

## INTRODUCTION A LA CRYOGENIE ET LA SUPRACONDUCTIVITE

FLUIDES CRYOGENIQUES  
DIAGRAMME DE PHASE  
PROPRIETES USUELLES  
SUPRACONDUCTIVITE  
DOMAINE SUPRACONDUCTEUR  
EXEMPLES

## TECHNIQUES DU VIDE

NOTIONS GENERALES  
OBTENTION - GAMMES  
EXEMPLES DE MATERIEL  
ETANCHEITE

## CRYOGENIE II

PROPRIETES DES MATERIAUX  
THERMIQUE, MECANIQUE, ELECTRIQUE  
TRANSFERTS THERMIQUES  
MISE EN OEUVRE DES BASSES TEMPERATURES  
*Séquence : Cryogénie Argon H1*

## SUPRACONDUCTIVITE II

DETAILS SUR L'ETAT SUPRACONDUCTEUR  
EXEMPLES DES CABLES SUPRA POUR AIMANTS  
*Séquence : Quadrupôle HERA*

# Introduction à la cryogénie et à la supraconductivité

Fluides cryogéniques

L'état supraconducteur

# La cryogénie

- Produire, maintenir, utiliser les basses T°
- Echelle de température thermodynamique

$$T \text{ (Kelvin)} = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

(définition du zéro absolu)

- Domaine cryogénique

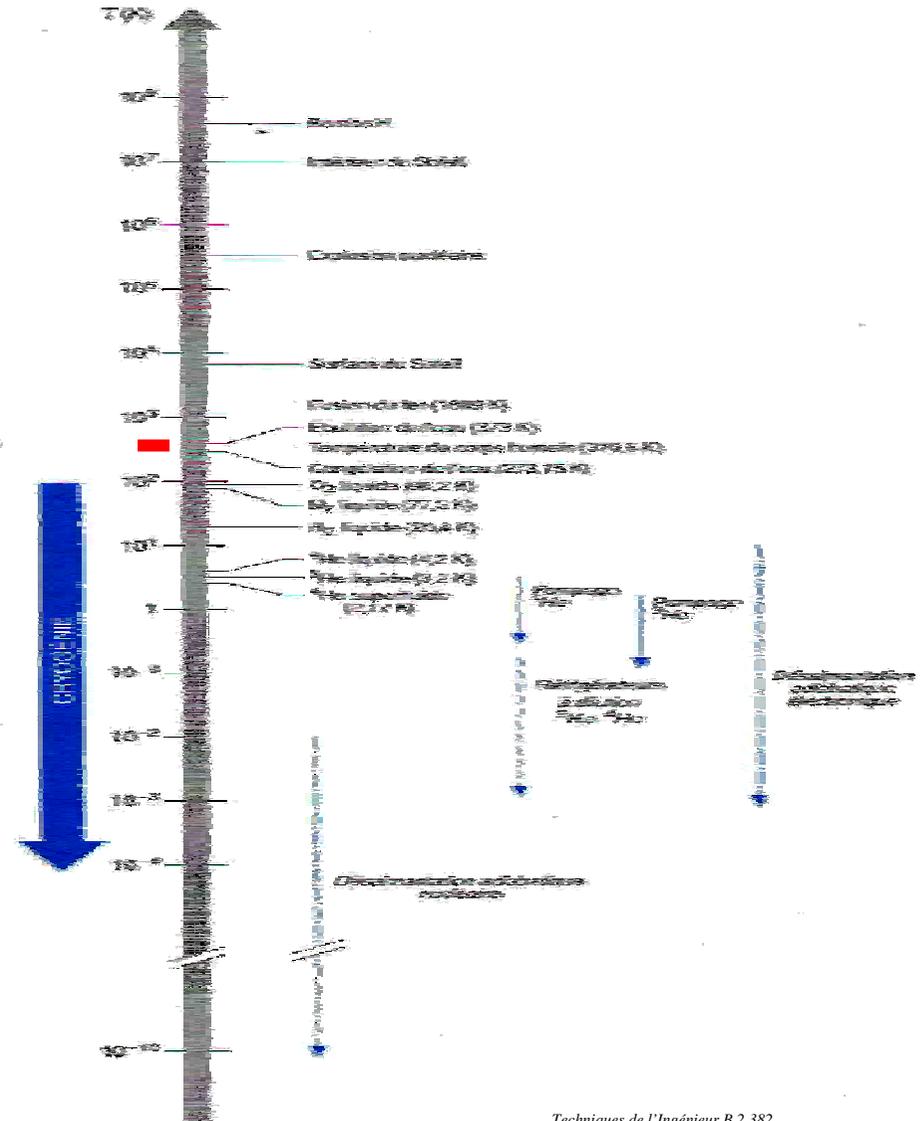
$$T < 120 \text{ K}$$

- Fluides cryogéniques (cryogènes)

aux températures de :

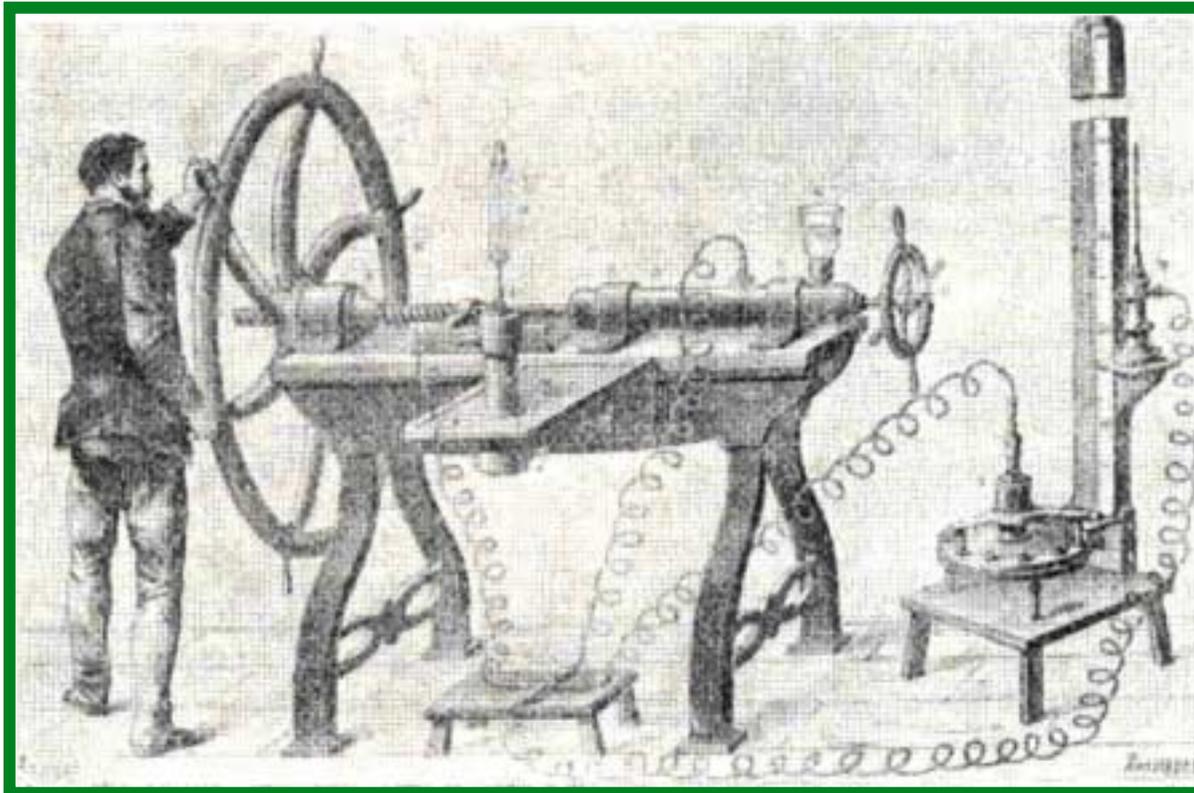
- l'azote (domaine autour de 80 K [ -193 °C ] )
- l'hydrogène ( vers 20 K [ -253 °C ] )
- l'hélium ( vers 4 K [ - 269 ° C ] )

- **LHe, LH<sub>2</sub>, LNe, LN<sub>2</sub>, LAr...**



## Fin du XIX siècle

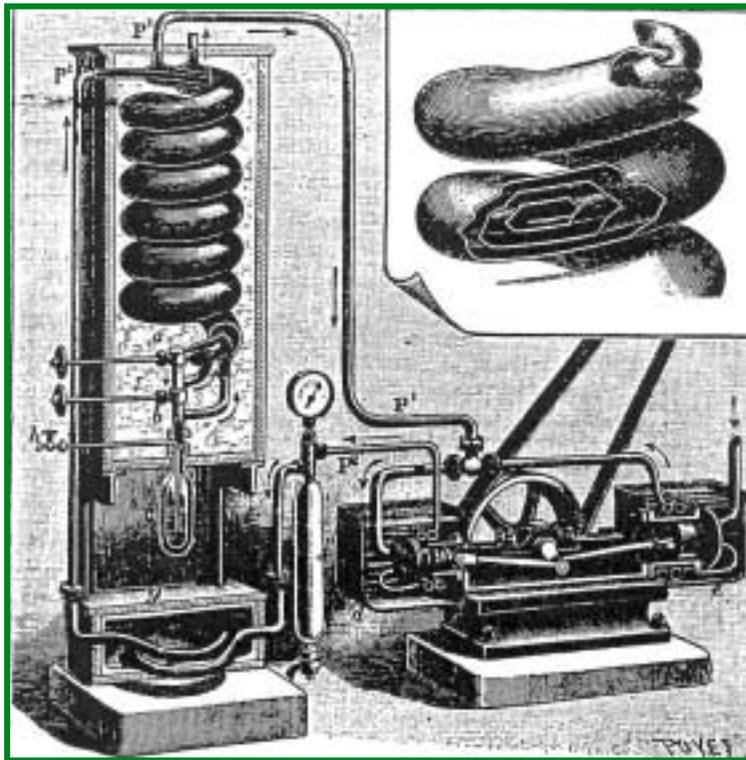
De la production de glace, en passant par la surgélation pour les denrées jusqu'à la liquéfaction des gaz de l'air.



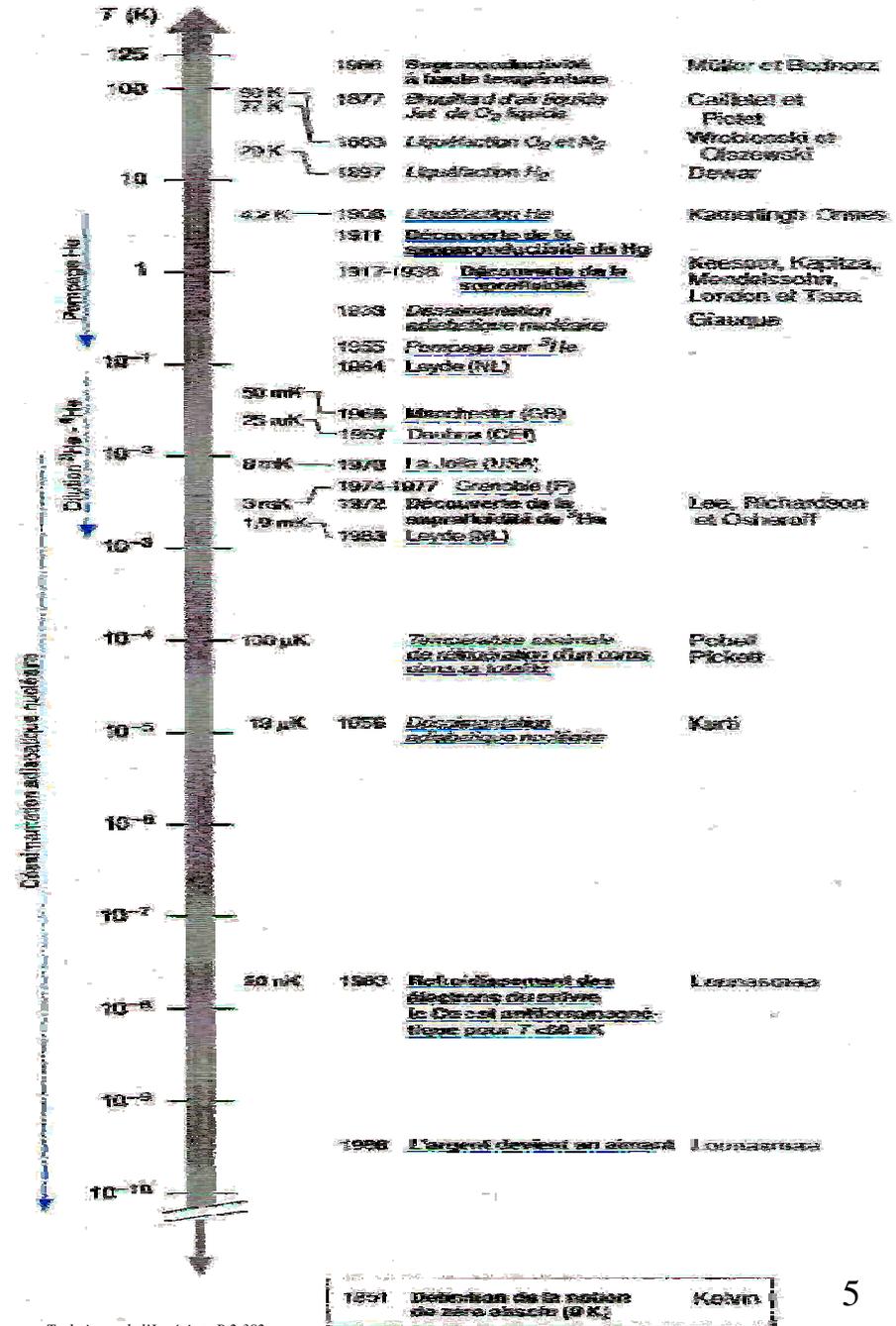
Cailletet en 1877 : brouillard d'O<sub>2</sub> liquide

