



INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE (INPL)
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉOLOGIE (ENSG)
CENTRE DE RECHERCHE SUR LA VALORISATION
DES MINÉRAIS (CRVM)
B.P. 40 – 54501 VANDOEUVRE LES NANCY Cedex

document public

application des nouveaux matériaux supraconducteurs à la séparation magnétique à très haut champ

F. Clin
G. Gillet

avec la collaboration
CGE ALSTHOM (Ets BELFORT)

août 1990
R 31 655

compte rendu de fin d'étude d'une recherche financée
par le Ministère de la Recherche de la Technologie

décision d'aide n° 87 A 05 88 – 87 A 05 89

BRGM
DIRECTION DES ACTIVITÉS MINIÈRES
Département Minéralurgie
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

FICHE SIGNALETIQUE ADMINISTRATIVE

Numéro de la décision d'aide : 87.A.0588 et 87 A 0589

Objet de la décision : Application des nouveaux matériaux supraconducteurs à la séparation magnétique à très haut champ : possibilité d'utilisation des céramiques et essais de traitement.

Nom des responsables scientifiques :

- Monsieur F. CLIN (coordinateur général)
- Monsieur G. GILLET

Téléphone : 38.64.34.34 (BRGM) - 83.50.30.30 (ENSG-CRVM)

Adresse des laboratoires :

BRGM - Département de Minéralurgie - BP 6009
45060 ORLEANS CEDEX

ENS GEOLOGIE - CRVM - BP 40
54501 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX

Objectifs visés à l'origine :

- Analyses des possibilités de mises en oeuvre de céramiques supraconductrices (matériaux à haute température critique),
- Réalisation d'essais de séparation et évaluation de données technico-économiques de la technique.

Ces objectifs ont-ils été atteints ? Sinon, pourquoi ? EN PARTIE

Les matériaux supraconducteur haute température, n'existent pas encore industriellement.

D'autres objectifs que ceux visés à l'origine ont-ils été atteints ?

Lesquels ? NON

Le compte-rendu a-t-il un caractère confidentiel ? NON

Si oui, pendant combien de temps ?

Des brevets ont-ils été pris à l'occasion de la recherche ? : NON

Conclusion générale sur la recherche :

Dans le cas de séparation magnétique d'ultrafines particules, les appareils supraconducteurs s'imposent du fait de leur haut champ et des avantages techniques et économiques qu'ils procurent. Les supraconducteurs chauds (céramiques, hautes intensités critiques) pourraient révolutionner les domaines de l'électrotechnique dans les années à venir, quand les mécanismes physiques qui expliquent l'apparition des propriétés supraconductrices seront mieux connues et que les techniques de mises en forme de ces matériaux seront maîtrisées. Pour l'instant, ces matériaux n'existent pas industriellement parlant et ne sont donc pas compétitifs vis à vis des supraconducteurs froids (Nb-Ti).

FICHE BIBLIOGRAPHIQUE

Numéro de la décision d'aide : 87.A.05.88 et 87.A.05.89

Objet de la décision : Application des nouveaux matériaux supraconducteurs à séparation magnétique à très haut champ : possibilité d'utilisation des céramiques et essais de traitement.

Auteurs : François CLIN (BRGM) et Gérard GILLET (ENSG-CRVM)

Titre : Application des nouveaux matériaux supraconducteurs à la séparation magnétique à très haut champ.

Organismes bénéficiaires : BRGM - Département Minéralurgie (ORLEANS)
INPL - ENS GEOLOGIE - CRVM (NANCY)

Date de rédaction du Compte Rendu de fin d'Etude : Août 1990.

**BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (BRGM)
DEPARTEMENT MINERALURGIE**

AVENUE DE CONCYR - B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE (INPL)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE GEOLOGIE (ENSG)

CENTRE DE RECHERCHE SUR LA VALORISATION DES MINERAIS (CRVM)

B.P. 40 - 54501 VANDOEUVRE LES NANCY CEDEX

François CLIN - Gérard GILLET

Avec la collaboration de CGE ALSTHOM (Ets BELFORT)

APPLICATION DES NOUVEAUX MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

A LA SEPARATION MAGNETIQUE A TRES HAUT CHAMP

Août 1990

**Compte rendu de fin d'étude d'une
recherche financée par le Ministère
de la Recherche et de la Technologie**

**Décisions d'aide n° 87 A 05 88
n° 87 A 05 89**

RESUME SIGNALETIQUE

Mots-clés : Matériaux supraconducteurs - Haute température critique
- Séparation magnétique haut champ - Dispositif supraconducteur

Pour assurer la séparation de particules sous haut gradient et haut champ, il est nécessaire d'atteindre des densités de force magnétique de l'ordre de 10^{11} N/m³.

