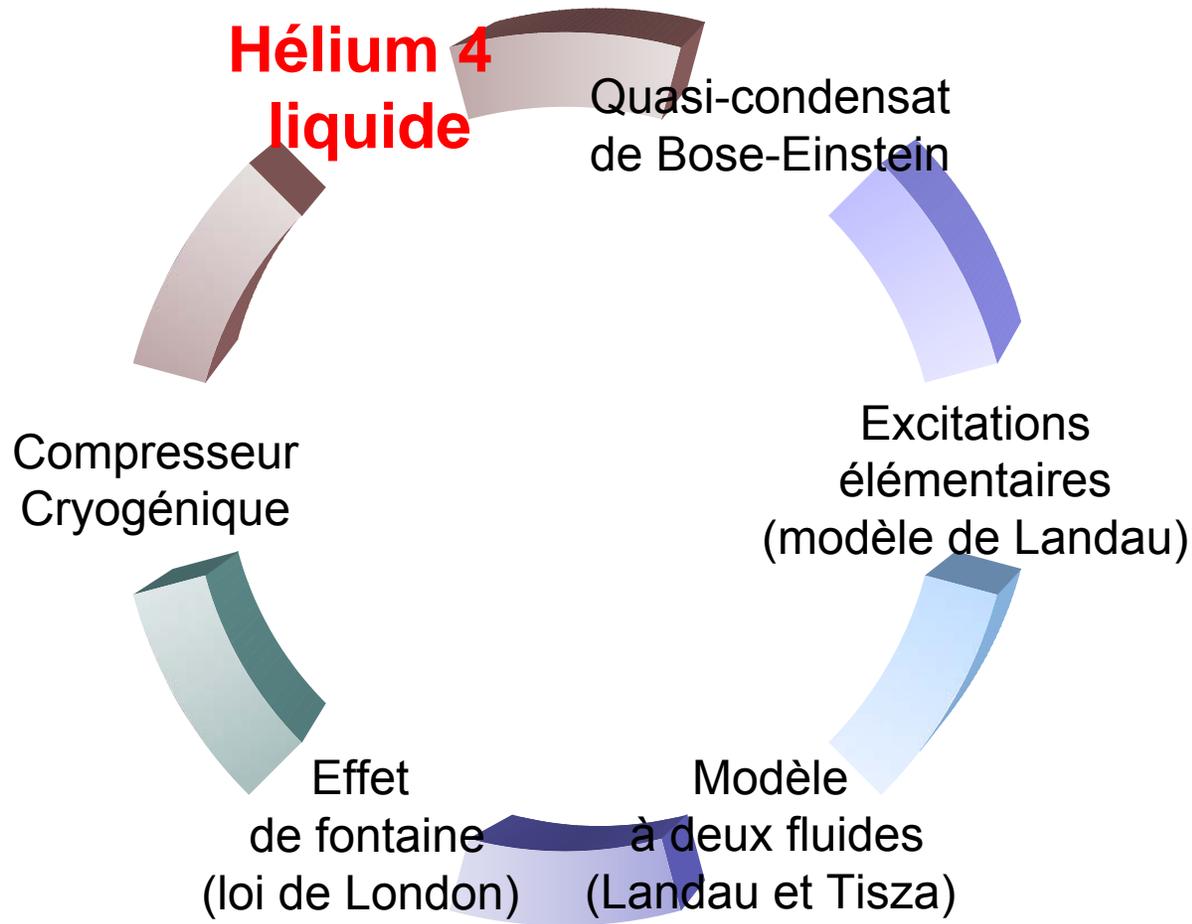
- la surpression crée l'effet de pompage.

Compression étagée

- Il est possible d'associer ces pompes en série pour augmenter la pression de compression.



Récapitulatif (Hélium 4)