# Historique

Entrée dans le domaine des températures cryogéniques à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle



Liquéfacteur d'air LINDE



# Les domaines de la cryogénie

## Cryogénie

### Recherche

**Mesures à très basse température**  
matériau,, physique du solide

**Développement instrumentation**  
SQUID

**Accélérateurs et  
physique des particules**  
Aimants, cavités, détecteurs

**Fusion nucléaire contrôlée**  
Confinement magnétique

**Astrophysique**  
Capteurs d'observation à terre et spatial...

### Industriel

**Electronique**  
(détecteur, composants ...)

**Electrotechnique**  
(stockage, transport, alternateurs, limiteur,...)

**Transport**

**Liquéfaction et réfrigération**  
Stockage des fluides  
Isolation

**Spatial**  
Propulseur (carburant et moteur)

**Médical**  
IRM  
Cryochirurgie, cryoconservation

# La cryogénie : domaine pluridisciplinaire



- Thermique , mécanique du solide ou des fluides, magnétisme, électrotechnique...
  - les multiples aspects d'une installation cryogénique
- Lois physiques habituelles mais variation très accentuée des propriétés physiques des matériaux ou des fluides aux très basses températures (viscosité, tenue mécanique, dilatation, conductibilité, capacité calorifique...). Mais aussi des états particuliers de la matière (superfluidité, supraconductivité)
- Toujours des surprises ou des interrogations :
  - ↓ « constante de temps de la cryogénie »
  - ↓ « opacité » d'un cryostat (pas d'observation directe)
  - ↓ appréciation de l'ordre de grandeur

# La cryogénie et les détecteurs

- nécessité de **refroidir des éléments** constitutifs d'un détecteur :
  - ❖ éléments actifs dans la mesure ( jonction semi-conductrice, transistor, , jonction Josephson pour SQUID, CCD, bolomètre,...). Propriétés physiques spécifiques , augmentation du rapport signal/bruit par la diminution du bruit "thermique".
  - ❖ éléments « passifs » dans la mesure (**aimants supraconducteurs** -pour générer des champs magnétiques intenses déviant , canalisant ou accélérant les particules -, **cavités RF...**)
- utiliser **un fluide** à basses températures comme **élément sensible** :
  - liquide cryogénique comme cible sur faisceau de particules ( **LH<sub>2</sub>, LD<sub>2</sub>, LHe...**)
  - liquide cryogénique comme traceur du passage de particules( **LAr, LKr, LH<sub>2</sub>...**)  
( Forte densité du liquide cryogénique/ même fluide gazeux -> plus grand nombre d'interactions entre particules à détecter et le fluide sensible -> plus de charges (ou de «bulles») générées -> plus de sensibilité

# LES FLUIDES CRYOGÉNIQUES

- **Un des moyens le plus simple de refroidir et de garder un objet aux très basses températures.**

**Fluide cryogénique = fluide classique**  
**Courbes et Points caractéristiques**

diagramme d'équilibre des 3 phases

Point triple

Point critique

Tension de vapeur

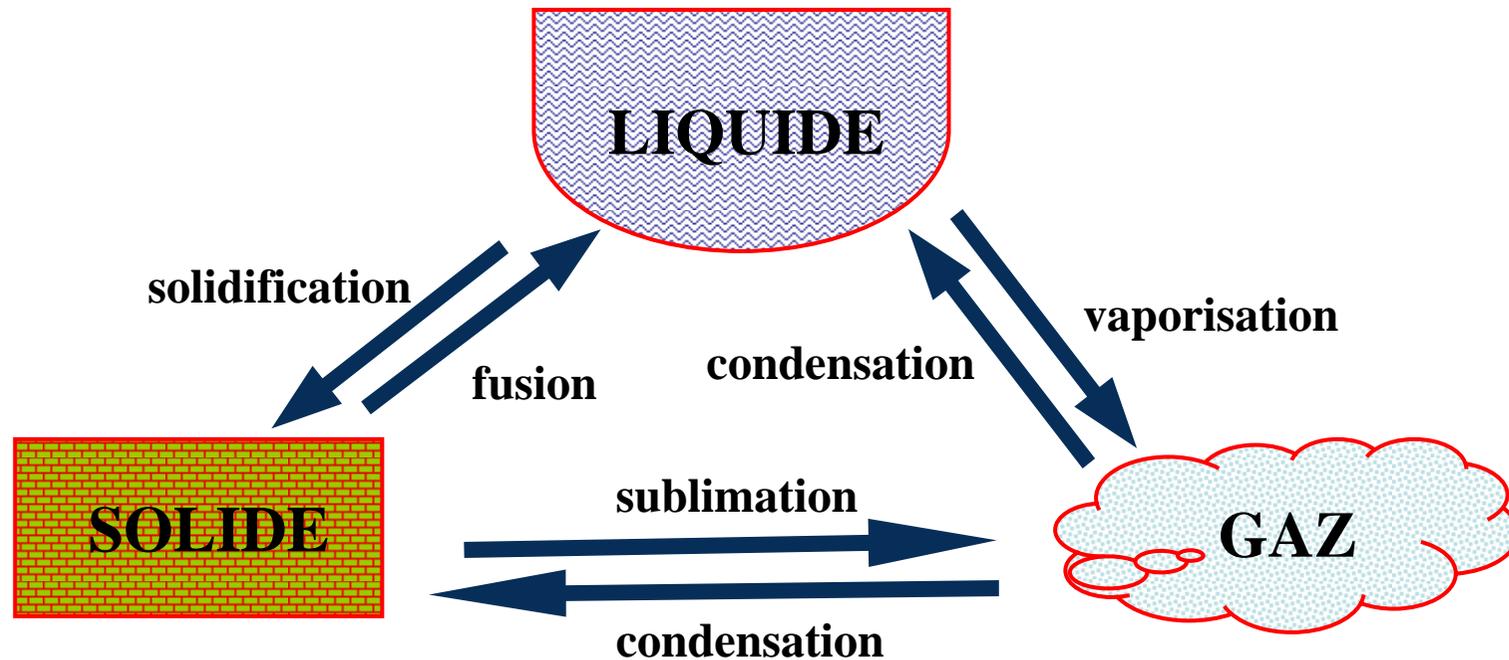
Chaleur latente

Chaleur sensible

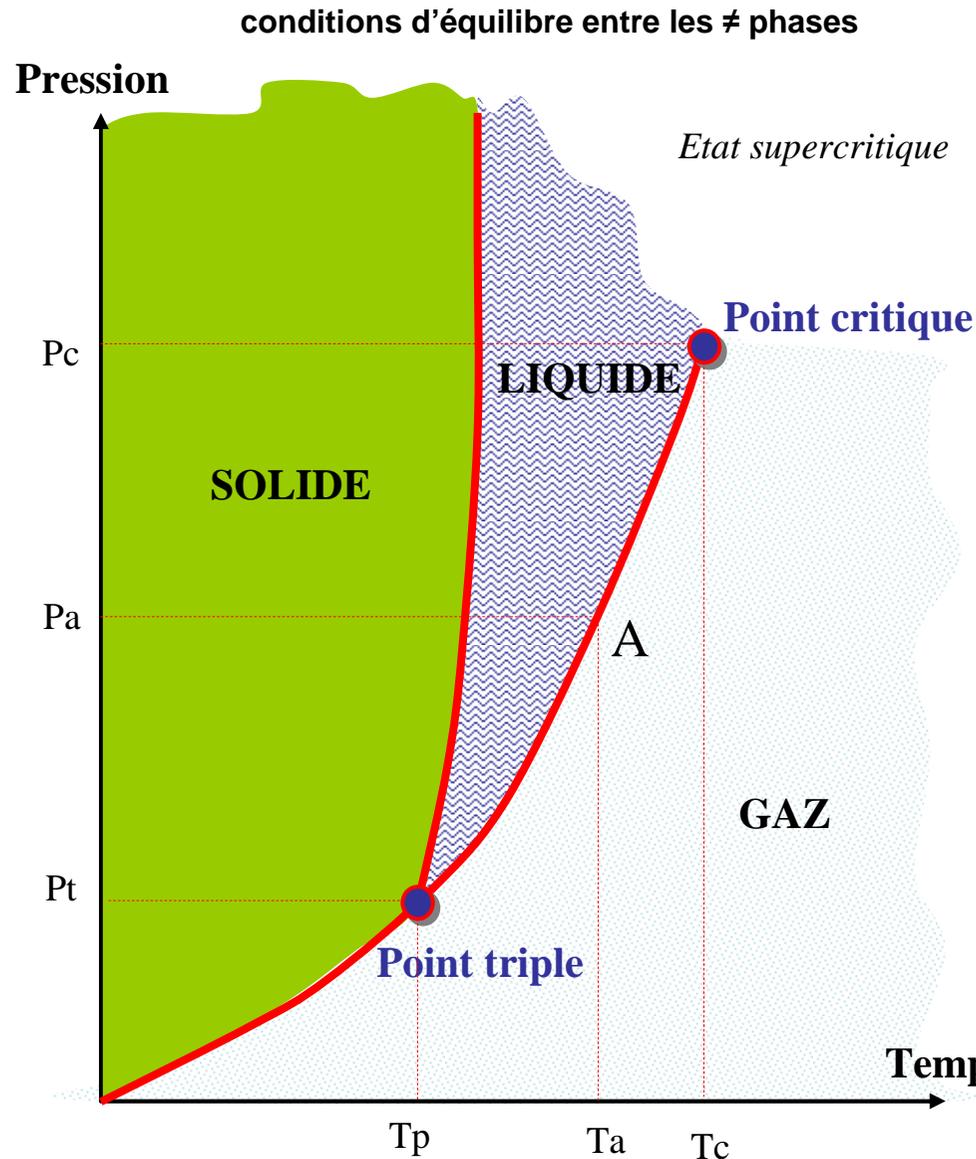
- **Domaine d'utilisation des "cryofluides"**

# Propriétés des fluides cryogéniques (dits cryogènes ou cryofluides)

- 3 états fondamentaux de la matière
- changements d'état (ou changements de phase)
  - > variations brutales de la plupart des propriétés physiques



# Diagramme de phase



Ex : Fluide dans les conditions de température et de pression du point A ( $T_a$  et  $P_a$ )

→ fluide se présentant sous forme de deux phases liquide et gaz (en général, bien séparés sous l'effet de la pesanteur) et où les deux phases coexistent sans évoluer en quantité (il y a à tout moment autant de molécules de gaz qui se condensent que de molécules de liquide qui s'évaporent).

→ un apport de chaleur au liquide en équilibre avec sa vapeur provoque son ébullition sans augmenter sa température (les vapeurs générées doivent être évacuées pour ne pas modifier la pression). Le liquide s'épuise par évaporation.

→ si un apport ponctuel de chaleur est réalisé sans laisser les vapeurs s'échapper, la pression et la température augmentent en suivant la courbe d'équilibre de phase. Ceci peut aussi être réalisé en comprimant mécaniquement le gaz au dessus du liquide.

→ si l'on refroidit le bain (extraction de chaleur sur un volume fermé par un échangeur "froid"), on observera une condensation du gaz vers le bain et donc pour un système fermé une diminution de la pression. De même, si l'on diminue par pompage du gaz la pression sur le bain, on provoque son ébullition en même temps qu'une diminution de sa température.

Toutes ces variations de température et de pression suivent la courbe d'équilibre gaz-liquide jusqu'aux limites que sont d'un côté le point critique (pressurisation du bain) et de l'autre le point triple (pompage du bain).

# Point triple, tension de vapeur

- **Points critique et triple :**

Dans le cas d'une pression et d'une température qui augmentent, les énergies mises en oeuvre lors de la transformation gaz $\rightleftharpoons$ liquide diminuent jusqu'à être nulles au **point critique** ( $P_c$ ,  $T_c$ ). **Au delà de ces valeurs**, on ne distingue plus de différence entre gaz et liquide (**état supercritique monophasique**). Par exemple, si l'on refroidit un fluide à une pression constante mais supérieure à  $P_c$ , le fluide se transformera continuellement pour arriver à un état dense sans qu'il y ait eu de changements brusques dans les propriétés physiques (on peut imaginer un brouillard très fin de plus en plus épais jusqu'à arriver à un état pseudo-liquide). Cela signifie aussi que dans ces conditions, il n'y aura **jamais d'interface entre liquide et gaz** puisqu'il n'y a tout le temps qu'une seule phase. Raisonner à pression variable mais température constante et supérieure à  $T_c$  mène aux mêmes remarques. Cet **état supercritique** est souvent utilisé dans les circuits de refroidissement car il **interdit la coexistence des phases liquide et gaz** et donc évite les perturbations provoquées par la présence de gaz dans un écoulement de liquide.

- Dans le cas d'une pression et d'une température qui diminuent, on atteindra une autre limite qui est le **point triple** où débute la phase solide. A ce point triple ( $P_t$ ,  $T_t$ ) coexistent les trois phases (**solide-gaz-liquide**). Ce point est parfaitement défini pour un corps pur et est souvent utilisé comme **repère thermométrique**. De ce point partent les trois courbes d'équilibre solide-gaz, solide-liquide et liquide-gaz. En dessous de  $T_t$ , seules les phases solide et gaz coexistent.