L'utilisation de supraconducteurs s'impose alors. Si celle des supraconducteurs Nb Ti refroidis à 4,2 K est bien maîtrisée, il n'en est pas de même pour les céramiques (essentiellement à base de Cu et Terres Rares), qui, si elles présentent des températures critiques nettement plus élevées, sont difficiles à envisager utilisables à court terme compte tenu de leurs autres propriétés électromagnétiques et leurs difficultés de mise en oeuvre dans un dispositif d'aimantation.

La séparation magnétique haut gradient et haut champ demeure toutefois une technique très prometteuse (pour l'instant grâce aux supraconducteurs froids) notamment dans les domaines de l'épuration des minéraux industriels, la récupération des métaux, la dépollution des effluents.

TABLE DES MATIERES

RESUME

I - INTRODUCTION

II- LA TECHNOLOGIE DE LA SEPARATION MAGNETIQUE

II-1 INTRODUCTION

II-2 BASES THEORIQUES ET FORCE MAGNETIQUE

II-3 TECHNIQUES DE SEPARATION

II-3-1 SEPARATION MAGNETIQUE BASSE INTENSITE

II-3-2 SEPARATION MAGNETIQUE HAUTE INTENSITE

II-3-3 SEPARATEUR MAGNETIQUE HAUT CHAMP A AIMANTS PERMANENTS

II-3-4 SEPARATION MAGNETIQUE A HAUT GRADIENT ET HAUT CHAMP

III- LES SUPRACONDUCTEURS INDUSTRIELS ET LEURS PERSPECTIVES

III-1 LA SUPRACONDUCTIVITE

III-1-1 RAPPELS ET DEFINITIONS THEORIQUES

III-1-2 LES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS

III-1-3 FABRICATION DE FILS SUPRACONDUCTEURS ET APPLICATIONS
INDUSTRIELLES

III-1-4 REFRIGERATION

III-2 EVOLUTION DE LA SUPRACONDUCTIVITE : LES MATERIAUX A HAUTE
TEMPERATURE CRITIQUE

III-2-1 DEVELOPPEMENT EN COURS SUR LES MATERIAUX

III-2-2 PHASES DE CHEVREL

III-2-3 MATERIAUX A HAUTE TEMPERATURE CRITIQUE

IV - MONTAGE EXPERIMENTAL D'UNE BOBINE DE TRI A AIMANT
SUPRACONDUCTEUR D'APPLICATION

IV-1 REALISATION D'UN DISPOSITIF DE SEPARATION

IV-1-1 POURQUOI UTILISER DES SUPRACONDUCTEURS FROIDS ?

IV-1-2 PROBLEMES POSES PAR L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS FROIDS

IV-1-3-APPLICATION INDUSTRIEL

IV-1-4-SEPARATEUR A HAUT GRADIENT A AIMANT SUPRACONDUCTEUR

IV-2 SEPARATION A HAUT GRADIENT DE CHAMP ET EXEMPLES DE TRAITEMENT

IV-2-1 SEPARATION MAGNETIQUE A HAUT GRADIENT - HAUT CHAMP

IV-2-2 EXEMPLES DE TRAITEMENT

A - EPURATION DE MINERAUX INDUSTRIELS

B - RECUPERATION - RECYCLAGE

V - CONCLUSIONS GENERALES

VI- ANNEXES :DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES MONTAGES EXPERIMENTAUX SUPRACONDUCTEURS.

RESUME

Mots-Clés : Matériaux supraconducteurs - haute température critique - séparation magnétique haut champ - dispositif supraconducteur.

Dans le cas de la séparation Haut Gradient - Haut Champ, il est admis que pour dépasser des densités de force magnétique de l'ordre de 10^{11} N/m³, les supraconducteurs s'imposent. L'intensité du champ et le fort gradient sont nécessaires pour séparer de façon efficace les particules ultrafines et peu magnétiques. Un aimant supraconducteur génère un fort champ magnétique non réduit par la saturation du fer. Ceci procure des avantages dans certains cas :

- Possibilité de séparer des particules de petites dimensions et faiblement magnétiques, ce qui n'est pas possible avec des aimants classiques.

