

Introduction à la cryogénie et à la supraconductivité

Fluides cryogéniques
L'état supraconducteur

philippe.bredy@cea.fr

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

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:

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

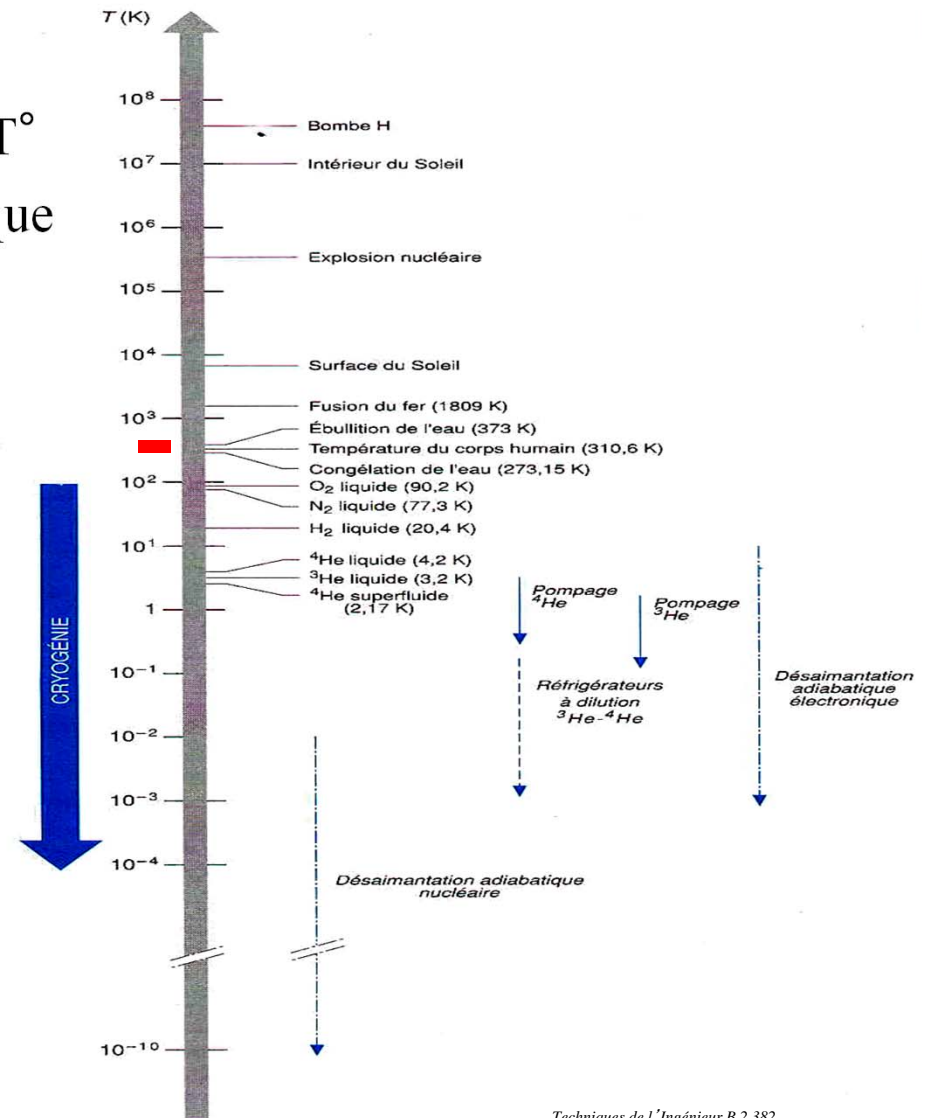
- Fluides cryogéniques (cryogènes)

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])

- Symbolique :

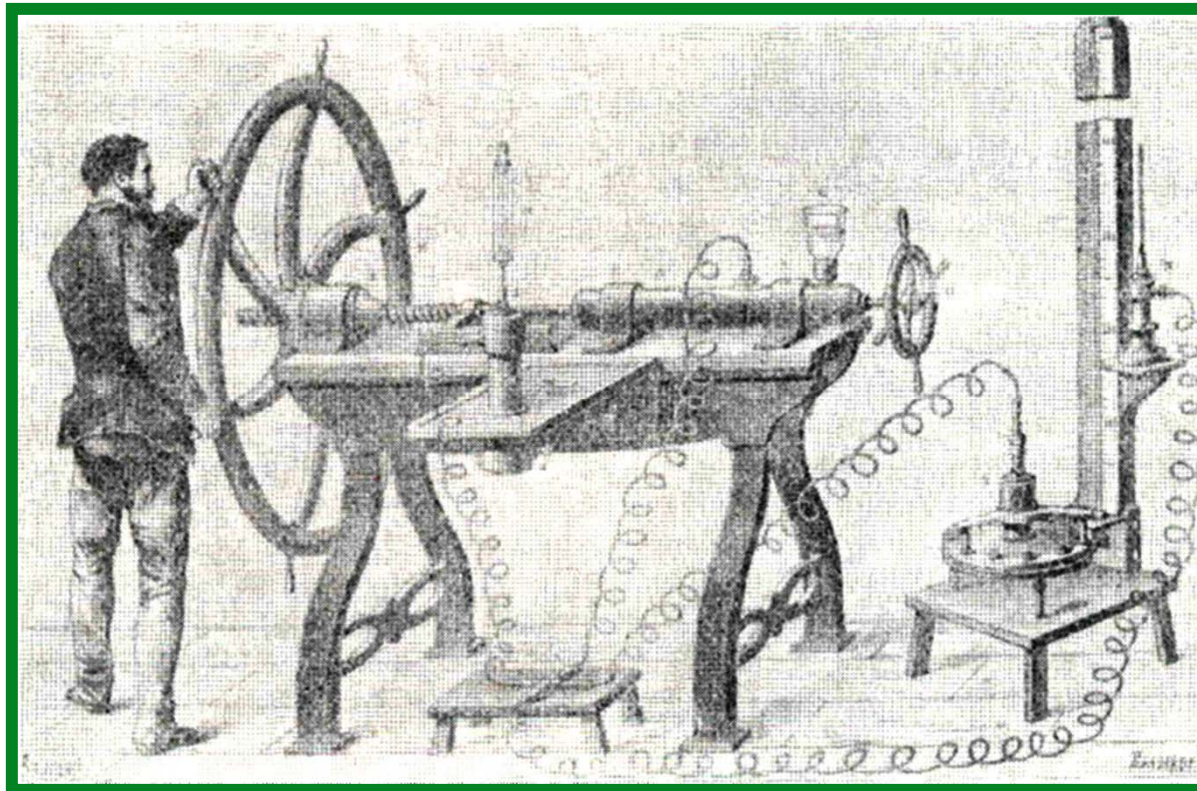
– LHe, LH₂, LNe, LN₂, LAr...



Techniques de l'Ingénieur B 2.382

Fin du XIX siècle

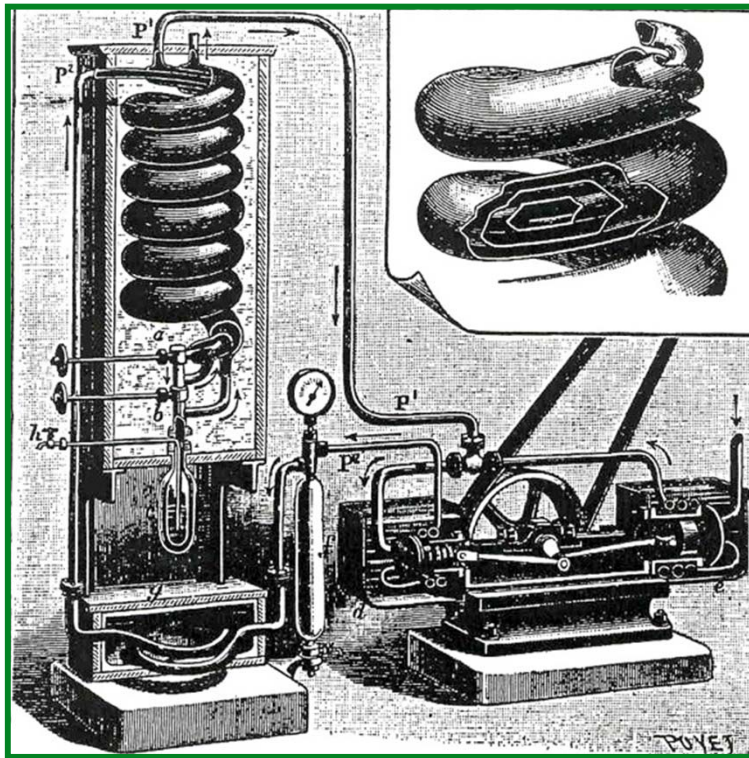
De la production de glace, en passant par la surgélation pour les denrées jusqu'à la liquéfaction des gaz de l'air.



Cailletet en 1877 : brouillard d' O₂ liquide

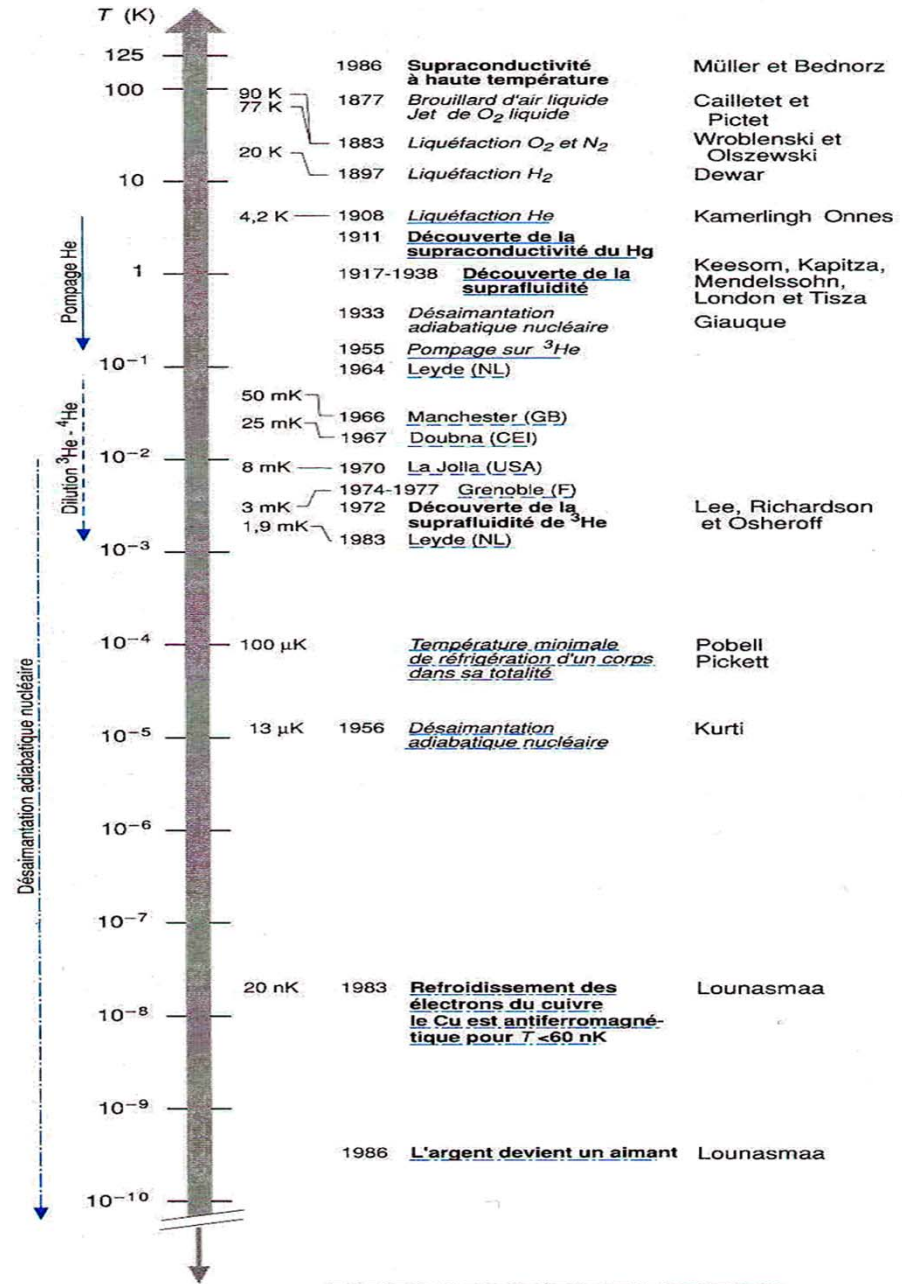
Historique

Entrée dans le domaine des températures cryogéniques à la fin du XIX^{ème} siècle



Liquéfacteur d'air LINDE

Avril 2013



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

1851 **Définition de la notion de zéro absolu (0 K)** Kelvin

ETBD Cargèse

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 du plasma, cible
L³H pour confinement inertiel par laser

Astrophysique
Capteurs refroidis pour observation au sol
ou spatiale...

Industriel

Electronique
(détecteur, composants ...)