- **Tension de vapeur :**

Lorsque le gaz coexiste soit avec le liquide ( $T > T_t$ ) soit avec le solide ( $T < T_t$ ), la pression d'équilibre de celui-ci est appelée tension de vapeur et caractérise l'équilibre des deux phases coexistantes (gaz/liquide ou gaz/solide). Cette tension de vapeur suit une loi du type:

$$\log P = -A/T + B \quad \text{où } A \text{ et } B \text{ sont des constantes propres à chaque fluide.}$$

Ces courbes sont très souvent utilisées:

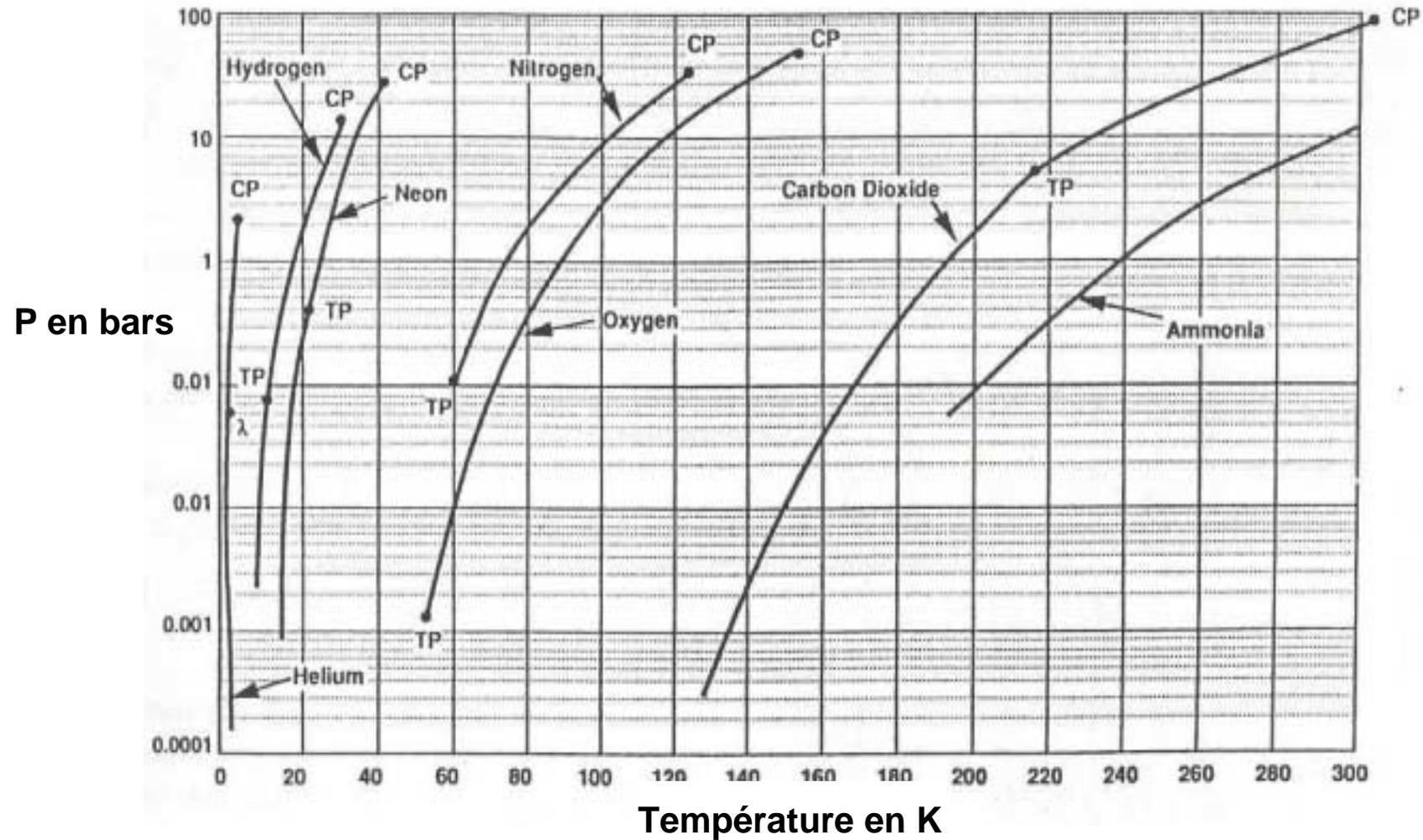
- l'évolution en température d'un bain sur lequel on modifie la pression :

( $P \downarrow$  = baisse de température ;  $P \uparrow$  = remontée de température) *Ex : LHe à 1 atm  $\Rightarrow$  1mK*

- tensions de vapeur rencontrées dans les opérations de pompage au vide

*Ex : Eau à 300 K  $\Rightarrow$  24 mbars*

# Exemples de courbes de tension de vapeur



**LHe**

$\Delta T/\Delta P \approx 1 \text{ mK}/\text{mbar}$   
@ 4.2 K

**LH<sub>2</sub>**

$\Delta T/\Delta P \approx 2,5 \text{ mK}/\text{mbar}$   
@ 20.4 K

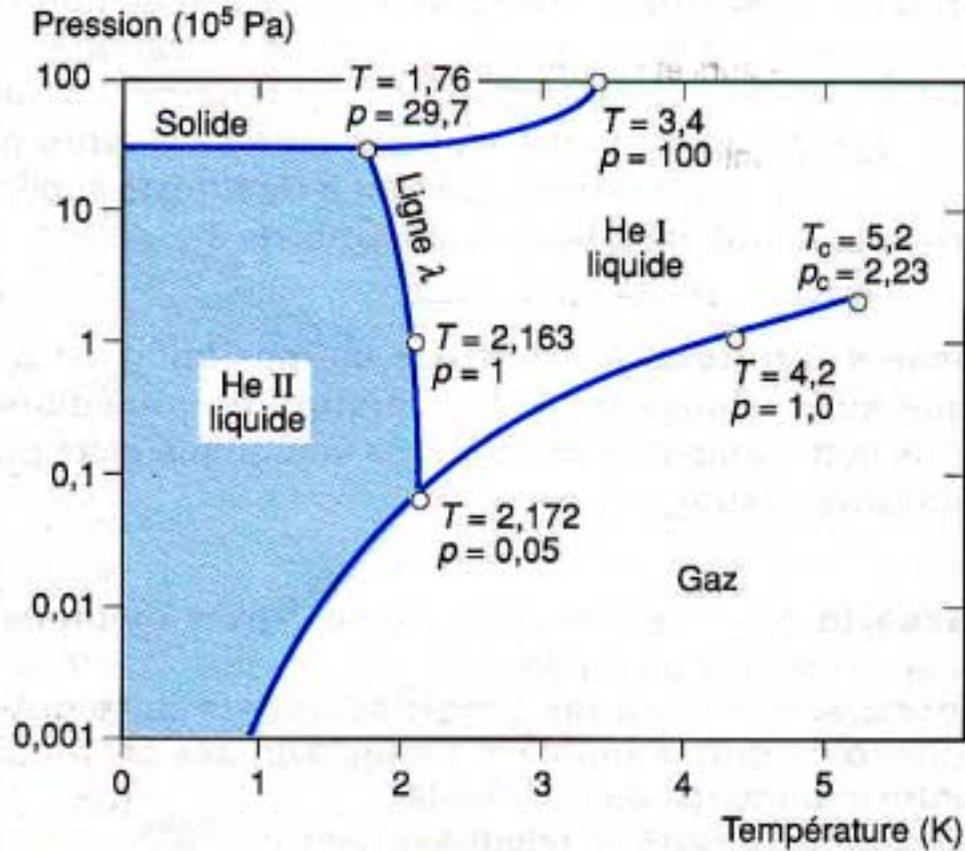
**LNe**

$\Delta T/\Delta P \approx 5,5 \text{ mK}/\text{mbar}$   
@ 27,1 K

**LN<sub>2</sub>**

$\Delta T/\Delta P \approx 50 \text{ mK}/\text{mbar}$   
@ 77 K

# Cas particulier de l'hélium



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

**Pas de point triple (sol-liq-gaz)  
mais un état supplémentaire dit SUPERFLUIDE (liquide HeII)  
aux propriétés remarquables (très forte conductibilité thermique, faible viscosité,...)**

**Très utilisé dans le refroidissement des aimants supraconducteurs**

# Chaleur latente, chaleur sensible

**Chaleur latente  $L_V$** : (ou enthalpie de formation à la température d'ébullition)

Quelque soit le changement de phase (quand il existe), il apparaît des transferts d'énergie avec l'extérieur. On parle alors de chaleur latente de transition pour caractériser les dégagements ou absorptions de chaleur lors de ces changements d'état (latente car transformation à température constante).

En particulier, la chaleur latente de vaporisation  $L_V$  est énormément exploitée dans l'utilisation des cryofluides. Elle représente la quantité de chaleur  $Q$  qu'il faut fournir (ou absorber) pour faire passer une masse de fluide  $M$  de l'état liquide à l'état gazeux (ou l'inverse) et cela à température constante.

$$Q = M \cdot L_V \quad \text{avec } T = \text{constante}$$

où  $Q$  s'exprime en joule,  $M$  la masse en kg et  $L_V$  en  $J \cdot kg^{-1}$

**Capacité calorifique  $C$** : (ou chaleur spécifique par unité de volume)

De façon plus générale et sans changement de phase, l'apport de chaleur  $Q$  à un corps quelconque de masse  $M$  (solide, liquide ou gazeux) fait élever sa température. La variation de température observée  $\Delta T$  est directement fonction de la capacité calorifique  $C$  du corps.

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T \quad \text{où } Q \text{ s'exprime en joule, } M \text{ la masse en kg, } \Delta T \text{ l'écart de température en K}$$

et  $C$  en  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

**Chaleur sensible  $\Delta H$** : (ou variation d'enthalpie) entre 2 températures données

Le terme de chaleur sensible (ou enthalpie sensible) représente en général l'intégrale de  $C \cdot \Delta T$  du gaz entre les températures d'ébullition et la température ambiante, c'est à dire la quantité de chaleur (ou de frigories) qu'il faut apporter (ou récupérer) pour réchauffer le gaz de  $T_{éb}$  à  $T_{amb}$ .

$$\Delta H = \int_{T_{éb}}^{T_{amb}} C \cdot dT \quad \text{où } \Delta H \text{ s'exprime en Joule/kg}$$

# Chaleur latente $L_v$ d'un liquide

Ex : vaporisation de liquide à T cste (P fixée)  
 = ébullition du fluide aux conditions de saturation [  $T=f(P)$  ]

**H2O : 100°C (373 K) @1 atm**

**N2 : -196°C (77 K) @ 1 atm**

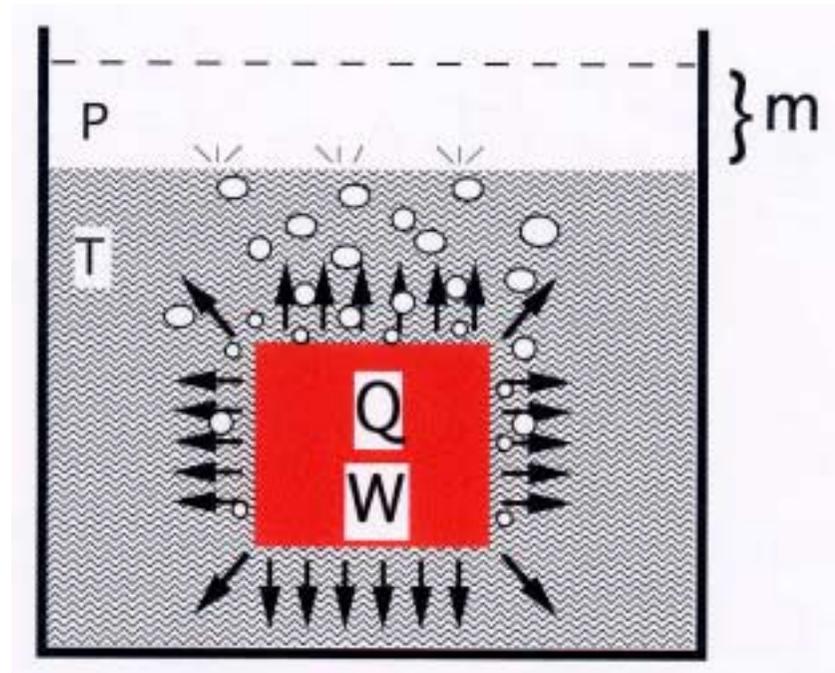
**He : -269°C (4.2 K) @ 1atm**

$$W = \dot{m} \cdot L_v$$

(W)      ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$$Q = m \cdot L_v$$