L'isotope Hélium 3

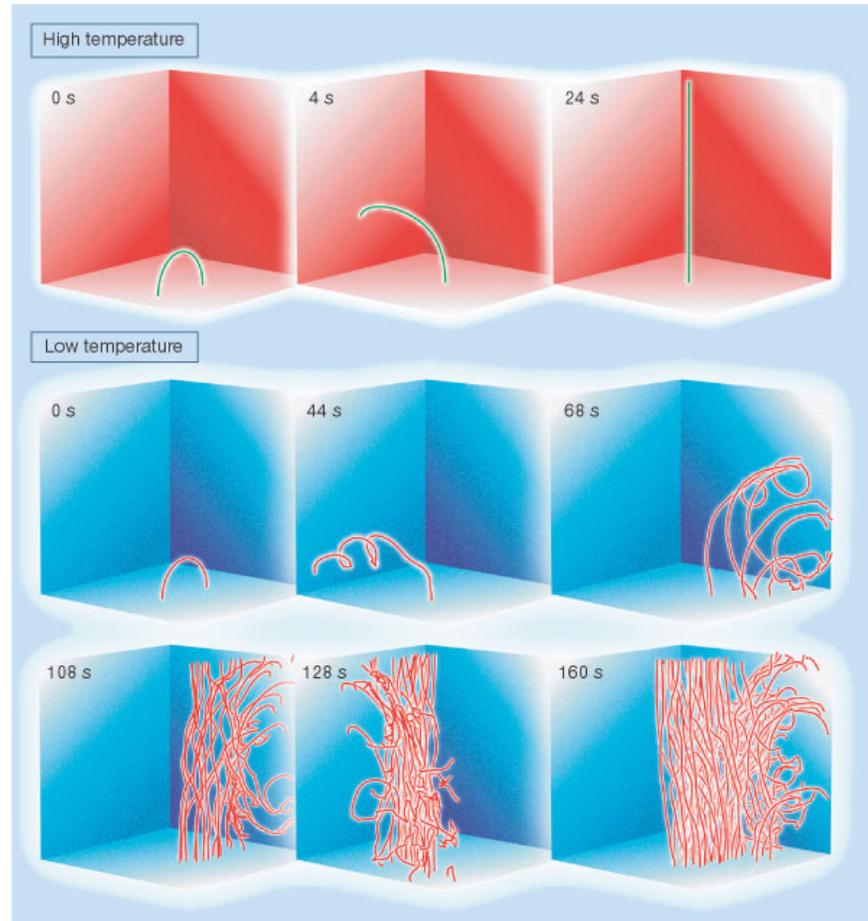
Rôle en Cryogénie

- L'hélium 3 est l'unique et rare isotope de l'Hélium 4.
- Les atomes d'Hélium 3 ont des propriétés fermioniques, ils ne peuvent donc pas former de condensat de Bose-Einstein.
- Cependant, on soupçonne que les atomes d'Hélium 3 peuvent s'associer par paires (dites de Cooper) et présenter un caractère superfluide à des températures extrêmement faibles.
 - En Cryogénie, les températures de travail sont bien supérieures et on utilise donc l'Hélium 3 classique comme fluide de travail dans les réfrigérateurs à dilution ou à effet Joule-Thompson.
- Problème : comment entraîner la composante d'Hélium 3 dans le compresseur (l'hélium 4 superfluide n'est quasiment pas visqueux). Il n'y a pas d'entraînement.

La friction mutuelle

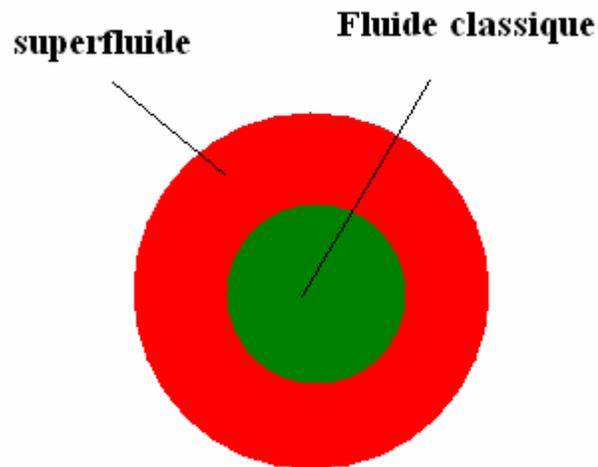
La turbulence superfluide

- Si la vitesse d'écoulement de l'Hélium devient supérieure à une vitesse dite « critique », un phénomène de turbulence apparaît.
- Des quanta de rotation sont créés dans le superfluide.
- Création d'un réseau complexe et quantifié de vortex.



Nature des Vortex

- Avec l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide, de nombreux phonons et rotons sont excités.
- La composante « normale » de l'Hélium s'agglomère en un cœur en rotation qui entraîne la composante superfluide : c'est la friction mutuelle.