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

Transport
(train Maglev)

Liquéfaction et réfrigération
Stockage des fluides
Isolation

Spatial
Propulseur (carburant et moteur), satellite (tests...), blindage magnétique

Médical
IRM
Cryochirurgie, cryoconservation

Militaire
Détection IR...

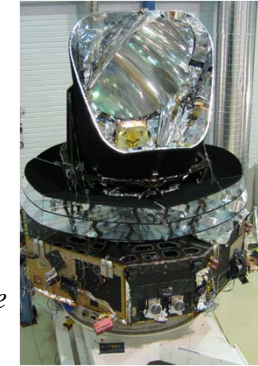
La cryogénie : domaine pluridisciplinaire



- Thermique , mécanique du solide ou des fluides, magnétisme, électrotechnique...
→ les multiples aspects d'une installation cryogénique
- **Lois physiques habituelles** mais **grand écart 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 :
 - **constantes 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 (**LH₂, LD₂, LHe...**)
 - liquide cryogénique comme traceur du passage de particules(**LAr, LKr, LH₂...**)
(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



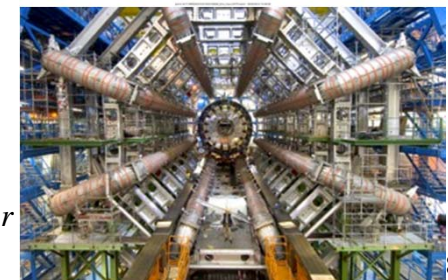
Satellite
Planck



LHC



Cible LH2



Détecteur
ATLAS

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

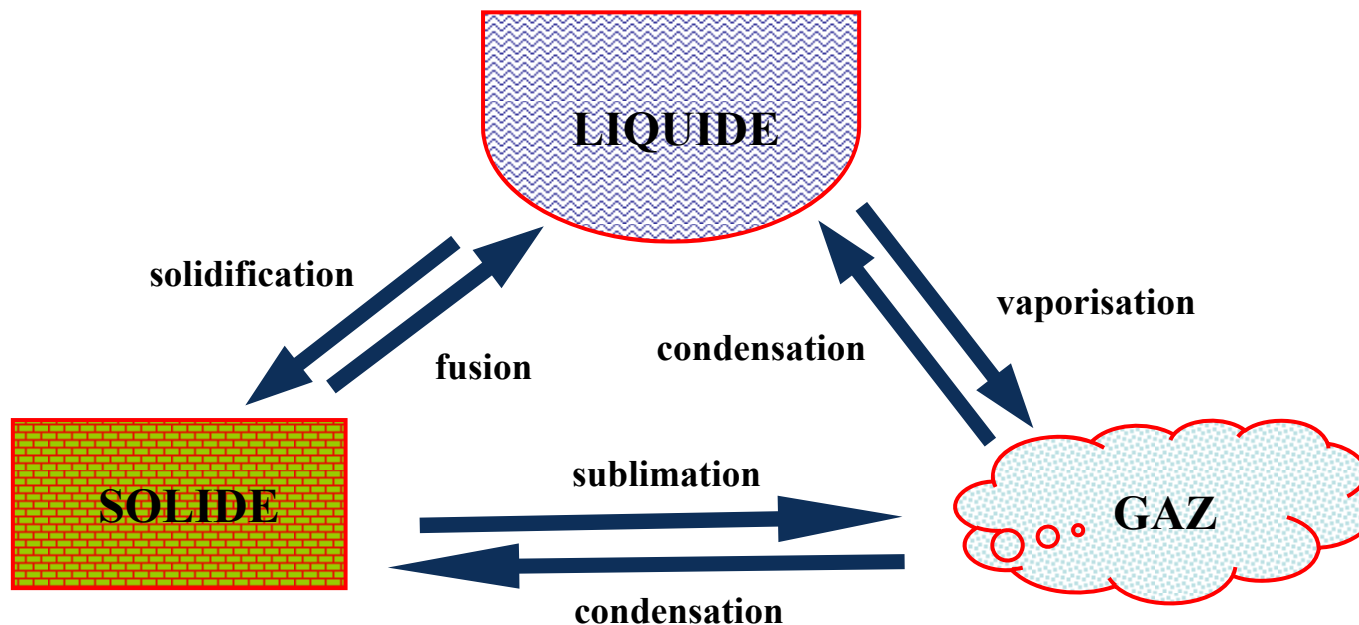
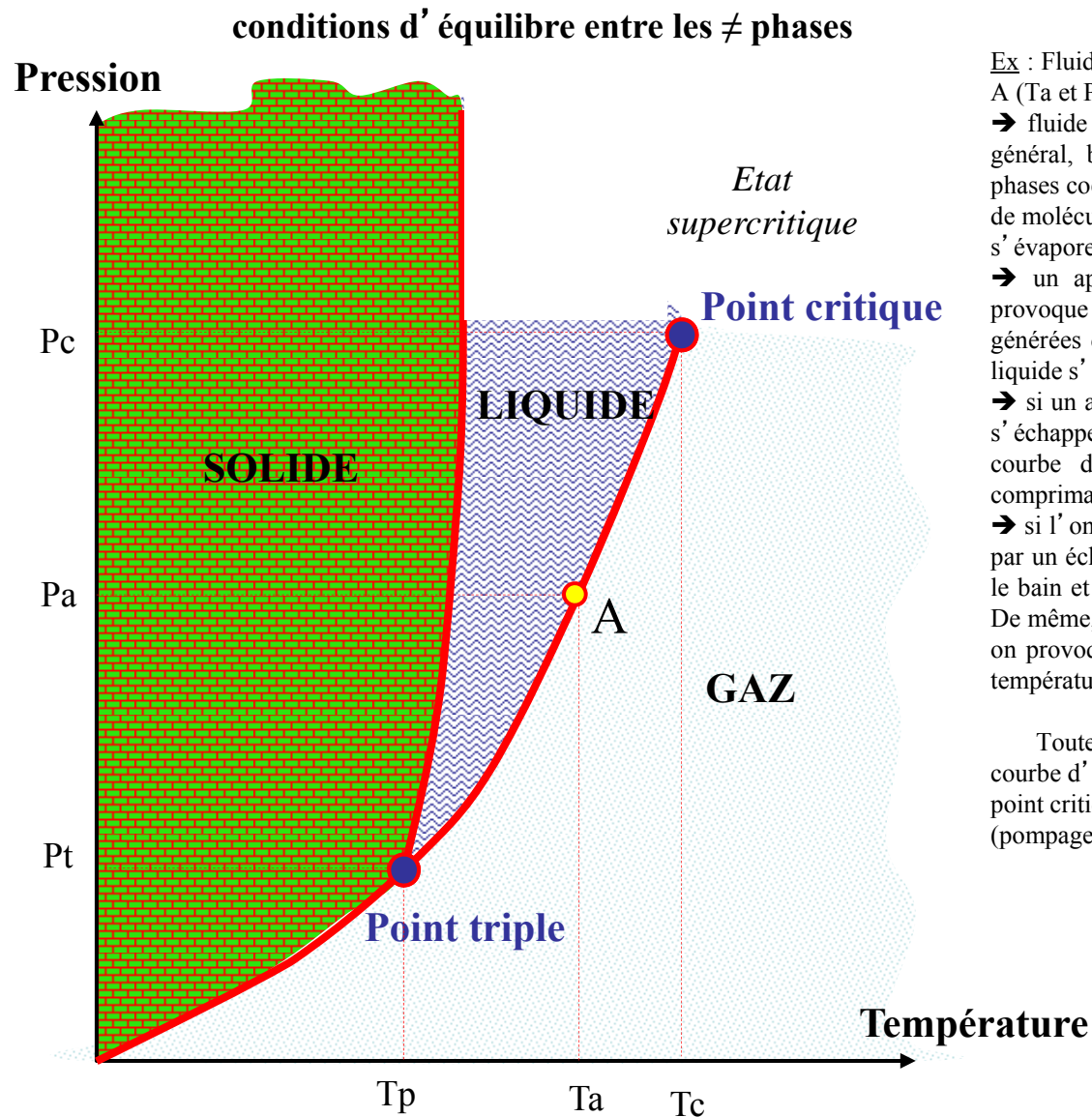


Diagramme de phase



E_x : 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 œuvre 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 pression constante et 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 infiniment 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:

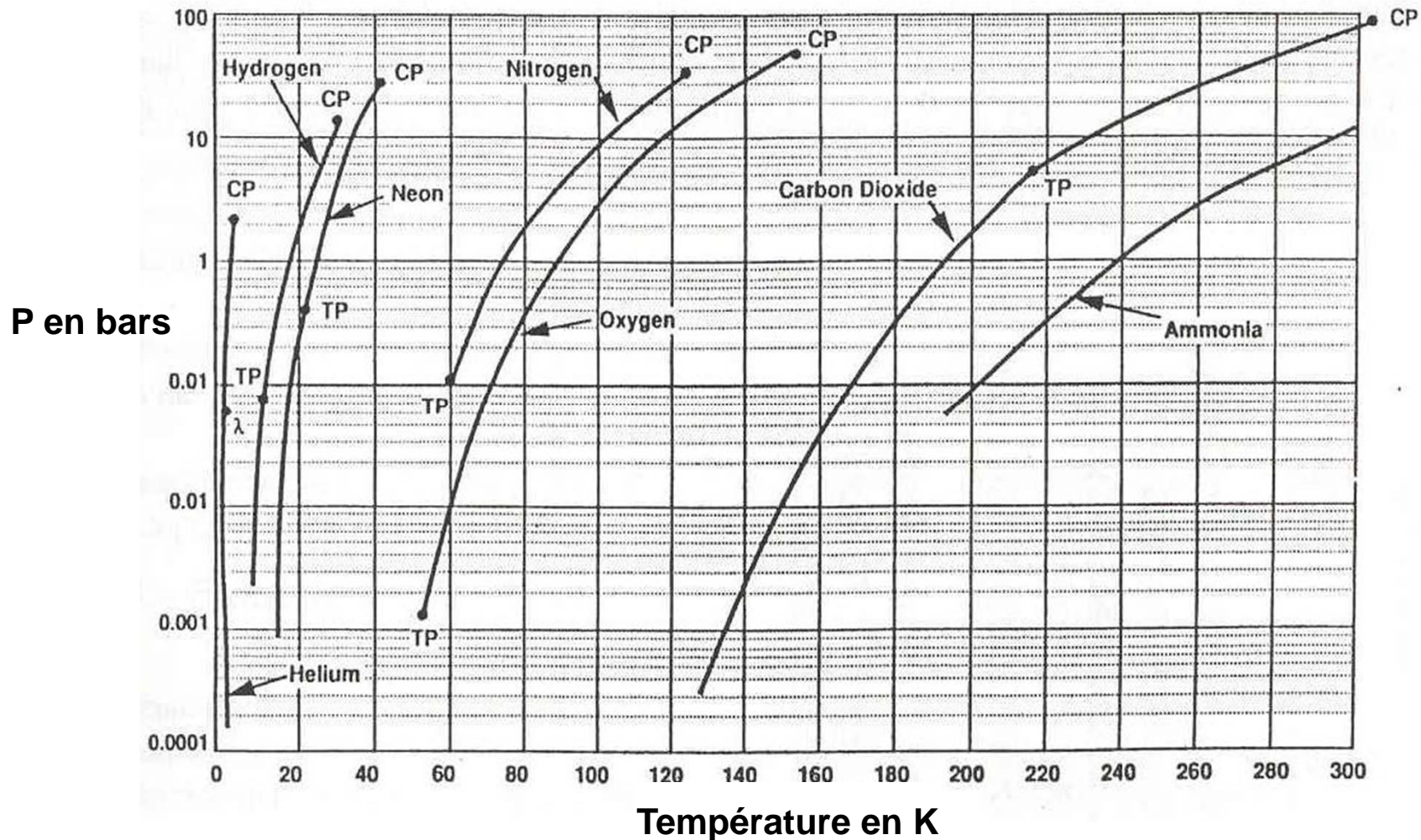
- l'évolution en température d'un bain sur lequel on modifie la pression :