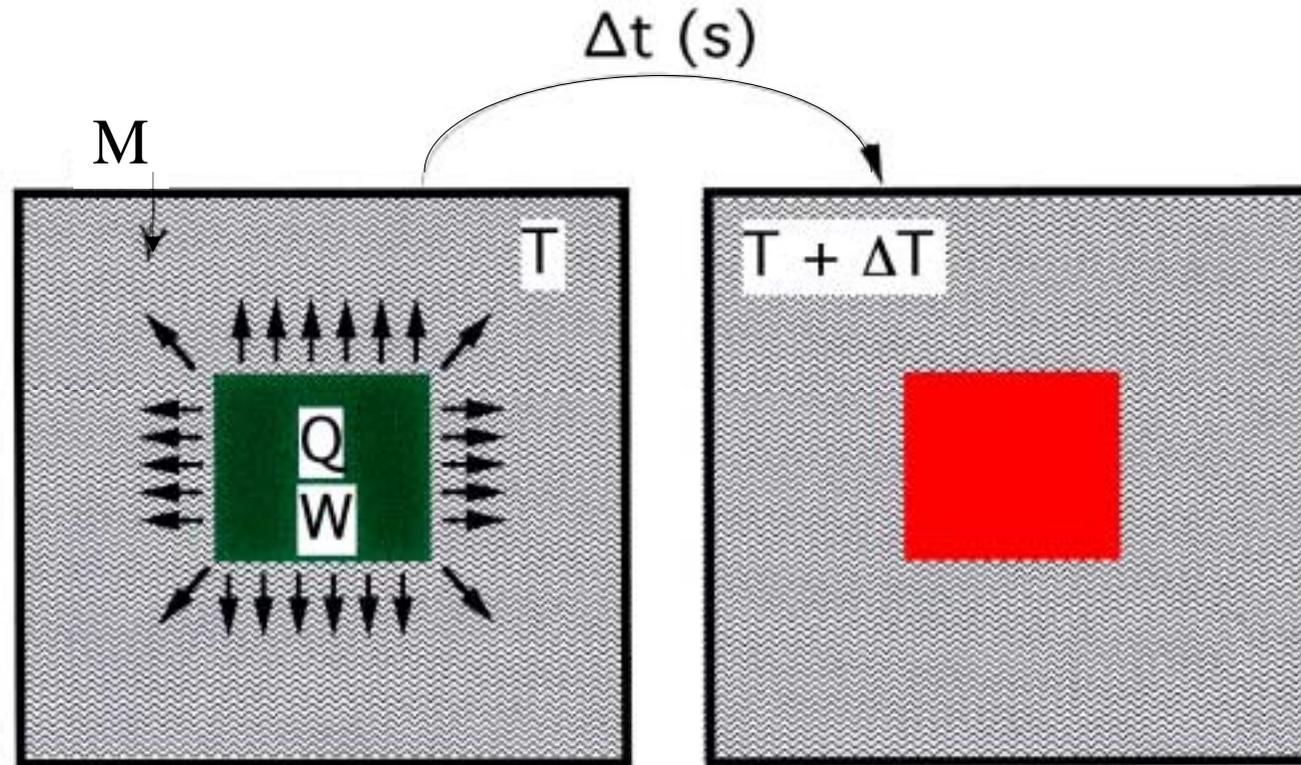
(J)      (kg) ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )



*pour chaque fluide*

$W \Leftrightarrow \dot{m} \Leftrightarrow \text{litres/h consommés}$

# Capacité calorifique d'un fluide (chaleur spécifique)



$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T$$

(J) (kg) (J/kg)

Chaleur sensible

Bilan énergétique

$$W = M \cdot C \cdot \Delta T / \Delta t$$

(W) (kg) (J/kg.K) (K/s)

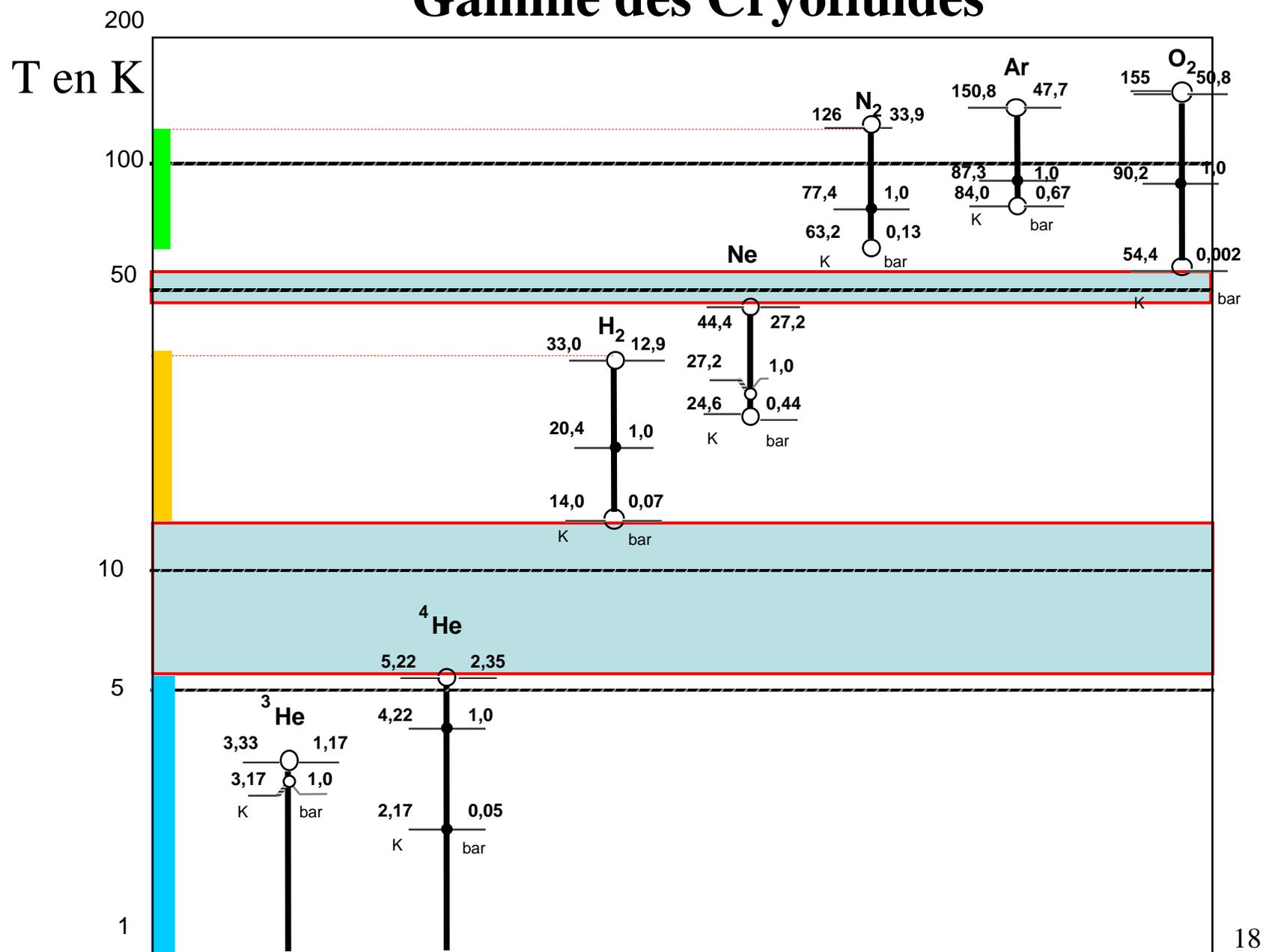
Bilan en puissance

$$W = \dot{M} \cdot C \cdot \Delta T$$

(W) (kg/s) (J/kg.K) (K)

Bilan en débit-puissance

# Gamme des Cryofluides



# Table de propriétés des cryo-fluides



Propriétés de quelques fluides		He3	He4	H2	D2	Ne	N2	O2	Ar	CH4	H2O
Température d'ébullition à p normale (1.013 .10 <sup>5</sup> Pa) (K) – Téb -		<b>3.2</b>	<b>4.2</b>	<b>20.4</b>	<b>23.6</b>	<b>27.1</b>	<b>77.3</b>	<b>90.2</b>	<b>87.3</b>	<b>111.7</b>	<b>373.15</b>
POINT TRIPLE	Tt en K	-	-	13.95	18.70	24.50	63.14	54.40	84.00	90.70	273.16
	Pt en hPa	-	-	72	170	424	125	2	670	116	6
POINT CRITIQUE	Tc en K	3.33	5.20	33.20	38.30	44.40	126.10	154.40	150.80	191.00	647.14
	Pc en 10 <sup>5</sup> Pa	1.16	2.23	12.80	16.50	26.60	33.10	49.50	47.70	45.80	220.60
Volume de gaz provenant de l'évaporation d'1 litre de liquide	à Téb et pnormale (l)	2.5	7.3	54.6	70.0	127.0	180.0	260.0	240.0	250.0	
	à T et p normale (l)	455	700	790	900	1355	646	798	784	595	
Chaleur latente L de vaporisation à Téb et p normale (kJ/kg)		<b>8.2</b>	<b>21</b>	<b>452</b>	<b>305</b>	<b>86</b>	<b>199</b>	<b>213</b>	<b>157</b>	<b>510</b>	<b>2250</b>
Enthalpie sensinle en,tre Téb et 300 K (kJ/kg)		<b>2080</b>	<b>1550</b>	<b>3800</b>	<b>2048</b>	<b>280</b>	<b>233</b>	<b>193</b>	<b>112</b>	<b>402</b>	
Taux d'évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure		<b>0.14</b>	<b>0.7</b>	<b>9.0</b>	<b>13.6</b>	<b>29</b>	<b>45</b>	<b>68</b>	<b>61</b>	<b>60</b>	<b>624</b>
Capacité calorifique à pression constante (kJ/kg.K) à 0°C et 1 bar		-	5.20	14.05	-	1.03	1.038	0.909	0.52	2.19	1.842 (à 100°C)
Conductibilité thermique du gaz à Téb (mW/m.K)		-	10	15	< 40	8	7.6	9	8	8.7	22
Conductibilité thermique du gaz à p normale et 300 K (mW/m.K)		-	152	181	137	50	26	27	18	31	
Masse volumique du liquide à p normale (kg/m <sup>3</sup> )		59	125	71	161	1210	810	1140	1400	425	998
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m <sup>3</sup> )		24	17	1.3	2.3	9.5	4.5	4.4	5.8	1.7	0.77
Masse volumique du gaz à p et T normales (kg/m <sup>3</sup> )		0.13	0.18	0.09	0.18	0.9	1.25	1.43	1.8	0.55	
Viscosité du liquide à Téb (μPa.s)		2	3.6	13	16.2	125	160	190	260	120	278
Viscosité du gaz à Téb (μPa.s)		1.2	1	1	1.5	4.5	5	7	8	4.4	12.5
Viscosité du gaz à Tambiante (μPa.s)		-	20	9	13	30	17	20	22	11	-
Permittivité du liquide		-	1.05	1.23	1.27	1.19	1.44	1.48	1.54	1.68	1980

## Rappels :

p normale =  
pression dans  
les conditions  
normales soit  
1 atm =  
1,013.10<sup>5</sup> Pa

T normale =  
273,15 K  
( 0°C)

# Table de propriétés des cryo-fluides

Propriétés de quelques fluides		He3	He4	H2	D2	Ne	N2	O2	Ar	CH4	H2O
Température d'ébullition à p normale (1.013 .10 <sup>5</sup> Pa) (K) – Téb -		3.2	4,2 K	20.4	23.6	27.1	77 K	90.2	87.3	111.7	373.15
POINT TRIPLE	Tt en K	-	-	13.95	18.70	24.5	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15
	Pt en hPa	-	-	72	170	424	1013	1013	1013	1013	1013
POINT CRITIQUE	Tc en K	3.33	5.20	33.20	38.30	44.40	126.10	154.40	150.80	191.00	647.14
	Pc en 10 <sup>5</sup> Pa	1.16	2.23	12.80	16.50	26.60	33.10	49.50	47.70	45.80	220.60
Volume de gaz provenant de l'évaporation d'1 litre de liquide	à Téb et pnormale (l)	2.5	7.3	54.6	70.0	127.0	180.0	260.0	240.0	250.0	
	à T et p normale (l)		700	900	900	1300	646	800	784	595	
Chaleur latente L de vaporisation à Téb et p normale (kJ/kg)		8	21 J/g	452	305	86	199 J/g	113	157	510	2250
Enthalpie sensinle en,tre Téb et 300 K (kJ/kg)		20	1500 J/g	800	2048	280	233 J/g	300	112	402	
Taux d'évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure			0,7 W/l.h	10	13.6	20	45 W/l.h	30	61	60	624
Capacité calorifique à pression constante (kJ/kg.K) à 0°C et 1 bar				4.05	-	1.02		0.909	0.52	2.19	1.842 (à 100°C)
Conductibilité thermique du gaz à Téb (mW/m.K)				15	< 40	8			8	8.7	22
Conductibilité thermique du gaz à p normale et 300 K (mW/m.K)		-	152	181	137	50	26	27	18	31	
Masse volumique du liquide à p normale (kg/m <sup>3</sup> )		59	125	71	161	1210	810	1140	1400	425	998
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m <sup>3</sup> )		24	17	1.3	2.3	9.5	4.5	4.4	5.8	1.7	0.77
Masse volumique du gaz à p et T normales (kg/m <sup>3</sup> )		0.13	0.18	0.09	0.18	0.9	1.25	1.43	1.8	0.55	
Viscosité du liquide à Téb (μPa.s)		2	3.6	13	16.2	125	160	190	260	120	278
Viscosité du gaz à Téb (μPa.s)		1.2	1	1	1.5	4.5	5	7	8	4.4	12.5
Viscosité du gaz à Tambiante (μPa.s)		-	20	9	13	30	17	20	22	11	-
Permittivité du liquide		-	1.05	1.23	1.27	1.19	1.44	1.48	1.54	1.68	20/80

## Rappels :

p normale =  
pression dans  
les conditions  
normales soit  
1 atm =  
1,013.10<sup>5</sup> Pa

T normale =  
273,15 K  
( 0°C)

# Le marché des cryo-fluides

## L'hélium : ( $5,3 \cdot 10^{-6}$ dans l'air)

- Très utilisé dans les domaines des mesures physiques à basse température, des supraconducteurs.
- Coût de plus en plus élevé (de 3.4€ à 10 €/litre selon quantité)
- Provient des puits de gaz de naturel (USA, Algérie, Qatar, Pologne, Australie...)