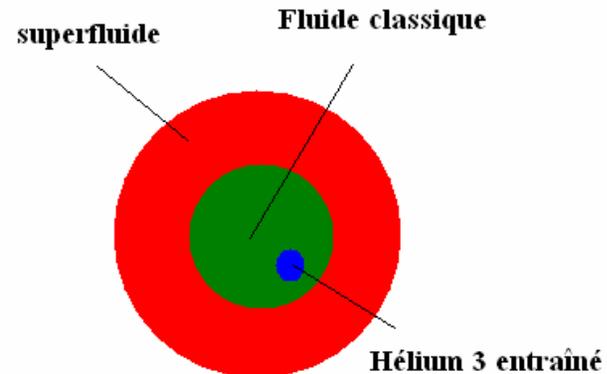
- D'un point de vue thermodynamique, cette friction mutuelle provoque des pertes et de la génération d'entropie dans l'écoulement. Cela semble donc être néfaste pour l'augmentation du rendement de pompage.

Modèle de l'Hélium 3 lié

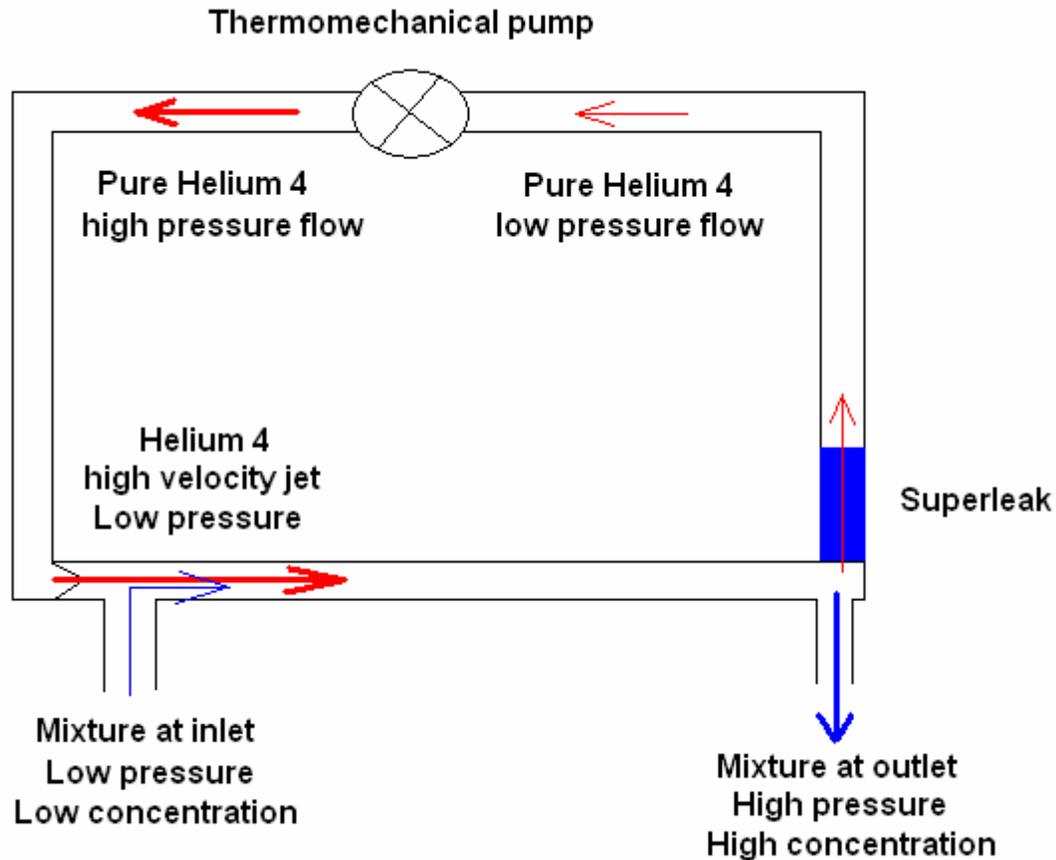
Modèles de Vinen et de Khalatnikov

- Vinen, en se basant sur le physique quantique, affirme que les atomes d'Hélium 3 dans une solution mixte, sont liés aux molécules de la composante normale d'Hélium 4.
- Khalatnikov utilise une théorie dite « des impuretés » pour caractériser la présence d'Hélium 3 dans l'Hélium 4 et parvient par les calculs à la même conclusion.

➤ Il est donc possible d'entraîner l'Hélium 3 à l'aide de la composante normale de fluide située au cœur des vortex.



Pompe à jet à effet de fontaine



Des questions ?