($P \downarrow$ = 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

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

LH₂

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

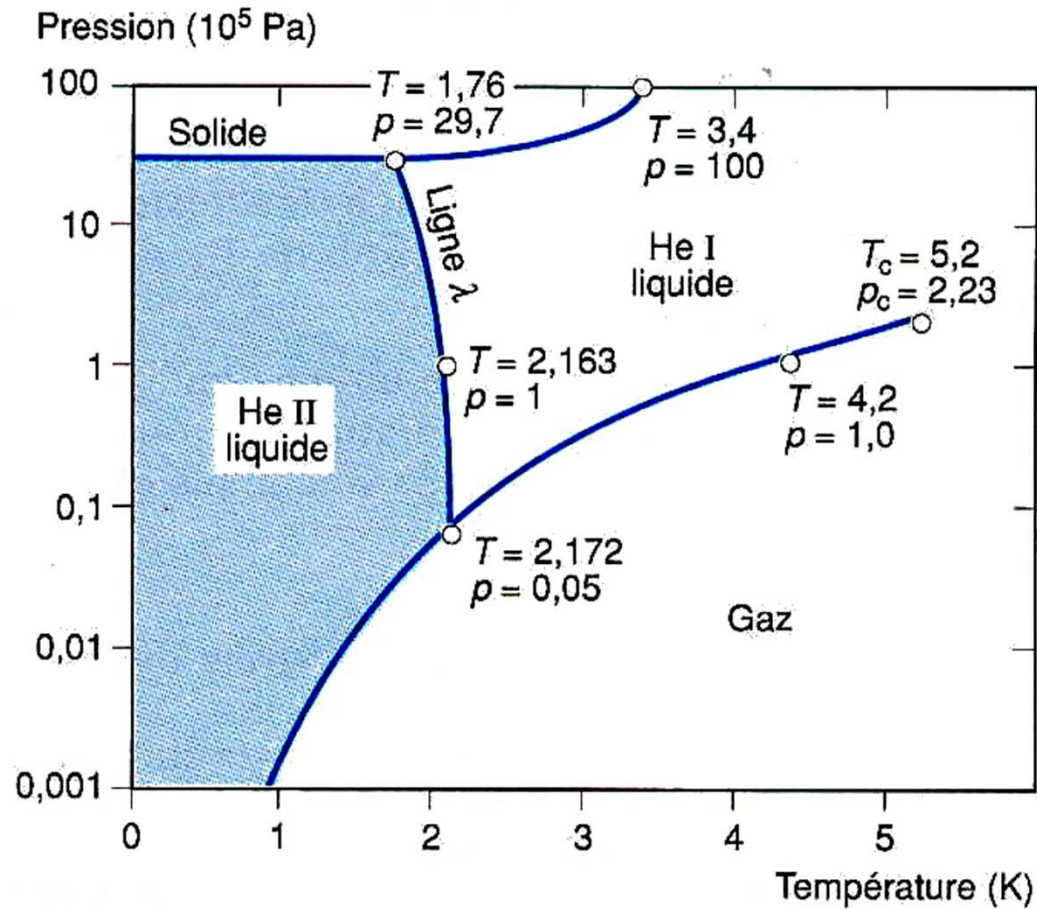
LNe

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

LN₂

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

Cas particulier de l'hélium



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

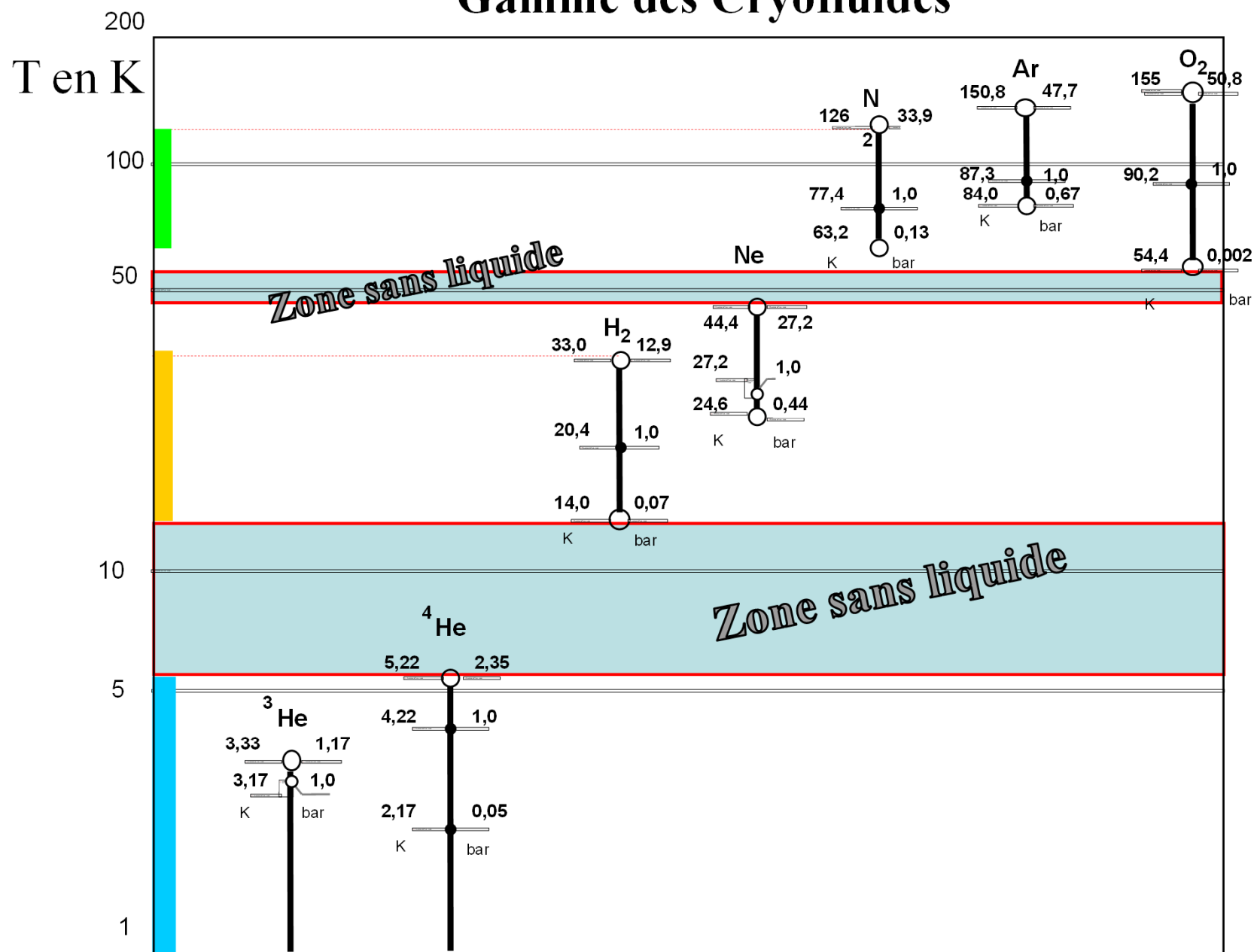
Pas de point triple (sol-liq-gaz)

mais un état supplémentaire dit SUPERFLUIDE (liquide HeII)

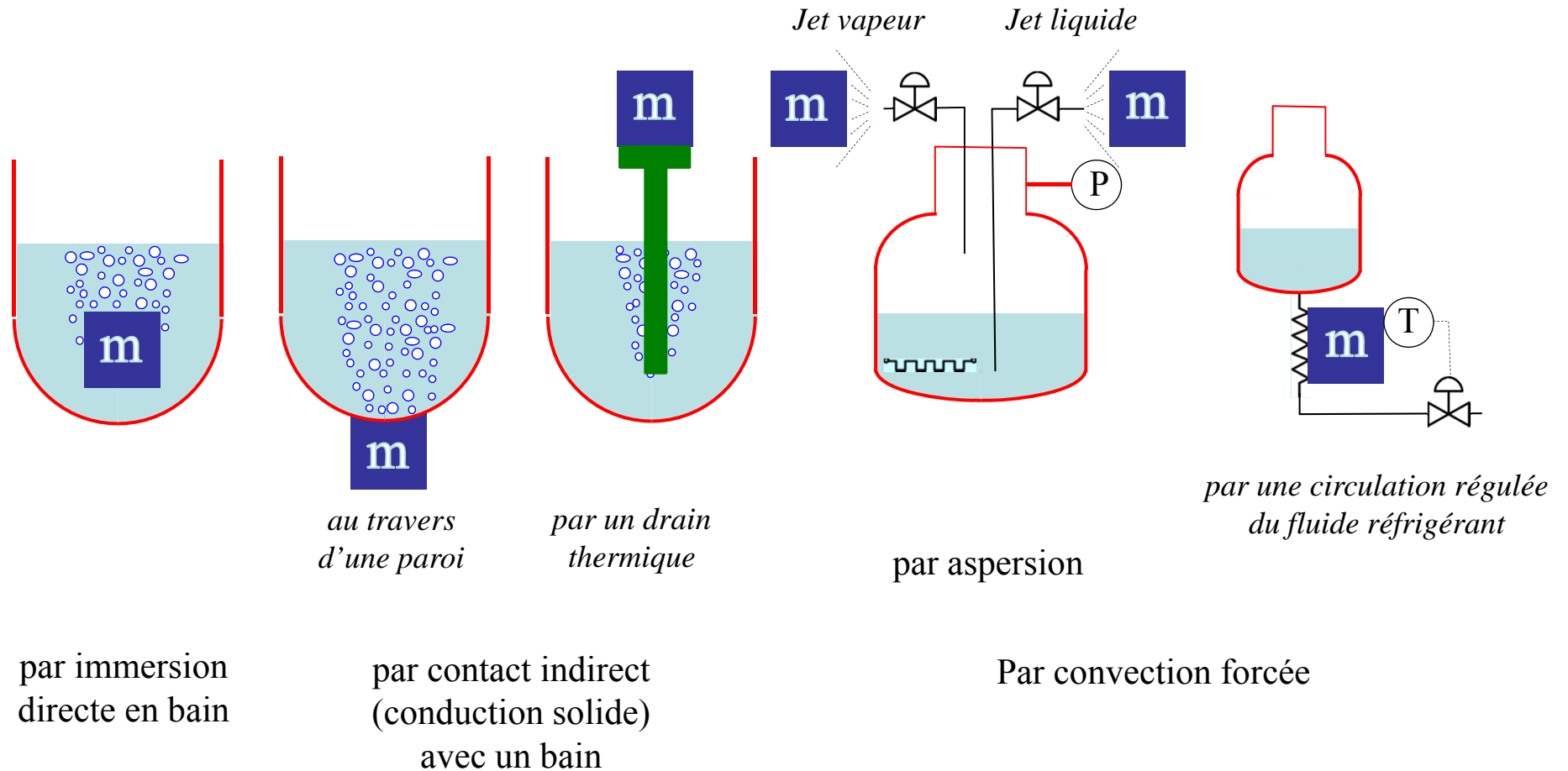
aux propriétés remarquables (très forte conductibilité thermique, faible viscosité,...)

Très utilisé dans le refroidissement des aimants supraconducteurs

Gamme des Cryofluides



Utilisation d'un liquide cryogénique



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 $J.kg^{-1}$

Capacité calorifique C : (ou chaleur spécifique par unité de masse)

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 ΔT est directement fonction de la capacité calorifique C du corps.

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T \quad \text{où } Q \text{ s'exprime en joule, } M \text{ la masse en kg, } \Delta T \text{ l'écart de température en K} \\ \text{et } C \text{ en } J.kg^{-1}.K^{-1}$$

Le plus couramment, on utilise C_p la chaleur spécifique à pression constante **C_p** en $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Chaleur sensible Δh : (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 $T_{éb}$ (température d'ébullition) à T_{amb} (température ambiante).

$$\Delta h = \int_{T_{éb}}^{T_{amb}} C_p \cdot dT$$

où ΔH 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 [$T=f(P)$]