## L'hydrogène : ( $5 \cdot 10^{-7}$ dans l'air)

- très largement employé dans les années 60, moins utilisé actuellement. Le danger potentiel dans son utilisation. Les risques d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air existent entre 4 et 75%. Ce mélange est détonant entre 19 et 57 %. Et l'énergie nécessaire pour provoquer l'ignition est seulement de 0,02 mJ (10 fois inférieure à celle des autres hydrocarbures).
- l'hydrogène existe sous 3 variétés isotopiques ; hydrogène ( $H_2$ ), deutérium ( $HD$  et  $D_2$  :1 neutron en plus par noyau), tritium (2 neutrons par noyau).

## Le néon : ( $1,8 \cdot 10^{-5}$ dans l'air)

### L'azote : (0,78 dans l'air)

- bon marché ( environ 0,1 €/litre)
- distribué industriellement par camion citerne calorifugé en tout point de stockage.
- bonne chaleur latente de vaporisation ( $210 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) , utilisation facile et peu contraignante (son transfert peut s'effectuer avec un minimum de calorifugeage, boîte en polystyrène...).
- éviter de porter des vêtements en laine qui, une fois imbibés d'azote liquide, entretiennent un flux de gaz très froid pouvant provoquer des brûlures. Leur préférer des vêtements en Nylon. Le risque de brûlure directe par projection de liquide sur la peau est peu probable (phénomène de caléfaction).
- risque le plus dangereux = anoxie (diminution progressive de la teneur en  $O_2$  de l'air lors d'évaporation d'azote liquide. (teneur  $O_2 < 17\%$  = début de risque majeur).

### L'oxygène : (0,21 dans l'air)

- peu utilisé en cryogénie
- risques liés à sa forte réactivité

### L'argon : ( $9,6 \cdot 10^{-3}$ dans l'air)

Utilisé dans les calorimètres de détecteur  
Coût assez élevé ( $\approx 8$  €/litre)

### Le krypton : ( $1,1 \cdot 10^{-8}$ dans l'air)

Utilisé dans les calorimètres de détecteur

# Les propriétés des cryo-fluides

## Les programmes numériques :

### Cryodata Inc.

# GASPAK: Calculates 28 different thermophysical properties of 36 different fluids having normal boiling points from 4 K to room temperature. Properties are calculated for temperatures from the triple point to the upper limit of available data for that fluid (range 400 to 5000 K), and for pressures to about 100 bars (different limit for each fluid). Copyright by Robert McCarty. (DOS, sources)

# HEPAK: Calculates 33 different thermophysical properties, including superfluid parameters, of Helium-4 from 0.8 K to 5000 K. Coming in 2005: Helium4 properties extended down to zero K and updated throughout the compressed liquid range. New code: Helium-3 properties from 0.005 K to 300 K. Copyright by Vincent Arp. (DOS , XLA, sources)

# METALPAK, EXPAK, CPPAK: Thermal properties of 14 nominally pure metals; thermal expansion and specific heats of 37 solid materials. Temperature range 1 to 300 K. Copyright by Vincent Arp. (DOS)

Revenu par CRYOFORUM en France

# Autres sources pour basses températures : les “réfrigérateurs”

**Pour petites puissances jusqu’à 3 K, les cryogénérateurs**  
(machines à flux alterné)

- **Gifford-Mac Mahon** (200 W @ 80K /1KW élec - 2W@20 K/1KW “à la prise”)
- **Stirling** (10 W @ 80 K/1KW élec- 1W @ 20 K /1KW élec)
- à tube à gaz pulsé (pulsed tube) (actuellement 1,5 W @ 4 K )
  - *souvent bi-étagées (écran thermique au 1er étage)*
  - *1 à 2 Hz*
  - *qq W à 15 K, 100 W à 80 K*

**Pour de grosses puissances, les machines à flux continu**

-réfrigérateur ou liquéfacteur (LHe, LN2...)

(turbodétendeurs+échangeurs+compresseur)

*De quelques dizaines de watts jusqu’à 18 kW W à 4 K*

# CRYOGENERATEUR :

## Exemple d'utilisation de Machine GIFFORD-Mac MAHON



*Cryogénérateur  
(2 étages)*

**Ex :**  
**35 W à 50 K**  
**et**  
**1,5 W à 4.2 K**

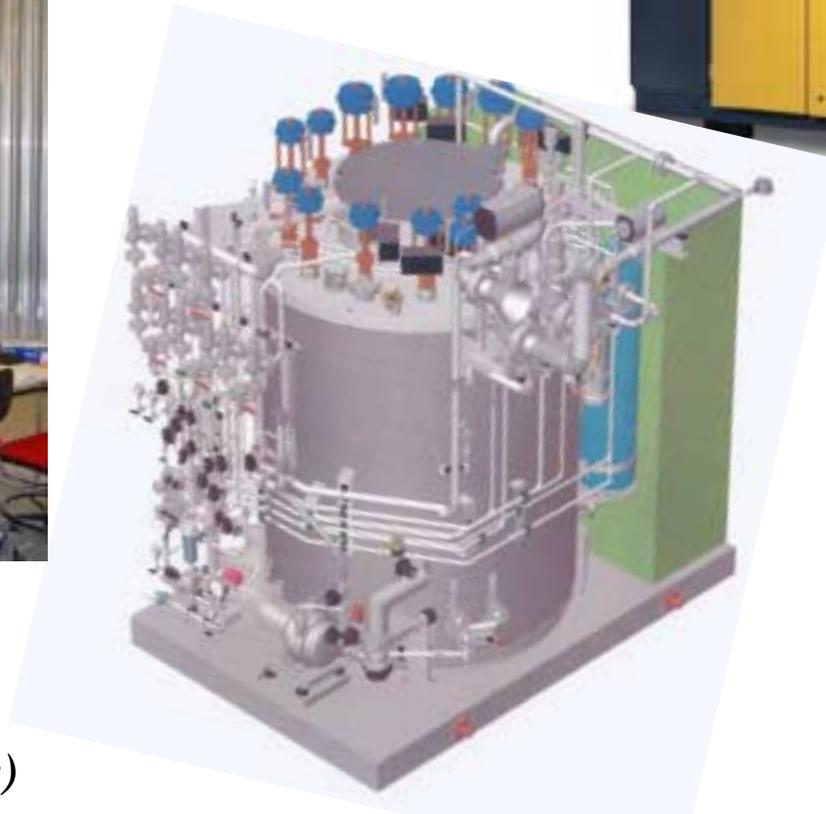
*Tête Froide  
(compresseur non présenté)*

*Cyclotron supraconducteur à PSI utilisant plusieurs Têtes Froides*

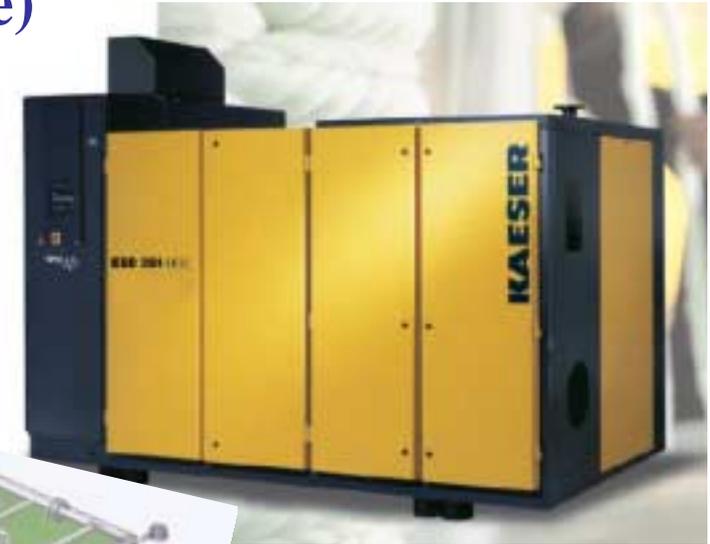
## Exemples de « petits » réfrigérateurs ou liquéfacteurs hélium (L'Air Liquide)



*Boîte froide  
Hérial 2000  
(500 W ou 150 l.h<sup>-1</sup>LHe)*



*Boîte froide Hérial 2000*

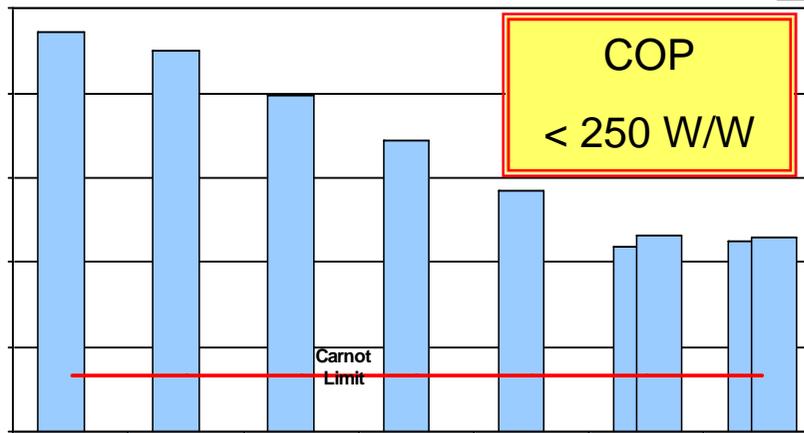


*Compresseur  
(15 bars 290 KW -69 g/s)*

# Exemples de « gros » réfrigérateurs ou liquéfacteurs hélium

18 kW @ 4.5 K

33 kW @ 50 K to 75 K - 23 kW @ 4.6 K to 20 K - 41 g/s liquefaction



# La supraconductivité

*(ou « toute résistance est inutile ! »)*



# L'histoire de la supraconductivité

**Un fort lien de parenté avec la cryogénie**

- historiquement (début XX siècle avec l'hélium liquide)
- théoriquement  
(des similitudes avec la superfluidité de l'hélium)
- dans la mise en œuvre (basses températures)

**Indispensable pour la fabrication des grands accélérateurs**

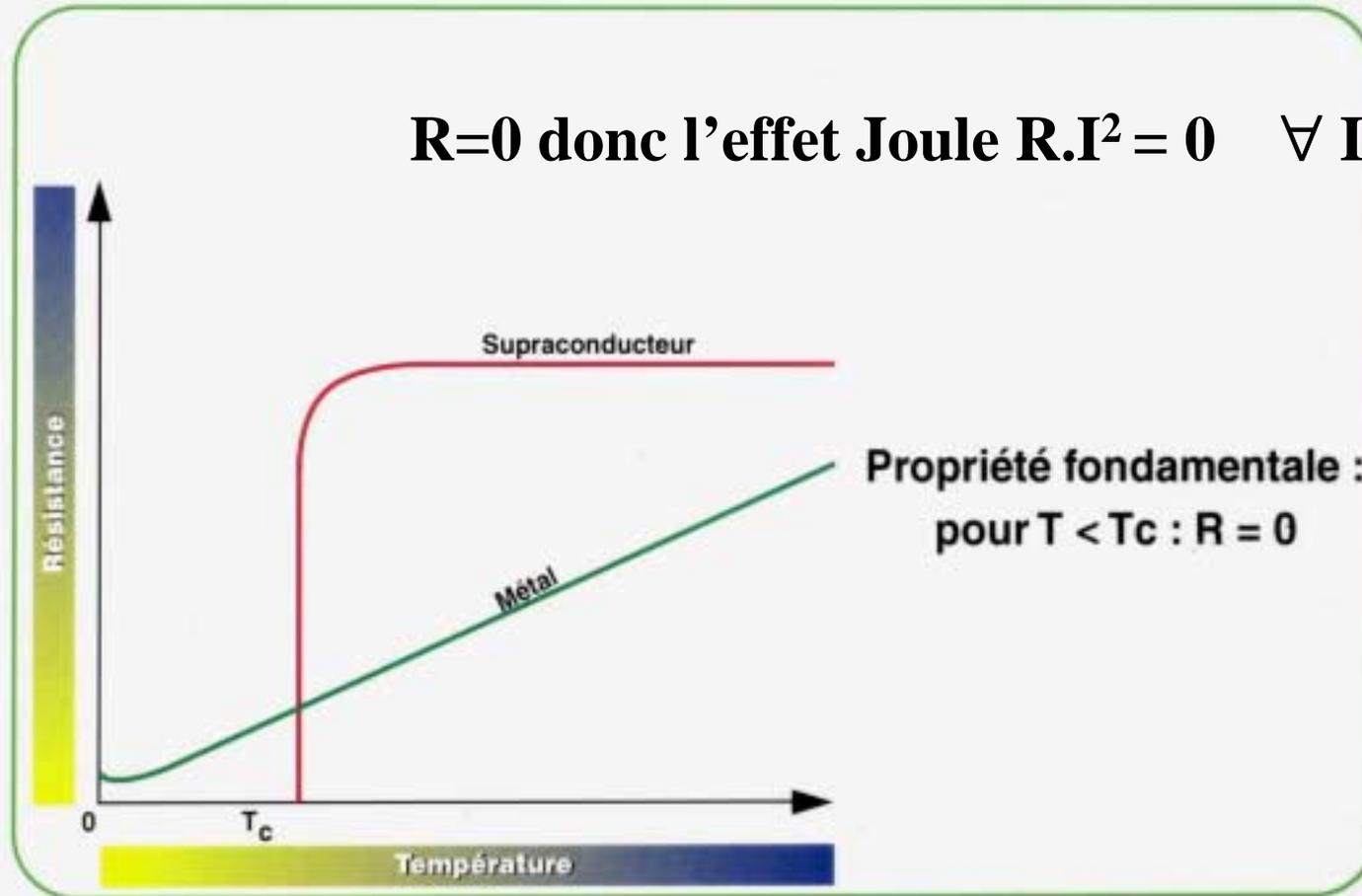
- aimants puissants mais « économiques » et compacts
- cavités résonantes HF pour l'accélération des faisceaux de particules en continu

**Utilisation en :**

- Médical (IRM...)
- Électronique (jonction...)
- Électrotechnique (électro-aimants, moteur, transfo, limiteur...)
- Transport....