H_2O : $100^\circ C$ (373 K) @1 atm

N_2 : $-196^\circ C$ (77 K) @ 1 atm

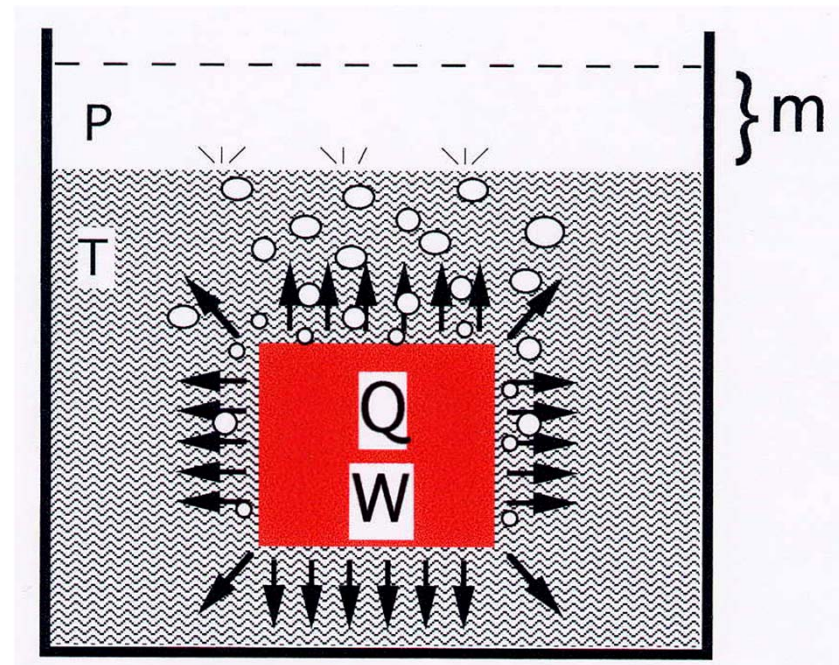
He : $-269^\circ C$ (4.2 K) @ 1atm

$$Q = m \cdot L_v$$

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

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

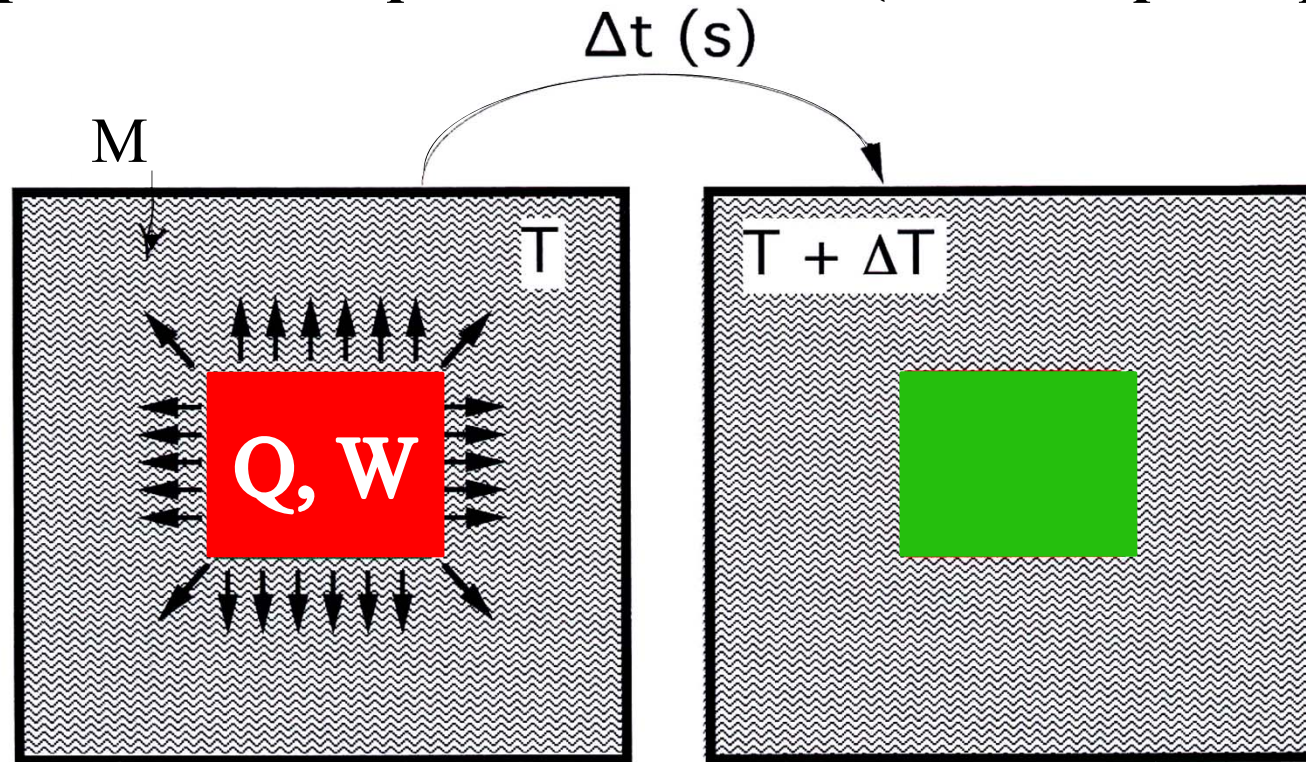
$$(W) \quad (kg \cdot s^{-1}) (J \cdot kg^{-1})$$



pour chaque fluide

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

Capacité calorifique C 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

R : quand C est considérée à pression constante $\Rightarrow C_p$ (J/kg.K)

Table de propriétés des cryo-fluides

$T_{éb}$ →

L_v →

Δh →

C_p →

Rappels :
 p normale =
 pression dans les
 conditions
 normales soit 1
 atm = 1,013.10⁵ Pa

T normale =
 273,15 K
 (0° C)

Propriétés de quelques fluides		He3	He4	H2	D2	Ne	N2	O2	Ar	CH4	H2O
Température d' ébullition à p normale (1.013 .10 ⁵ Pa) (K) – Téb -		3.2	4.2	20.4	23.6	27.1	77.3	90.2	87.3	111.7	373.15
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 ⁵ 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)		8.2	21	452	305	86	199	213	157	510	2250
Enthalpie sensible entre Téb et 300 K (kJ/kg)		2080	1550	3800	2048	280	233	193	112	402	
Taux d' évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure		0.14	0.7	9.0	13.6	29	45	68	61	60	624
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 ³)		59	125	71	161	1210	810	1140	1400	425	998
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m ³)		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 ³)		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	80

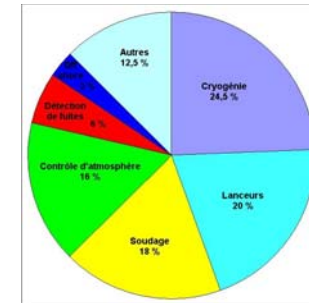
Table de propriétés des cryo-fluides

Propriétés de quelques fluides		He3	He4	H2	D2	Ne	N2	O2	Ar	CH4	H2O
Température d'ébullition à p normale (1.013 .10 ⁵ 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	24.50	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 ⁵ 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	700 l.l ⁻¹	70.0	125	135	646 l.l ⁻¹	798	784	595	
	à T et p normale (l)	455	21 J.g ⁻¹	885	885	1350	199 J.g ⁻¹	1713	157	510	2250
Chaleur latente L de vaporisation à Téb et p normale (kJ/kg)		8.2	1500 J.g ⁻¹	1500	1500	1500	Δh	233 J.g ⁻¹	112	402	
Enthalpie sensible entre Téb et 300 K (kJ/kg)		20	0,7 W.l ⁻¹ .h ⁻¹	20	20	20	« Lv »	45 W.l ⁻¹ .h ⁻¹	61	60	624
Taux d'évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure		0.1	5,20 J.g ⁻¹ .K ⁻¹	0.1	0.1	0.1	Cp	1,04 J.g ⁻¹ .K ⁻¹	0.52	2.19	1.842 (à 100° C)
Capacité calorifique à pression constante (kJ/kg.K) à 0° C et 1 bar		-	-	-	< 40	8	9	8	8	8.7	22
Conductivité thermique du gaz à Téb (mW/m.K)		-	152	181	137	50	26	27	18	31	
Conductivité thermique du gaz à p normale et 300 K (mW/m.K)		59	125	71	161	1210	810	1140	1400	425	998
Masse volumique du liquide à p normale (kg/m ³)		24	17	1.3	2.3	9.5	4.5	4.4	5.8	1.7	0.77
Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m ³)		0.13	0.18	0.09	0.18	0.9	1.25	1.43	1.8	0.55	
Masse volumique du gaz à p et T normales (kg/m ³)		2	3.6	13	16.2	125	160	190	260	120	278
Viscosité du liquide à Téb (μPa.s)		1.2	1	1	1.5	4.5	5	7	8	4.4	12.5
Viscosité du gaz à Téb (μPa.s)		-	20	9	13	30	17	20	22	11	-
Viscosité du gaz à Tambiante (μPa.s)		-	1.05	1.23	1.27	1.19	1.44	1.48	1.54	1.68	80
Permittivité du liquide		-	1.05	1.23	1.27	1.19	1.44	1.48	1.54	1.68	80

Rappels :
 p normale =
 pression dans les
 conditions
 normales soit 1
 atm = 1,013.10⁵ Pa

T normale =
 273,15 K
 (0° C)

Le marché des cryo-fluides



Utilisation de l'He (2000)

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 4 € à 16 €/litre selon quantité et disponibilité)
- Ressource fossile provenant des gisements 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 (H₂), deutérium (HD et D₂ : 1 neutron en plus par noyau), tritium (T ou 3H: 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 O₂ de l'air lors d'évaporation d'azote liquide. (teneur O₂ < 17 % = début de risque majeur).

L' oxygène : (0,21 dans l'air)

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

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

Utilisé dans les calorimètres de détecteur

Coût assez élevé (≈ 8 €/litre)

Le krypton : ($1,1 \cdot 10^{-6}$ dans l'air)

Utilisé dans les calorimètres de détecteur

Les propriétés des cryo-fluides

Les programmes numériques :

Cryodata Inc.

GASPAK: Calcule 28 propriétés thermophysiques de 36 fluides différents ayant des points d'ébullition normaux de 4 K à température ambiante. Les propriétés sont calculées pour des températures allant du point triple à la limite supérieure de données disponibles pour ce fluide (plage de 400 à 5000 K), et pour des pressions jusqu'à environ 100 bars (limite différente pour chaque fluide). Copyright par Robert McCarty. (DOS, **XLA**, sources)

HEPAK: Calcule 33 propriétés thermophysiques, y compris des paramètres de superfluide, de l'hélium-4 de 0,8 K à 5000 K. À venir en 2005: propriétés de l'hélium-4 étendues jusqu'à zéro K et mises à jour tout au long de la gamme de liquide comprimé. Nouveau code: propriétés de l'hélium-3 de 0,005 K à 300 K. Copyright par Vincent Arp. (DOS, **XLA**, sources)

Revendu par CRYOFORUM en France

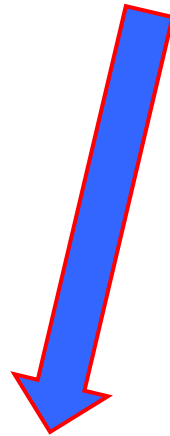
Site WEB du National Institute Of Standards and Technology (Boulder/USA)

Les propriétés thermodynamiques précises sont disponibles pour plusieurs fluides

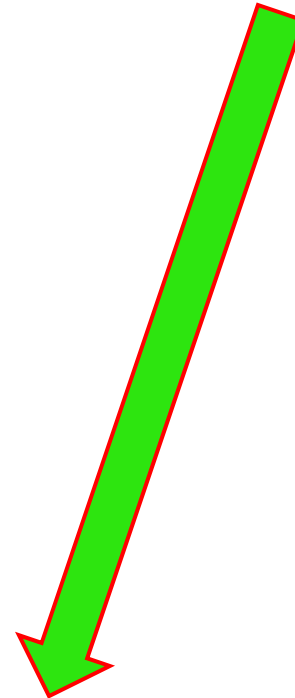
<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

Obtention d'un liquide cryogénique ou de très basses températures :

Les **liquéfacteurs/réfrigérateurs** et les **cryo-réfrigérateurs**



Forte puissance nécessaire à
froid
*Quelques
dizaines/centaines de l/h
Quelques
dizaines/centaines de watts*

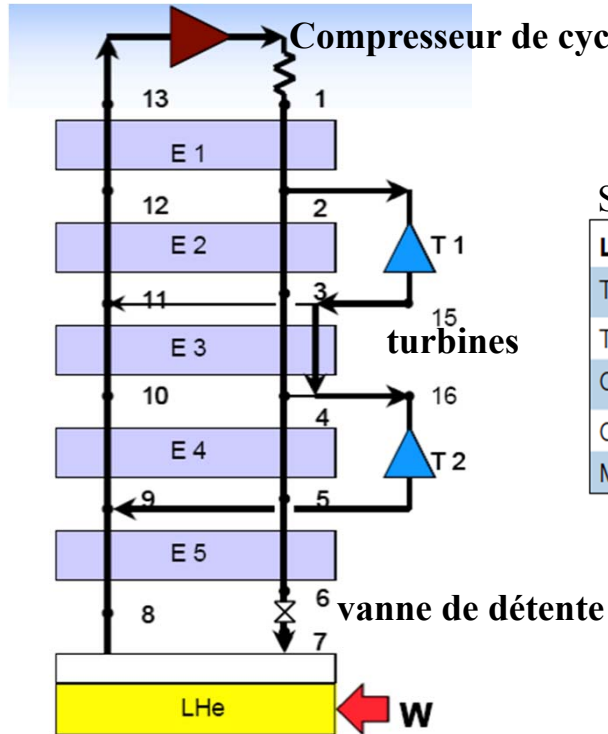


Faible puissance
nécessaire à froid
*Quelques l/h
Quelques watts*

**Approvisionnement
par industriel
« gazier »:**
*Air Liquide, Messer,
Linde, Air Products*

Exemples de machines hélium: petits liquéfacteurs/réfrigérateurs

qq dizaines à qq centaines de W @ 4.5 K: 1 à 2 détendeurs (turbines) + 1 vanne JT



Sources commerciales Air Liquide

Liquefaction capacities	HELIAL SL	HELIAL ML	HELIAL LL
Throughput without nitrogen pre-cooling	15 to 25 L/hr	35 to 70 L/hr	110 to 145 L/hr
Throughput with nitrogen pre-cooling	30 to 50 L/hr	75 to 150 L/hr	215 to 330 L/hr
Consumption of liquid nitrogen	< 25 L/hr	< 60 L/hr	< 125 L/hr
Consumption of electricity	45 to 55 kW	75 to 132 kW	160 to 250 kW
Maximum efficiency	1 kWhr/L	0.9 kWhr/L	0.75 kWhr/L

Sources commerciales Linde Kryotechnik

	Without LN ₂ precooling	With LN ₂ precooling
L70	20 - 35 l/h	40 - 70 l/h
L140	45 - 70 l/h	90 - 140 l/h
L280	100 - 145 l/h	200 - 290 l/h
LR70	100 - 145 Watt	130 - 190 Watt
LR140	210 - 290 Watt	255 - 400 Watt
LR280	445 - 640 Watt	560 - 900 Watt

Coefficient de performance

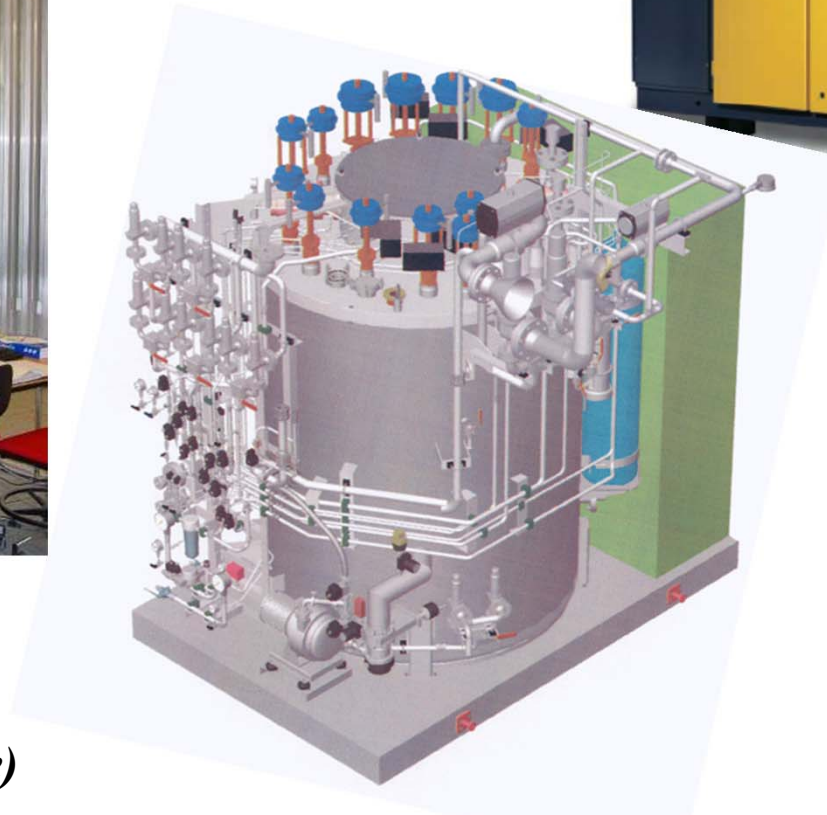
$$COP = \frac{\text{Watts électriques nécessaires à la prise}}{\text{Watts absorbés à froid}}$$

COP
> 500 W/W

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



*Boîte froide
Hélial 2000
(500 W ou 150 l.h⁻¹LHe)*



Boîte froide Hélial 2000

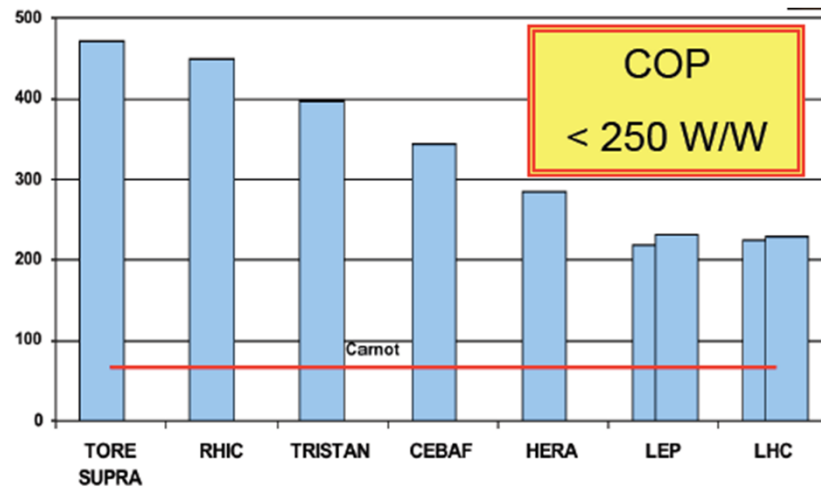
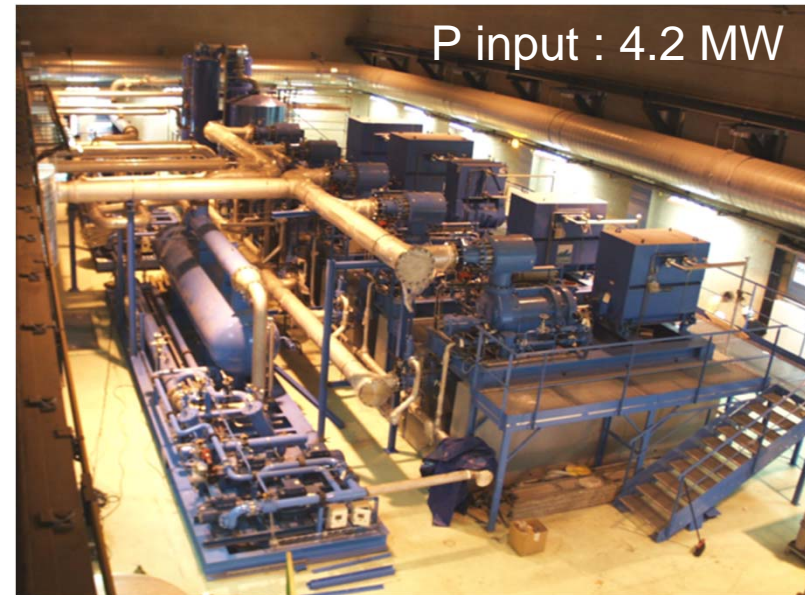


*Compresseur
(15 bars 290 KW -69 g/s)*

Exemples de « gros » réfrigérateurs ou liquéfacteurs hélium

18 kW @ 4.5 K

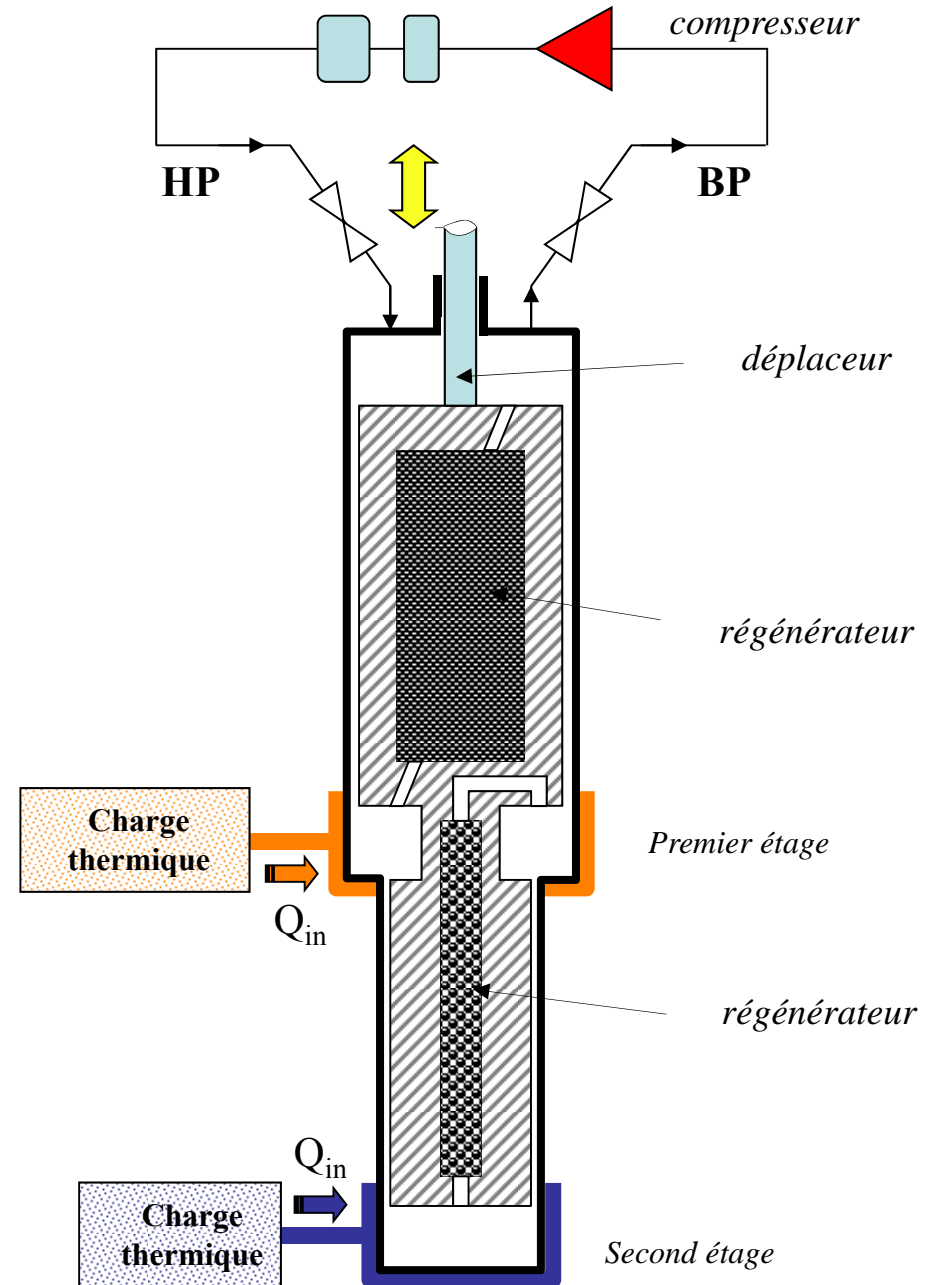
33 kW @ 50 K to 75 K - 23 kW @ 4.6 K to 20 K - 41 g/s liquéfaction



CRYOGENERATEUR : Exemple de la Machine GIFFORD-Mac MAHON

- 1 groupe de compression
- 1 seul jeu de vanne HP/BP
- 1 seul déplaceur
- 2 niveaux de températures froides
- 2 régénérateurs solidaires

COP (4K)
> 4000 W/W

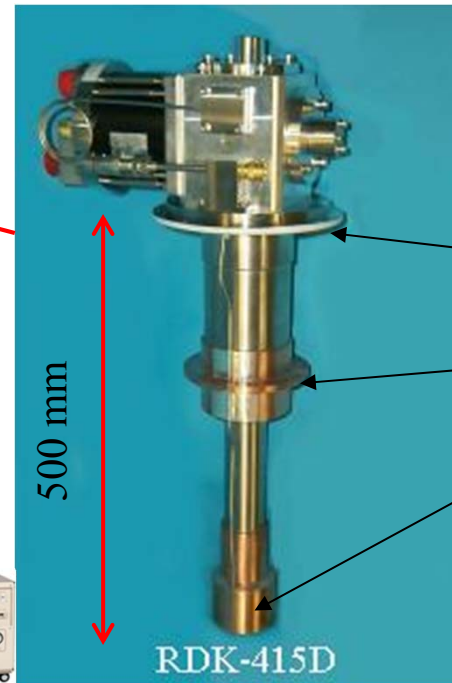


CRYOGENERATEUR :

Exemple d'utilisation de Machines GIFFORD-Mac MAHON



x 3



*Cryogénérateur
(2 étages)*

Ex :
300 K (T_{amb})

35 W à 50 K
et
1,5 W à 4.2 K

Tête Froide

Cyclotron supraconducteur à PSI utilisant plusieurs Têtes Froides vers 4 K

Doct SUMITOMO

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 – 4 avril 1911)**
- **théoriquement**
(des similitudes avec la superfluidité de l'hélium)
- **dans la mise en œuvre (basses températures)**