# La supraconductivité

**$R=0$  donc l'effet Joule  $R.I^2 = 0 \quad \forall I$**



# La supraconductivité = réduction de taille

Refroidi à l'eau  
autour de  $T_{amb}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ )



*Câble cuivre*

Refroidi à l'hélium liquide  
autour de  $4\text{ K}$  ( $-269^{\circ}\text{C}$ )

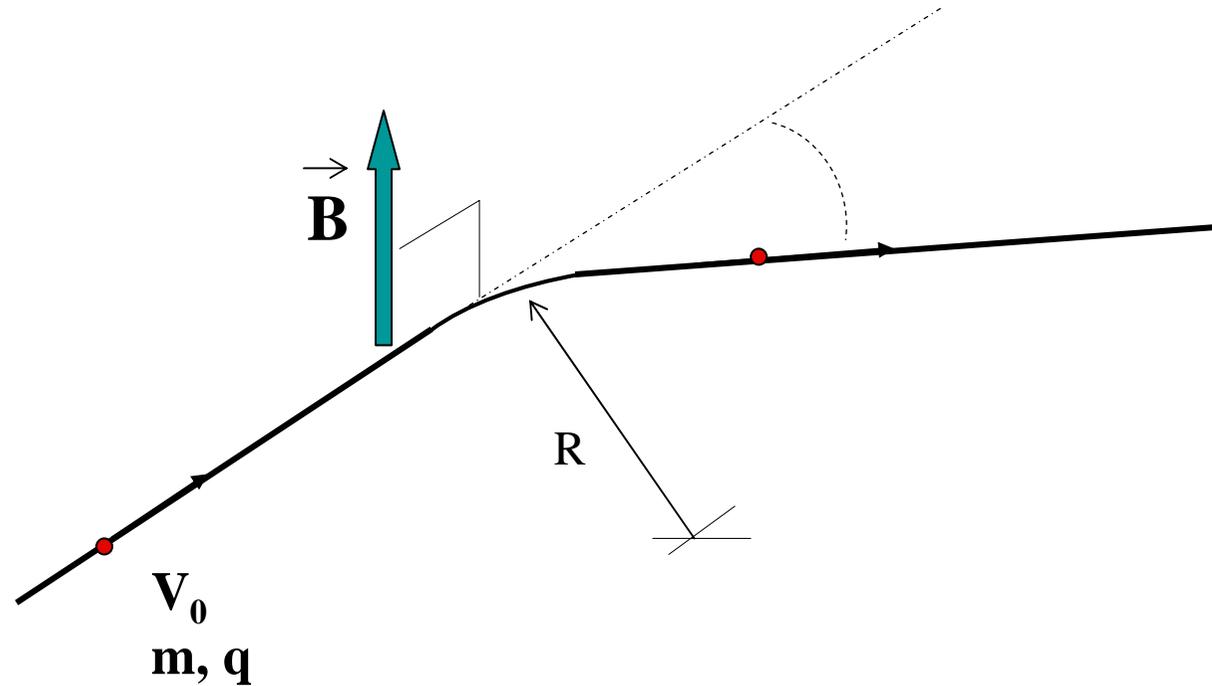


*Câble supraconducteur  
(Niobium-Titane)*

*Ces deux câbles peuvent transporter 15 000 ampères*

# La supraconductivité pour électro-aimants

## fort champ magnétique pour particule de forte énergie

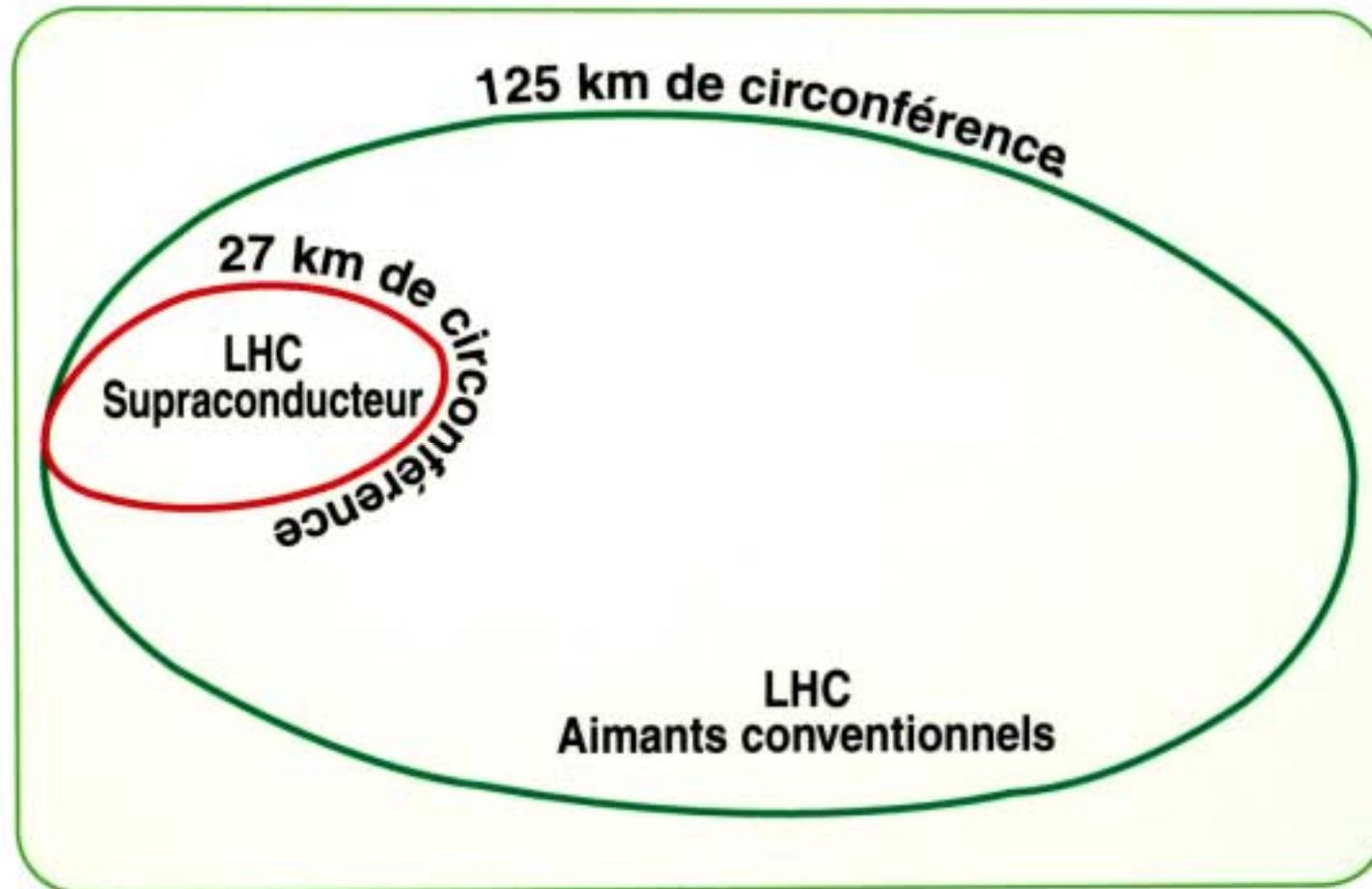


Déviation d'une particule chargée ( $q$ ), de masse  $m$ , dans un champ magnétique  $B$  orthogonale à sa trajectoire

rayon de courbure,  $\mathbf{R = (m \cdot V_0) / (q \cdot B)}$

*Application : dipôle magnétique de déviation*

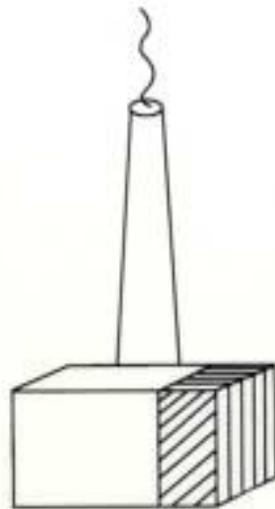
**La supraconductivité =  
très fort champ magnétique = x 5 / aimants chauds**



# La supraconductivité = moins de « pertes » ( $R.I^2=0$ )

LHC avec  
aimants supraconducteurs

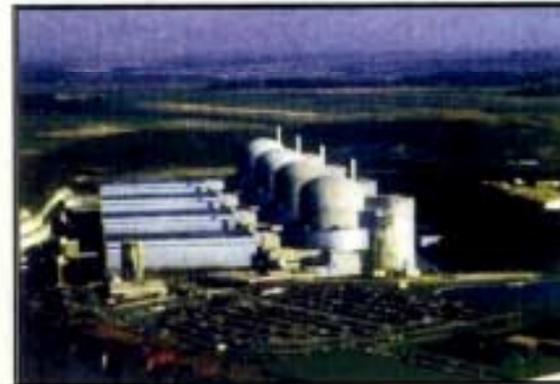
40 MW



LHC avec  
aimants conventionnels

4000 MW

4,5 Tranches de 900 MW



# La supraconductivité et la physique (quelques exemples)

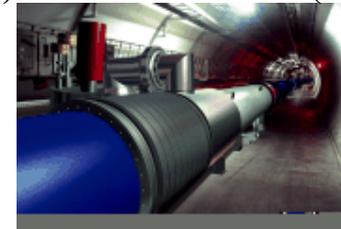
**Puissance à froid**  
(Watts à T° nominale)



**ATLAS (1,5 KW à 4,5 K) CMS (800 W à 4,5 K)**  
(2006) (2006)



**HERA (1990)**  
20kW à 4,5 K



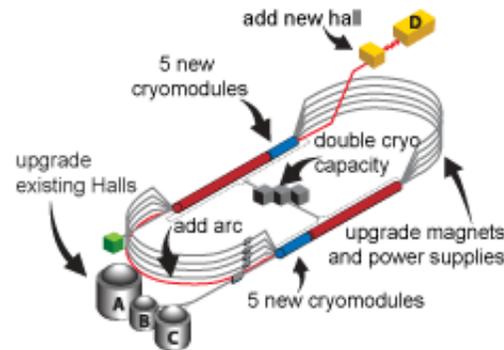
**LHC (2007)**  
20 kW à 1,8K - 70 kW à 4,5 K



**ITER (2020)**  
60 kW à 4 K



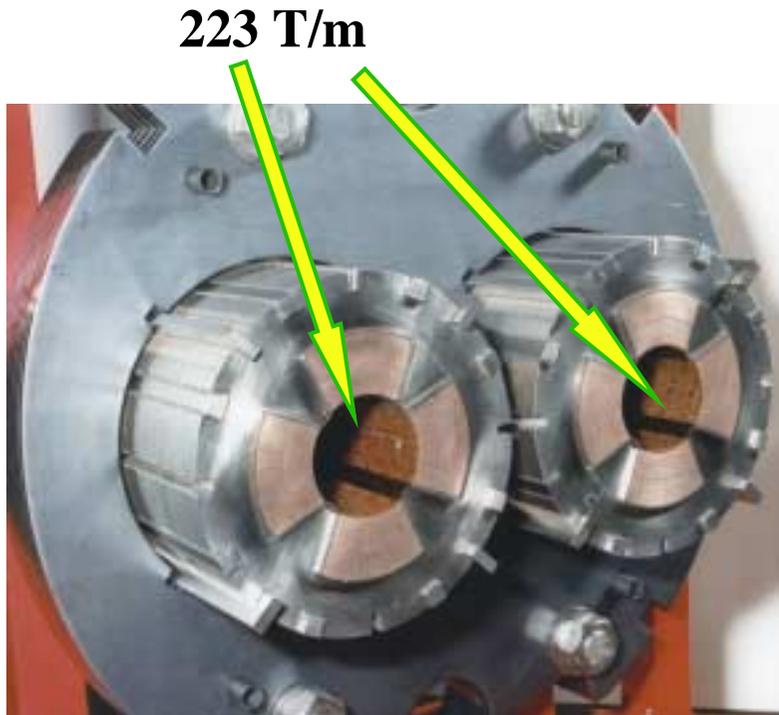
**TORE SUPRA (1985)**  
300W à 1,8 K



**CEBAF (1995)**  
5 kW à 1,8 K

**Temps**

# Aimants supraconducteurs pour faisceau et détecteur



**Quadrupôles LHC - 2003**

Ø 6m

4T



**Solénoïde CMS - LHC - 2006**

# L'IRM demain: *vers les Très Hauts Champs ...*

Repousser les limites physiques: *résolution spatiale, temporelle, spectrale*

- Scanners IRM médicaux: 0,1-1,5 tesla
  - Scanners « recherche »: 3 – 5 tesla
    - Scanners « très haut champ » : 7 tesla et plus