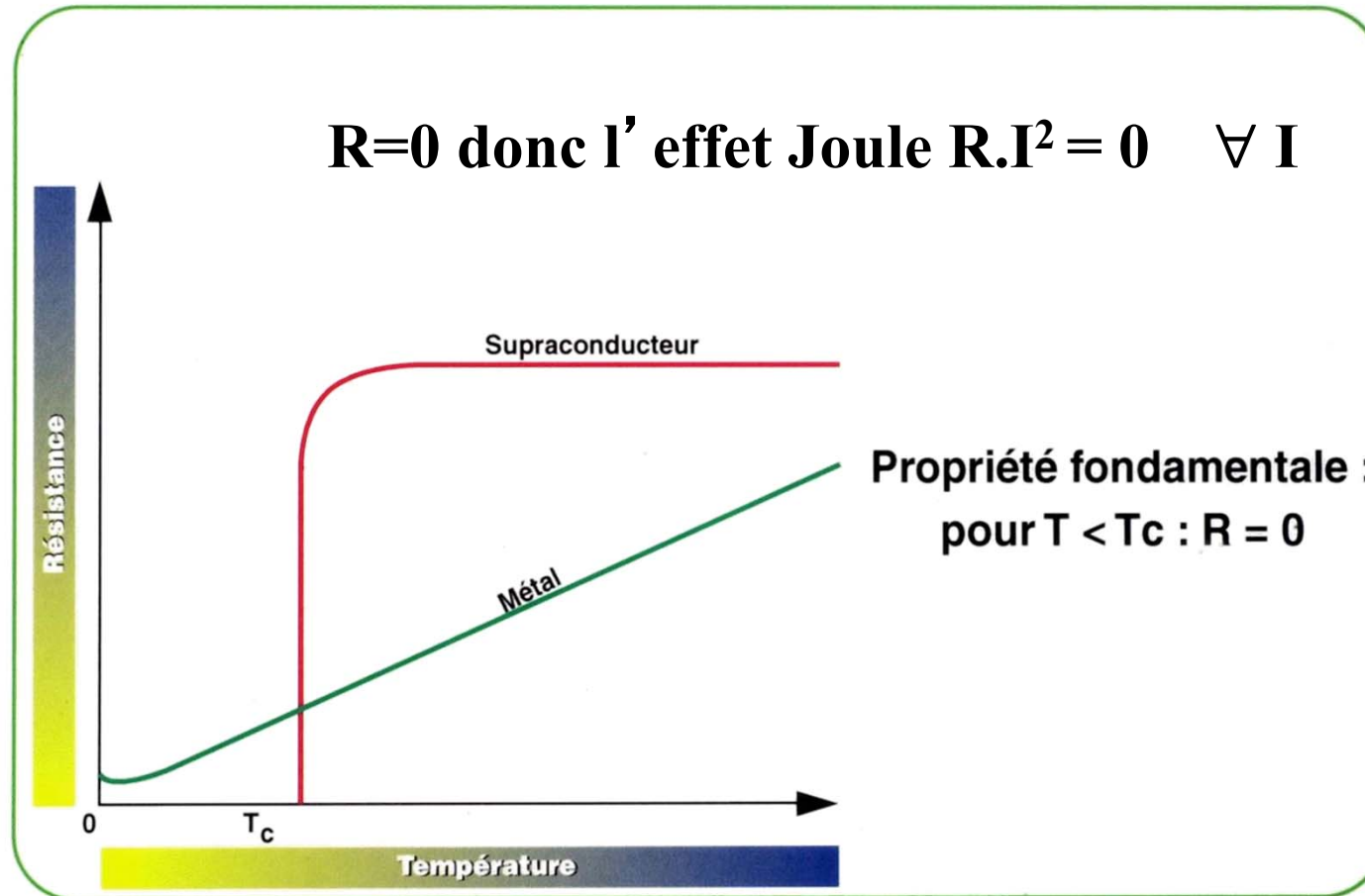
Indispensable pour la fabrication des grands accélérateurs

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

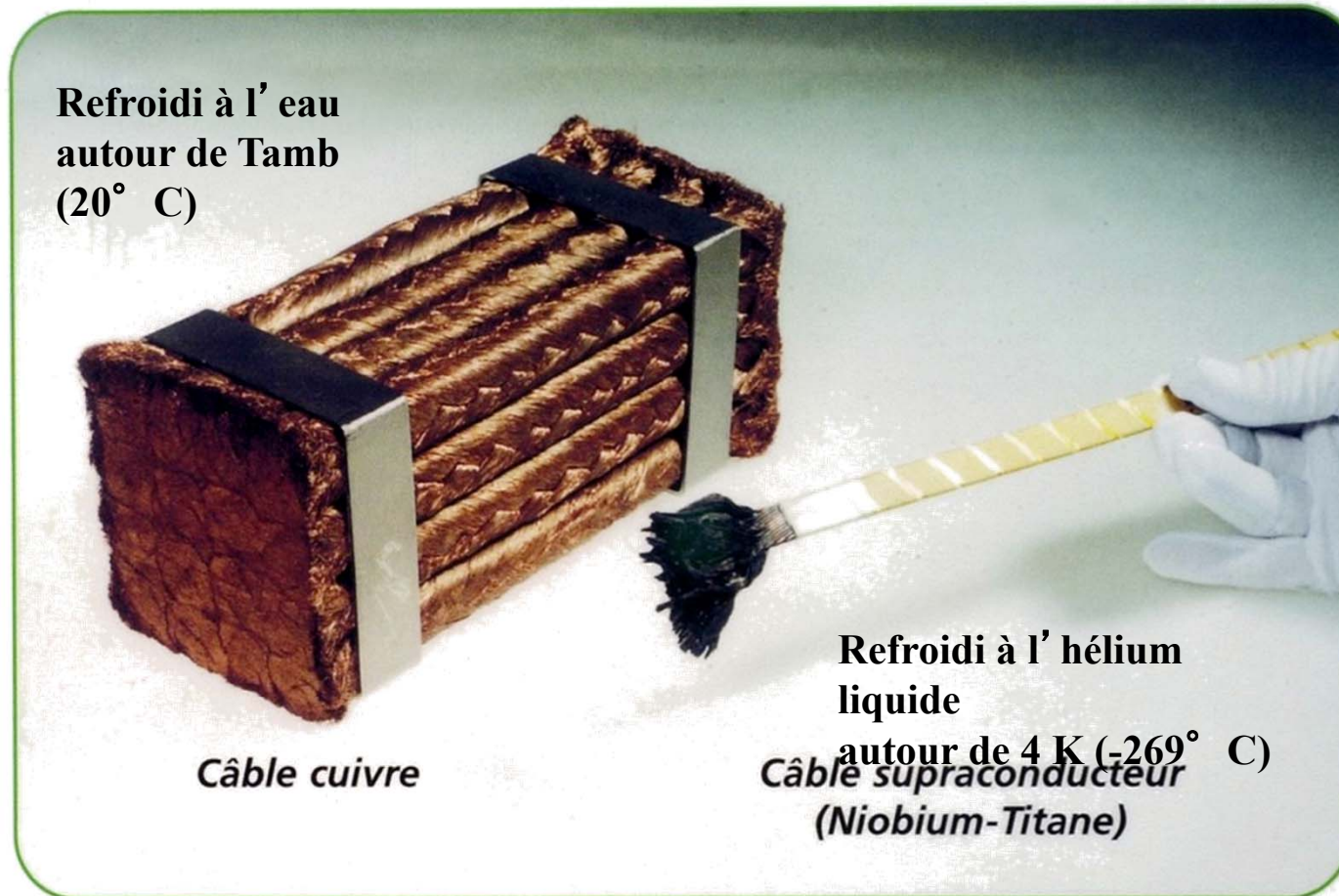
Utilisation en :

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

La supraconductivité

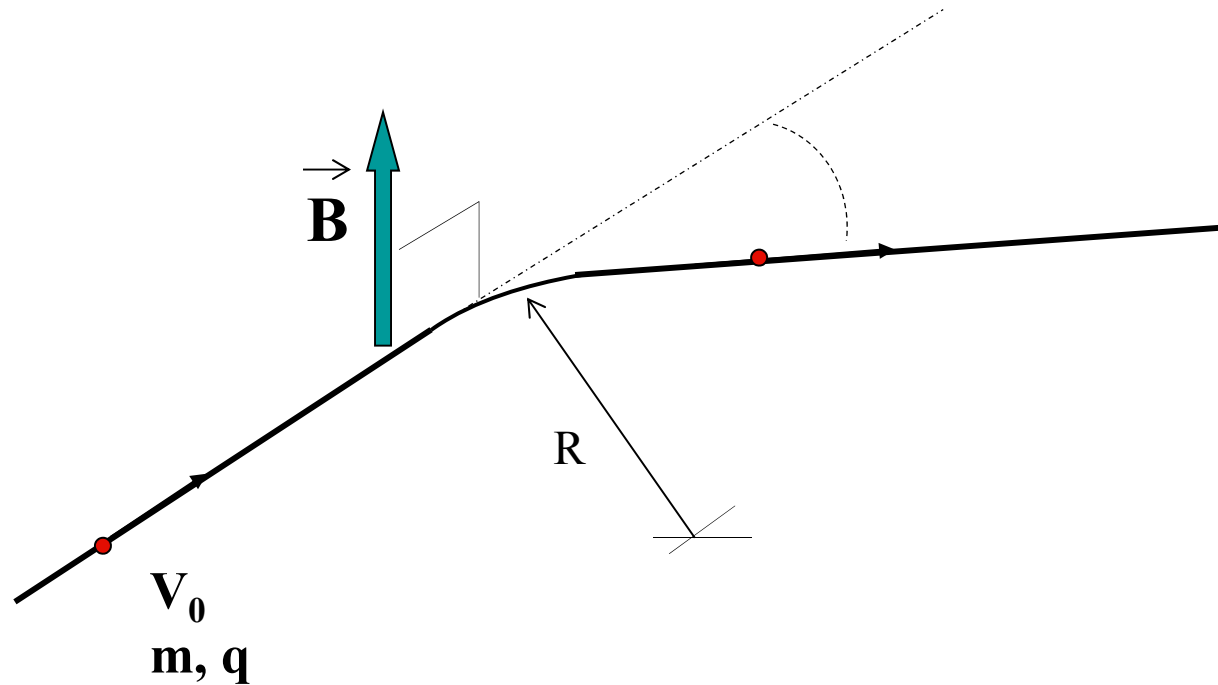


La supraconductivité = réduction de taille



Ces deux câbles peuvent transporter 15 000 ampères

La supraconductivité pour électro-aimants fort champ magnétique pour particule de forte énergie



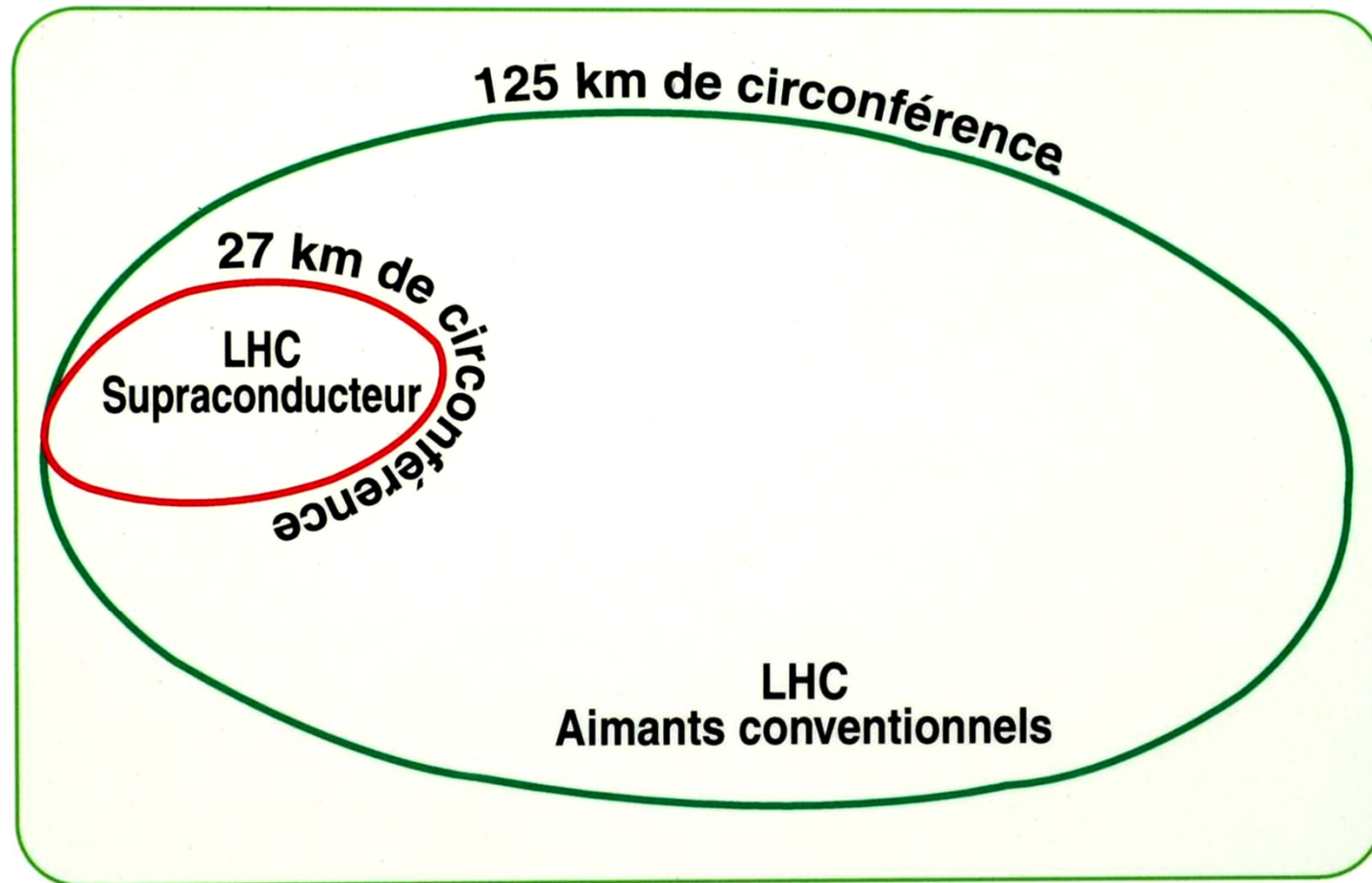
Déviation d'une particule chargée (q), de masse m , dans un champ magnétique B orthogonale à sa trajectoire

rayon de courbure,

$$R = \frac{m \cdot V_0}{q \cdot B}$$

Application : dipôle magnétique de déviation

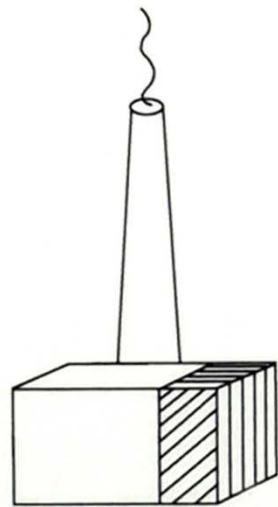
**La supraconductivité =
très fort champ magnétique = x 5 / aimants chauds**



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

LHC avec
aimants supraconducteurs

40 MW



LHC avec
aimants conventionnels

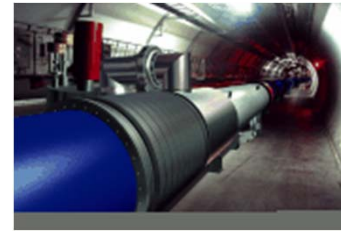
4000 MW

4,5 Tranches de 900 MW

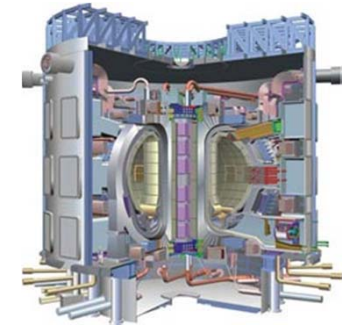


La supraconductivité et la physique (quelques exemples)

Puissance à froid
(Watts à T°
nominale)



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



ITER (2020)
70 kW à 4 K



HERA (1990)
20kW à 4,5 K



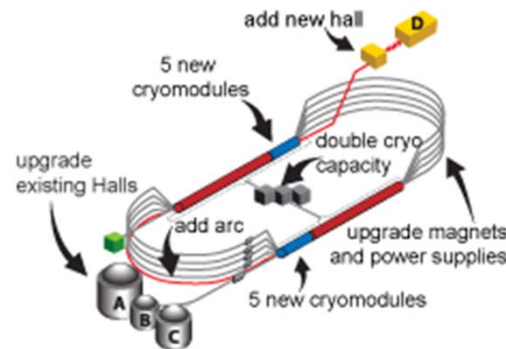
ATLAS (1,5 KW à 4,5 K)



CMS (800 W à 4,5 K)
(2006)



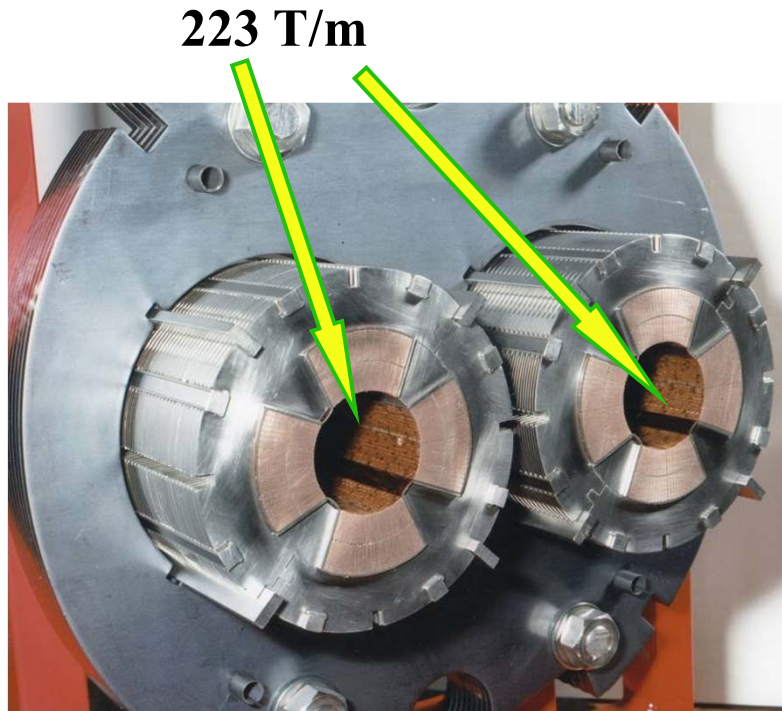
TORE SUPRA (1985)
300W à 1,8 K



CEBAF (1995)
5 kW à 1,8 K

Temps

Aimants supraconducteurs pour faisceau et détecteur



223 T/m

Quadrupôles LHC - 2003

Ø 6m

4T



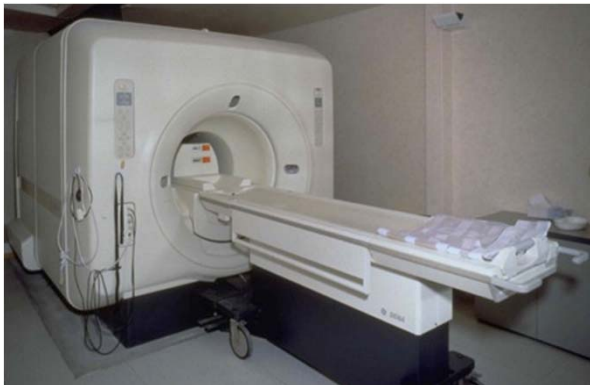
Solénoïde CMS - LHC - 2006

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

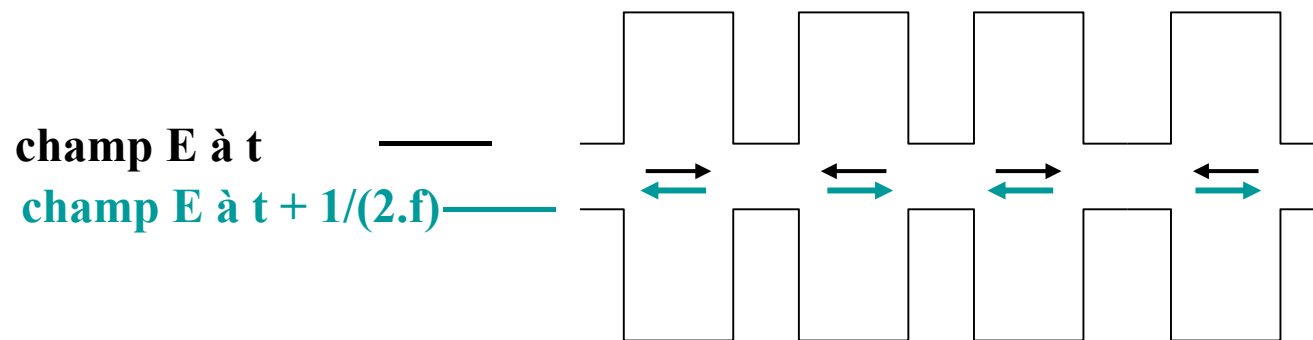
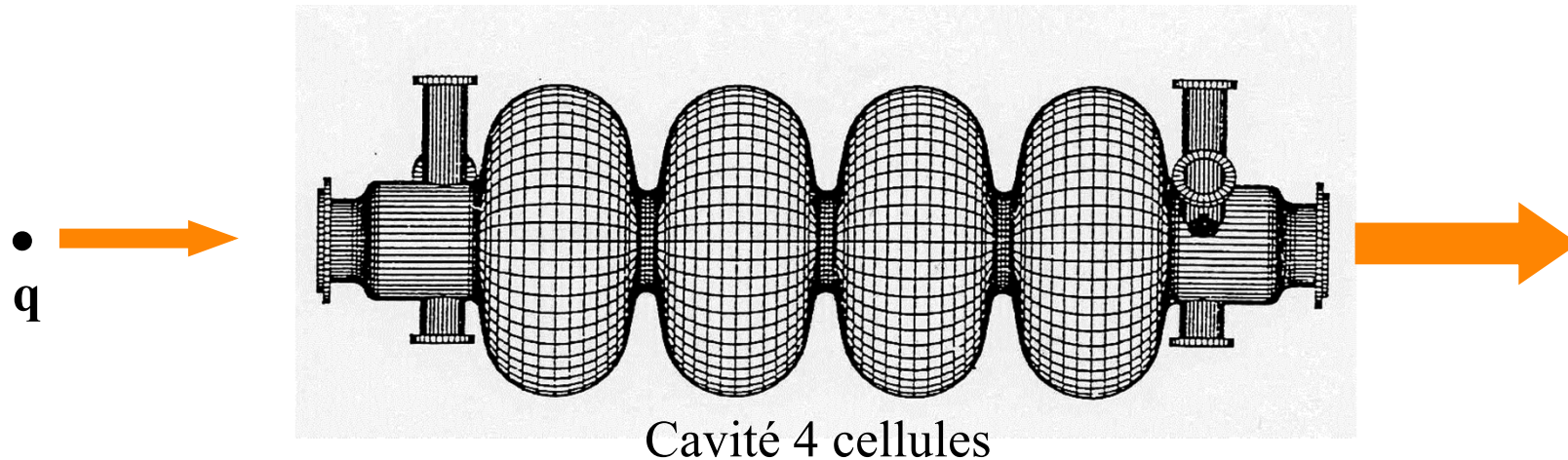


Aimant 7T du CMRR (USA) Aimant 11,7T Neurospin (F)



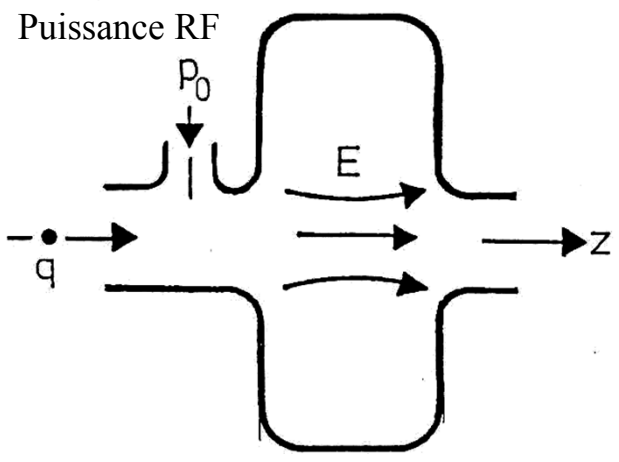
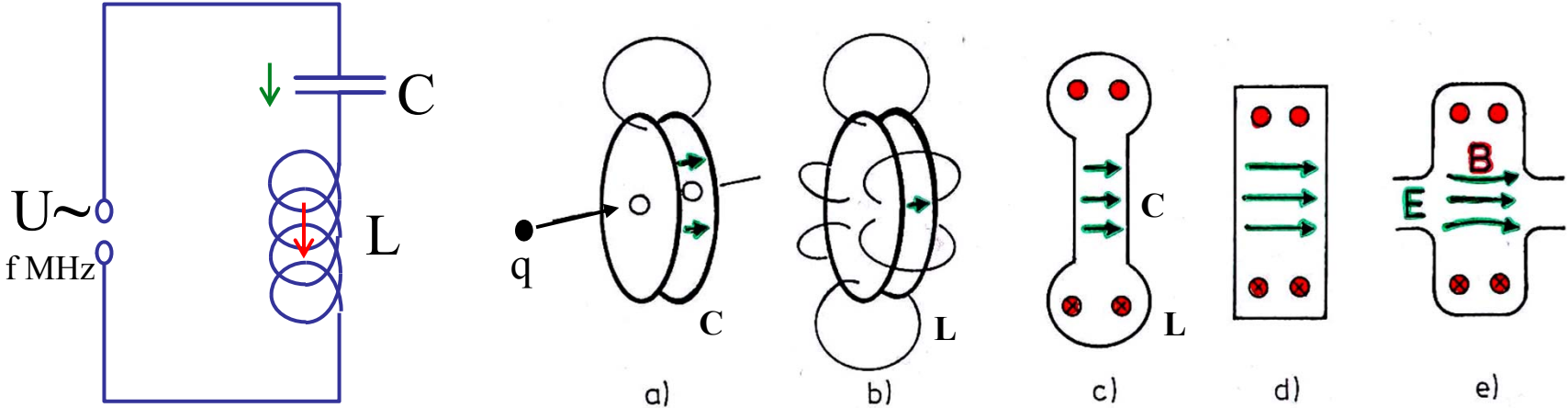
1 tesla = 10 000 gauss – Champ magnétique terrestre à Paris = 0,5 gauss ...