*Aimant 3.0T (Bruker) du SHFJ*



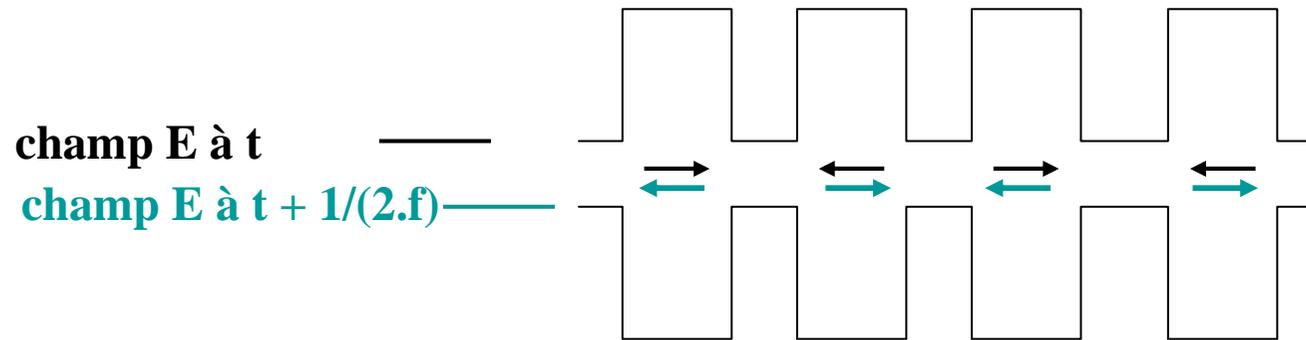
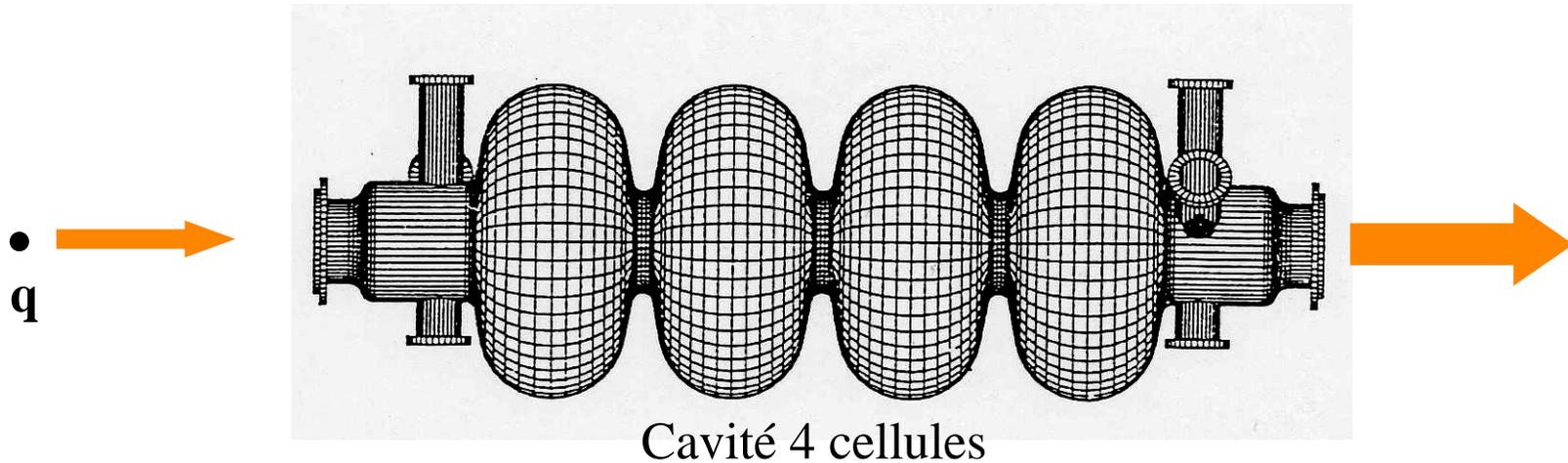
*Aimant 1.5T (GE) du SHFJ/CEA*



*Aimant 7T du CMRR (USA)*

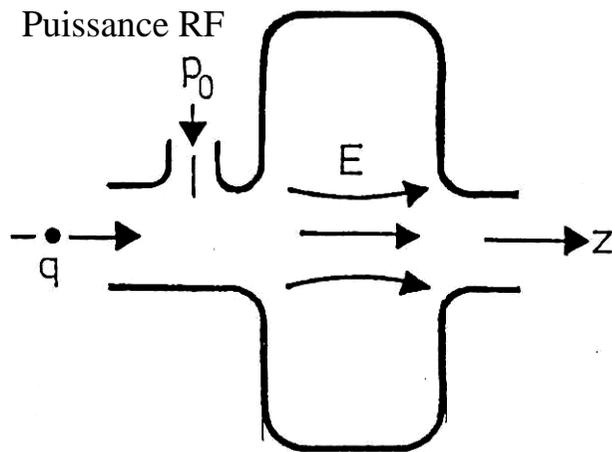
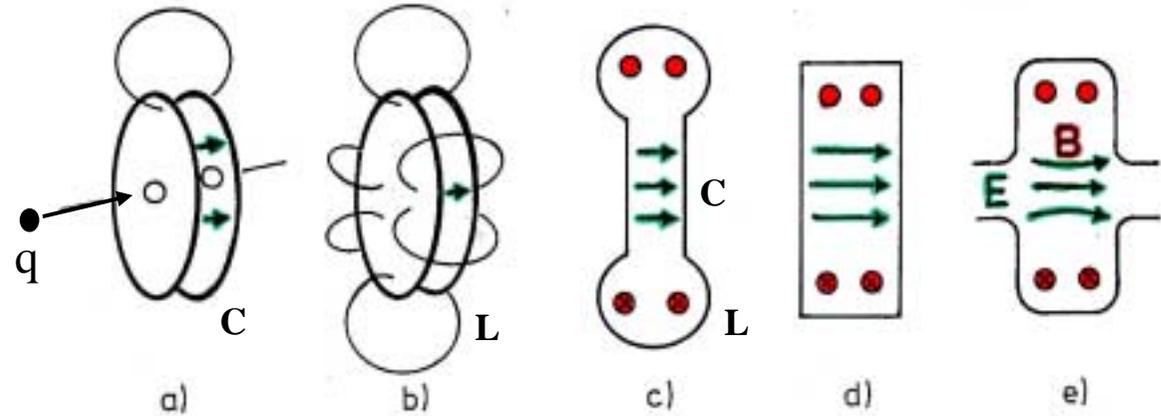
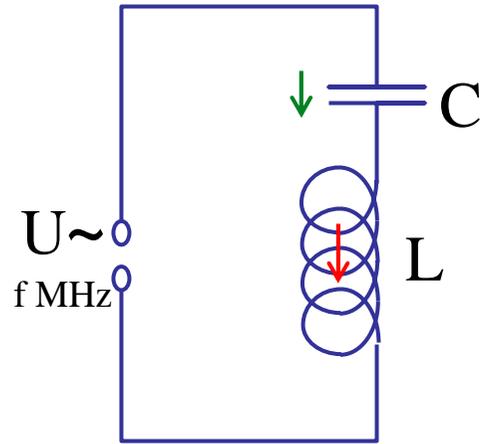
***1 tesla = 10 000 gauss – Champ magnétique terrestre à Paris = 0,5 gauss ...***

# Cavités résonantes RF pour l'accélération faisceau



Champ électrique accélérateur pulsé

# Cavité résonante RF



$\Leftrightarrow$  Circuit Inductance + Capacité

**E** champ électrique accélérateur

**B** champ magnétique

pulsés en fréquence

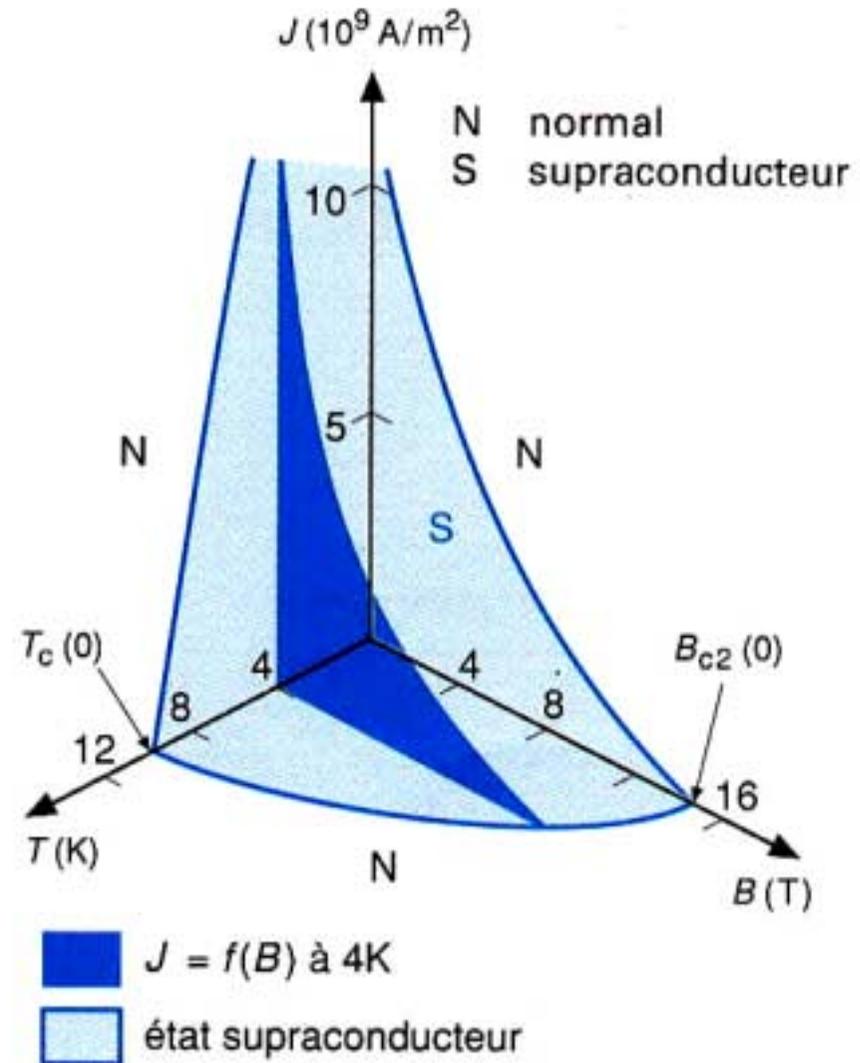
# La supraconductivité et ses limites

Il existe un domaine supraconducteur limité par la température critique mais aussi par un champ magnétique critique et une densité de courant critique.

$T_c$  en K,  $B_c$  en Tesla,  $J_c$  en A/mm<sup>2</sup>

$T_c(B,J)$ ,  $B_c(T,J)$ ,  $J_c(T,B)$

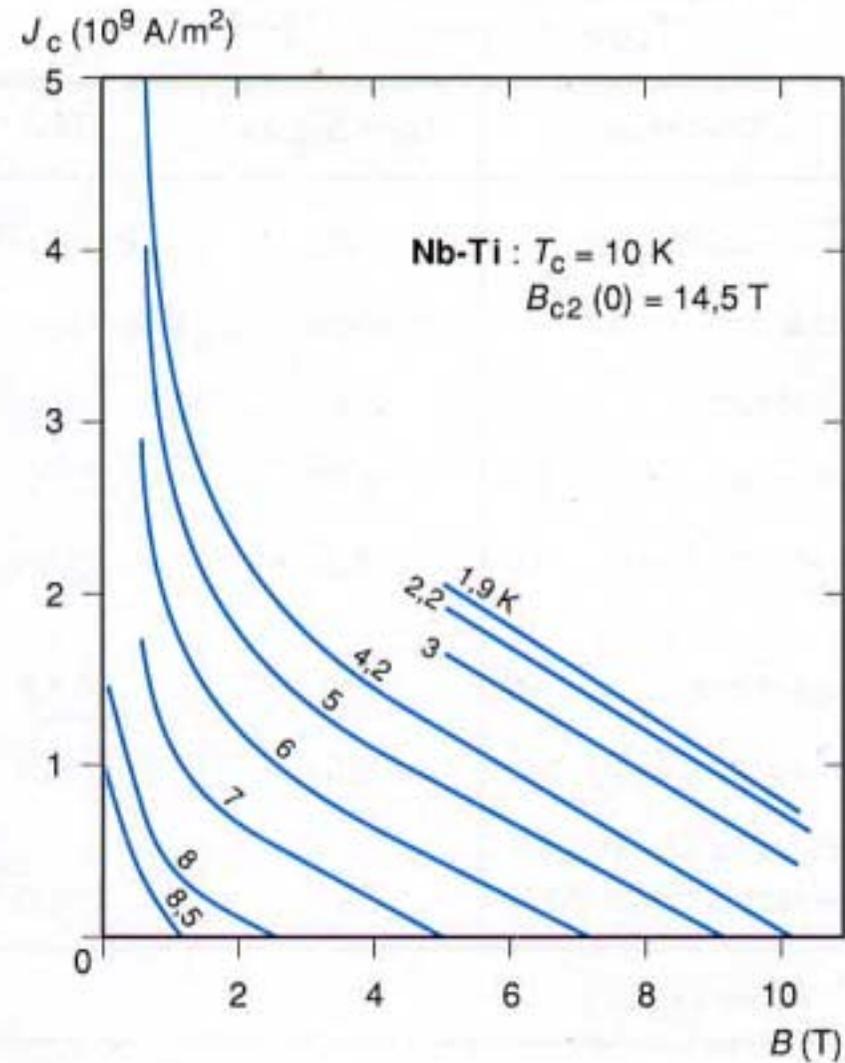
- $R = 0$  à l'intérieur de ce domaine
- $B_c(T) = B_c(0) \cdot [1 - (T/T_c)^2]$



## Champ magnétique critique . ex : NbTi

Travailler sous fort champ magnétique, c'est descendre le point de fonctionnement à plus basse température.

Idem pour augmenter la densité de courant.



# Exemples de supraconducteur

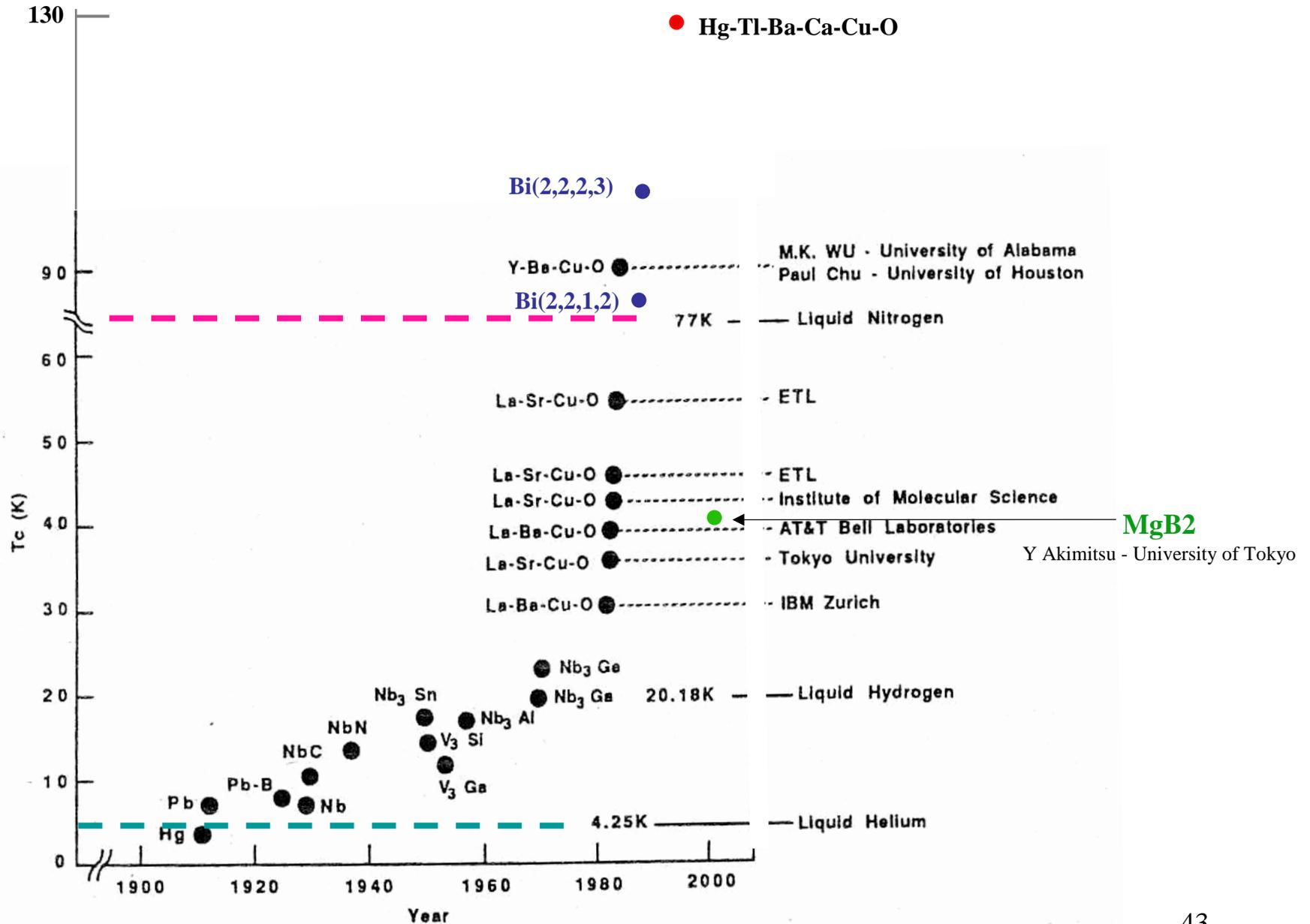
Supraconducteurs		Éléments	Température critique $T_c$ K	Induction magnétique critique (1) $B_c = \mu_0 H_c$ T
Type I		He <sub>3</sub> .....	0,0028	$\left. \begin{array}{l} 1,05 \cdot 10^{-2} \\ 4,12 \cdot 10^{-2} \\ 8,03 \cdot 10^{-2} \\ 10^{-4} \\ 1,5 \cdot 10^{-2} \end{array} \right\} \text{à } 0 \text{ K}$
		Al .....	1,19	
		Hg .....	4,15	
		Pb .....	7,18	
		W .....	0,012	
		U .....	0,68	
Type II	Alliages métalliques	Nb .....	9,2	$\mu_0 H_{c2}$ $\left. \begin{array}{l} 0,3 \\ 11 \\ 20,1 \\ 35 \\ 50 \end{array} \right\} \text{à } 4,2 \text{ K}$
		NbTi .....	10	
		Nb <sub>3</sub> Sn .....	18	
		Nb <sub>3</sub> Ge .....	23	
		PbMo <sub>8</sub> S <sub>8</sub> .....	15	
	Organiques	(TMTSF) <sub>2</sub> PF <sub>6</sub> .....	1 (sous 12 kbar)	$\left. \begin{array}{l} 6,8 \\ 0,25 \end{array} \right\} \text{à } 0 \text{ K (suivant la direction du champ)}$
		(BEDT-TTF) <sub>2</sub> I <sub>3</sub> .....	$\left\{ \begin{array}{l} 3,6 \text{ à } p_0 (3) \\ 8,1 \text{ (sous 1 kbar)} \end{array} \right.$	
	HTSC (2)	YBaCuO .....	92	$\left. \begin{array}{l} 6 (H//c) \\ 67 (H \perp c) \end{array} \right\} \text{à } 77 \text{ K}$
		BiSrCaCuO .....	110	
TlBaCaCuO .....		125		
BaKBiO <sub>3</sub> .....		30		

- Métaux purs = type I : bas T<sub>c</sub> et très bas B<sub>c</sub> (Pb et Nb pour cavités)
- Alliages métalliques = type II : très utilisés (NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn) aimants et cavités
- «Céramiques isolantes» = type II : en développement (électro[tech]nique...)

# Développements actuels

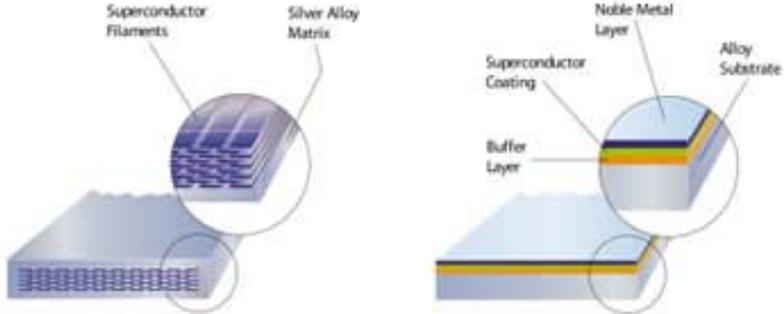
- Supras « métalliques » classiques Bas Tc :
  - Aimants de grand volume (NbTi)
  - Aimants à très haut champ (Nb<sub>3</sub>Sn)
  - Cavités RF à fort gradient (Nb ou Nb sur Cu)
  - Stockage d'énergie (SMES-USA)
  - Imagerie médicale (IRM)
- Supras Haut Tc (« céramiques/oxydes ») : BiSrCaCuO (rubans ou fils) ou YBaCuO (rubans, dépôts)
  - Électronique (filtre faible bande)
  - Transport de l'électricité (transfo, lignes refroidies LN<sub>2</sub>)
  - MgB<sub>2</sub> (composé intermétallique)

# Développements actuels



# Exemples de développements actuels

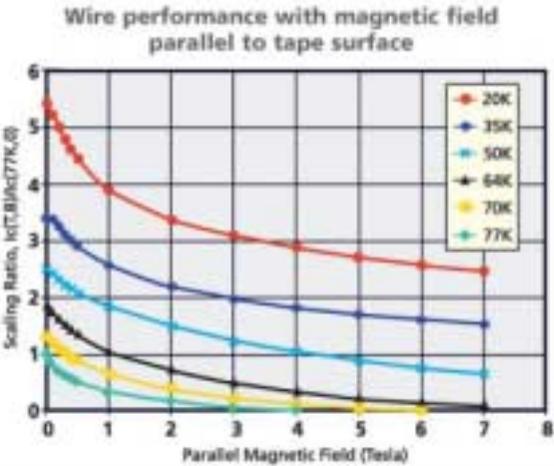
<http://www.amsuper.com>



## Details of 2G HTS Wire Architecture

Nickel-Tungsten Alloy Substrate	Nanotech Surface Treatment with Sulfur	Yttrium Oxide Seed Layer (Buffer)	Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) (Buffer)	Ceria Cap Layer (Buffer)	YBCO Superconductor Coating With Nanodots	Silver Cap Layer
Strip or sheet of metal alloy, produced by traditional metal deformation processes, in which the atoms are precisely aligned ("crystallographic texture")	Creates a self-assembled superlattice of sulfur atoms	Yttrium Oxide ( $Y_2O_3$ ) grows epitaxially on the alloy substrate after nanotech surface treatment with sulfur	YSZ replicates crystallographic texture of alloy substrate	Ceria ( $CeO_2$ ) provides chemically and structurally compatible layer for YBCO formation	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (YBCO) superconductor coating containing a dispersion of nanodots carries direct current with zero resistance	Key to improving mechanical properties; also stabilizes wire against local heating
Provides a foundation for the formation of a highly ordered coating of YBCO superconductor	Ensures very high quality buffer layers on which the YBCO superconductor coating will be formed	Transfers texture of metal alloy substrate to YBCO superconductor	Serves as barrier to contamination of YBCO superconductor from the substrate metals	Enables formation of high performance YBCO layer produced by decomposition of metal-organic precursor subsequently deposited on the ceria cap layer	Nanodots increase current carrying capability by immobilizing ("pinning") magnetic vortices ("flux lines") in the YBCO	

The 3D diagram shows the layers from bottom to top: Nickel-Tungsten Alloy Substrate, Yttrium Oxide ( $Y_2O_3$ ), Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ), Ceria ( $CeO_2$ ), YBCO Superconductor, and Silver.



## CRYOGENIE, VIDE, SUPRACONDUCTIVITE

Quelques références bibliographiques

<u>Thèmes</u>	<u>Titres</u>
<b>Cryogénie</b>	
	Notes de Cryogénie
	Éléments de Cryogénie
	<b>Cryogénie, ses applications en supraconductivité</b>
	Helium Cryogenics
	Cryogenic Process Engineering
	Cryogenic Systems
	Experimental Techniques in Low Temperature Physics
	Cryogenics (revue mensuelle)
	<b>Handbook of cryogenic engineering</b>
	<b>Cryogenic Engineering</b>
<b>Thermique</b>	
	Initiation aux Transferts Thermiques
	Éléments d'Échanges Thermiques
	Heat Transfer
	Heat Transfer at Low Temperatures
<b>Supraconductivité</b>	
	Introduction to Superconductivity
	Superconducting Magnets
	Superconductivity in Particle Accelerators
	La Supraconductivité
<b>Matériaux et Gaz</b>	
	Materials at Low Temperature
	Data Series on Material Properties
	Encyclopédie des Gaz
<b>Vide</b>	
	Bases de la Technique du Vide, Calculs, Tables
	Le Vide
	Notions de base en Technique du Vide
	Les Calculs de la technique du vide

## Bibliographie

<u>Auteurs</u>	<u>Editeurs</u>	<u>Langue</u>
J.VERDIER	CEA/SBT-LCT/1-86	F
R. CONTE	Masson	F
<b>Institut International du Froid</b>	<b>Techniques de l'Ingénieur</b>	<b>F</b>
S. VAN SCIVER	Plenum Publishing Corporation	A
K. TIMMERHAUS	Plenum Publishing Corporation	A
R. BARRON	Oxford University Press	A
G. WHITE	Oxford University Press	A
<b>J.G. WEISEND II</b>	Heinemann Elsevier	A
<b>T. FLYNN</b>	<b>Taylor and Francis</b>	<b>A</b>
	<b>Marcel Dekker MDI</b>	<b>A</b>
J. SACADURA	Technique & Documentation	F
WEILL	Masson	F
M. BECKER	Plenum Press	A
W. FROST	Plenum Press	A
A. ROSE-INNES	Pergamon Press	A
M. WILSON	Clarendon Press Oxford	A
CERN ACCELERATOR SCHOOL	CAS- 89/04	A
A. TIXADOR	Hermès	F
R. REED	American Society for Metals	A
J. TOULOUKIAN	Mac Graw Hill	A
L'AIR LIQUIDE	Elsevier	F
LEYBOLD-HERAEUS	Leybold-Heraeus	F
P. DUVAL	Masson	F
G. ROMMEL	Société Française du Vide	F
G. MONGODIN	Société Française du Vide	F