La supraconductivité et les accélérateurs : 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

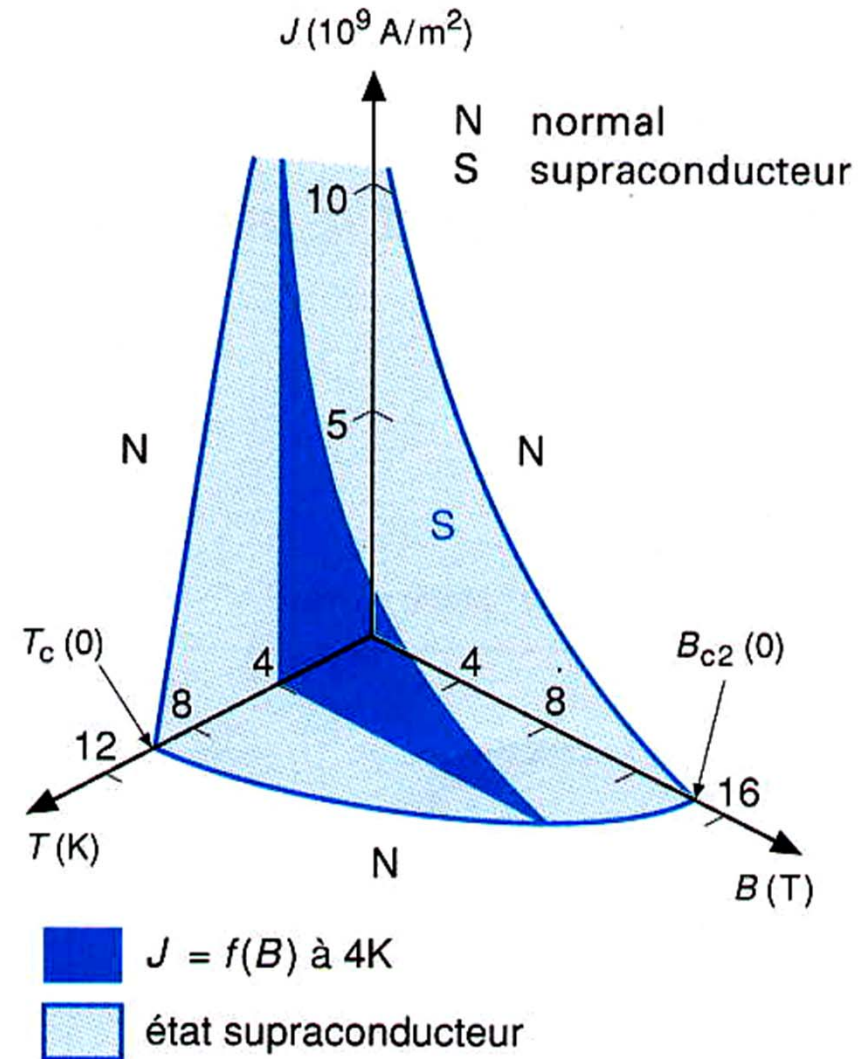
La supraconductivité et ses limites

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/mm²

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

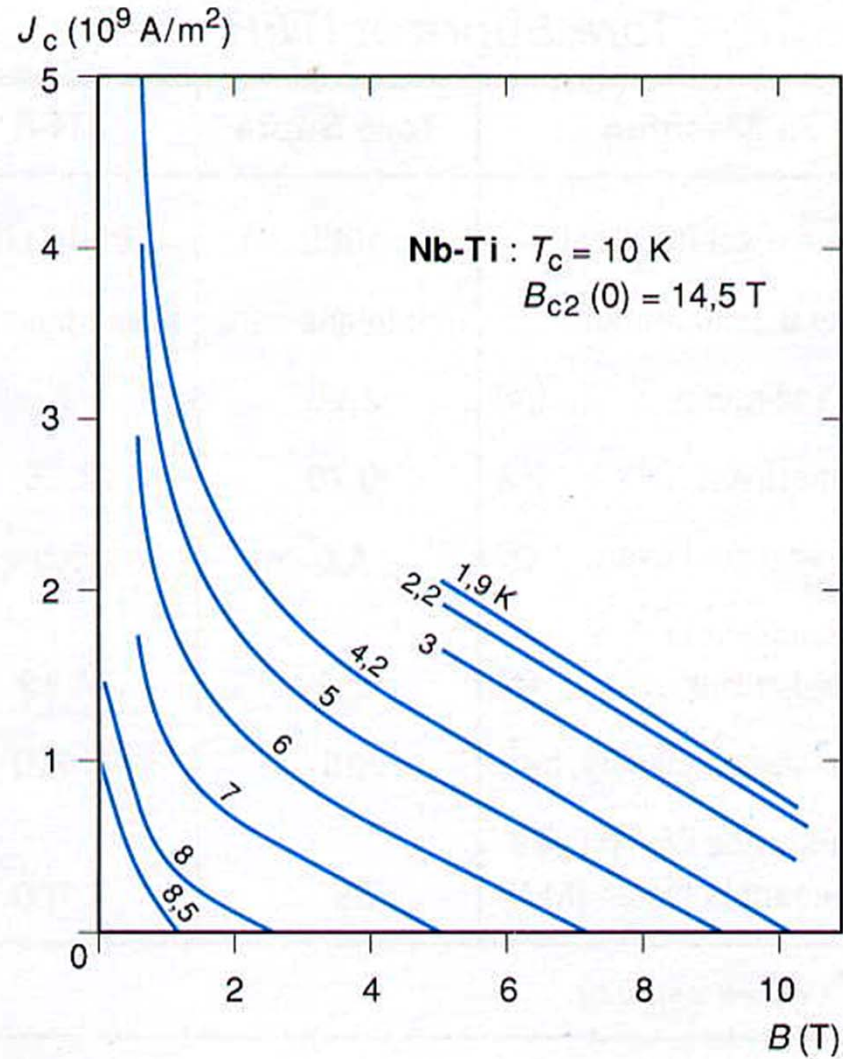
- $R = 0$ à l'intérieur de ce domaine
- $B_c(T) = B_c(0) \cdot [1 - (T/T_c)^2]$



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 ₃	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	$\mu_0 H_{c2}$ T $\left. \begin{array}{l} 0,3 \\ 11 \\ 20,1 \\ 35 \\ 50 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{à } 0 \text{ K} \\ \text{à } 4,2 \text{ K} \\ \text{à } 4,2 \text{ K} \\ \text{à } 4,2 \text{ K} \\ \text{à } 4,2 \text{ K} \end{array}$
		NbTi	10	
		Nb ₃ Sn	18	
		Nb ₃ Ge	23	
		PbMo ₆ S ₈	15	
	Organiques	(TMTSF) ₂ PF ₆	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) ₂ I ₃	$\left\{ \begin{array}{l} 3,6 \text{ à } p_0 (3) \\ 8,1 \text{ (sous 1 kbar)} \end{array} \right.$	
	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 ₃		30		

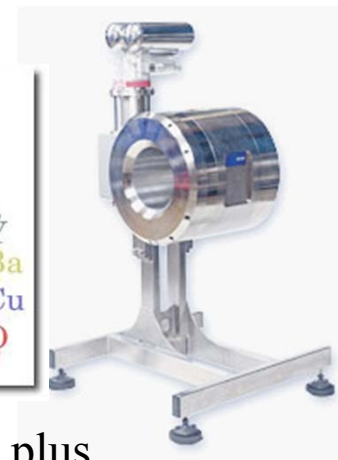
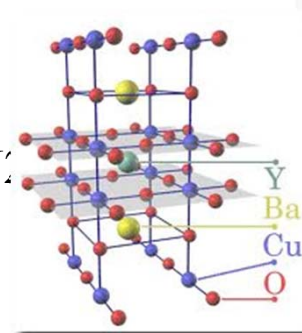
- Métaux purs = type I : bas T_c et très bas B_c (Pb et Nb pour cavités)
- Alliages métalliques = type II : très utilisés (NbTi, Nb₃Sn) aimants et cavités
- «Céramiques isolantes» = type II : en développement (électro[tech]nique...)

Développements actuels

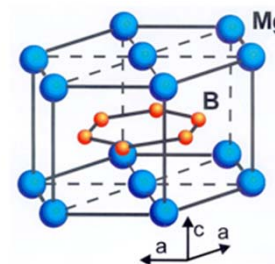
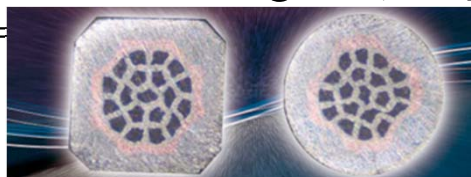
- Supras « métalliques » classiques Bas Tc :
 - Aimants de grand volume pour la physique ou l'Imagerie médicale IRM (NbTi)
 - Aimants à très haut champ (Nb₃Sn – upgrade du LHC)
 - Cavités RF à fort gradient (Nb ou Nb sur Cu)
- Supras Haut Tc (« céramiques/oxydes ») : BiSrCaCuO (rubans ou fils) ou YBaCuO (rubans, dépôts)



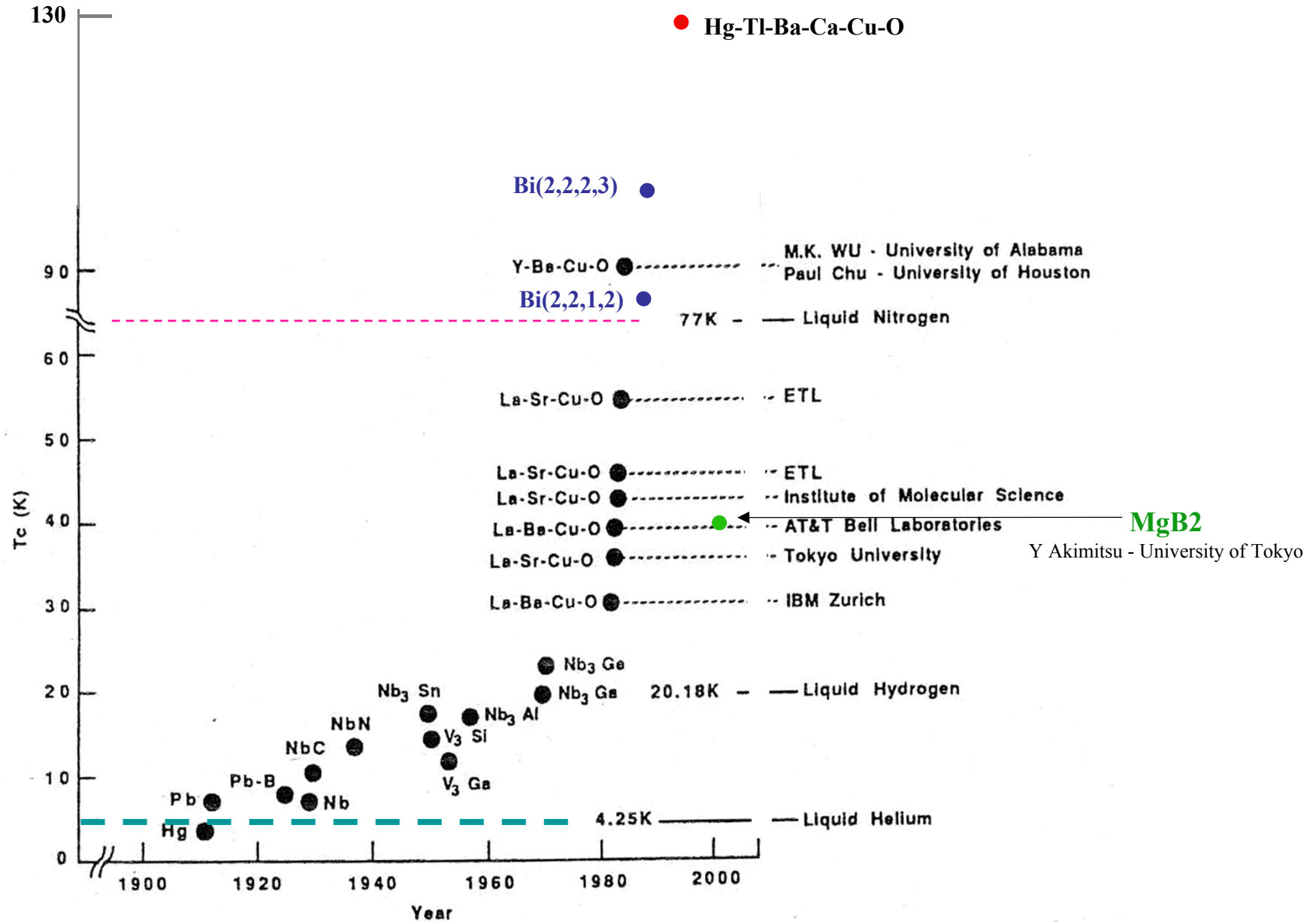
- Aimants « secs » avec cryogénérateur
- Électronique (filtre faible bande)
- Transport puissance (transfo, lignes refroidies LN₂)



- Supras à T° intermédiaire MgB₂ (composé intermétallique plus « accessible » à Tc=



Développements actuels



CRYOGENIE, VIDE, SUPRACONDUCTIVITE

Quelques références bibliographiques

Thèmes Titres
Cryogénie
Notes de Cryogénie
Éléments de Cryogénie
Cryogénie, ses applications en supraconductivité
Helium Cryogenics
Cryogenic Process Engineering
Cryogenic Systems
Experimental Techniques in Low Temperature
Physics
Cryogenics (revue mensuelle)
Handbook of cryogenic engineering
Cryogenic Engineering

Thermique

Initiation aux Transferts Thermiques
Éléments d'Échanges Thermiques
Heat Transfer
Heat Transfer at Low Temperatures

Supraconductivité

Introduction to Superconductivity
Superconducting Magnets
Superconductivity in Particle Accelerators
La Supraconductivité

Matériaux et Gaz

Materials at Low Temperature
Data Series on Material Properties
Encyclopédie des Gaz

Vide

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
Institut International du Froid	Techniques de l'Ingénieur	F
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
J.G. WEISEND II	Heinemann Elsevier	A
T. FLYNN	Taylor and Francis	A
	Marcel Dekker MDI	A
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