- Elargissement des secteurs d'utilisation de la méthode.

- Le débit peut être augmenté à travers une matrice donnée par élévation de H

- Réduction du poids et de l'encombrement des appareils.

- Remplacement de schémas de traitements complexes et onéreux.

L'utilisation des supraconducteurs NbTi à 4,2 K est bien maîtrisée. Le problème n'est pas technique, mais économique. Dans certains cas, cette séparation peut s'imposer comme étant la seule efficace, comme par exemple dans la protection de l'environnement ou du recyclage (désulfuration des charbons, traitement des eaux ou d'effluents industriels, recyclage des métaux) où bien encore pour l'obtention de produits parfaitement épurés (élimination des contaminants, Fe ou Ti dans des Kaolins, silices, sables, feldspaths...).

La synthèse de céramiques supraconductrices a sans doute été l'un des éléments majeurs de ces trois dernières années. Ces matériaux ont fait passer en trois mois la température à laquelle apparaît l'effet supraconducteur de 23 K à 98 K, permettant ainsi d'envisager des perspectives d'applications impensables encore, il y a quelques années.

Il est hélas assez fréquent de voir au niveau des revues d'information scientifique destinées au grand public le montage en épingle de certains dossiers dont la réalité est en fait bien mince.

Il ne semble pas que ce soit là le cas pour les supraconducteurs, compte tenu des progrès majeurs que viennent d'apporter les céramiques dans ce domaine.

Il en résultera à coup sûr et à échéance proche, l'utilisation de ces matériaux dans plusieurs secteurs, le premier étant probablement la microélectronique.

Actuellement, deux types de matières premières sont concernées au premier plan par ces céramiques : le cuivre et les terres rares.

Si cela ne devrait pas bouleverser le marché du cuivre, cela peut avoir une incidence considérable sur celui des terres rares mais à long terme.

Il faut toutefois être relativement prudent à ce sujet : la famille de matériaux concernés vient tout juste d'être découverte, les mécanismes physiques qui expliquent l'apparition des propriétés supraconductrices ne sont pas encore bien connus. On est donc susceptible de voir ces matériaux évoluer très rapidement sans exclure que cette évolution puisse déboucher sur des compositions ou des natures de matériaux sensiblement différentes de celles des matériaux actuels.

Pour l'instant, ces matériaux n'existent pas industriellement parlant et ne sont donc pas compétitifs vis-à-vis des supraconducteurs froids. Bien entendu, dans la mesure où des progrès importants seraient faits (niveau acceptable de densité de courant critique, facilité de mise en oeuvre...), l'avantage est évident. L'utilisation de l'azote liquide à la place de l'hélium liquide devient un élément fondamental et le coût de fonctionnement en énergie devient ridicule par rapport au cas classique sans compter le fait de pouvoir atteindre des degrés de séparation inconcevables en technologie classique.

APPLICATION DES NOUVEAUX MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS
A LA SEPARATION MAGNETIQUE A TRES HAUT CHAMP

F. CLIN* - G. GILLET** et la collaboration de CGE ALSTHOM***

* F. CLIN : BRGM Département Minéralurgie
** G. GILLET : INPL - ENSG. CRVM
*** CGE ALSTHOM : J.L. SABRIE
: C. KOLHER
: Y. LAUMOND

Décisions d'aide M.R.E.S.
n° 87.A.0588 et 0589

I - INTRODUCTION

L'industrie minière et de recyclage, utilise actuellement principalement des séparateurs magnétiques à circuits conventionnels (bobines résistives en cuivre) et à aimants permanents. Bien que l'efficacité de ces séparateurs ne soit pas contestable dans le domaine de la concentration de minéraux à forte granulométrie ($> 50 \mu\text{m}$) et à forte susceptibilité magnétique, il n'en est pas de même quand le produit à traiter est très fin ($< 10 \mu\text{m}$) et peu magnétique.

Les minéraux purifiés par les méthodes classiques sont souvent impropres à une utilisation directe dans la production de nouveaux matériaux, car les appareils utilisés ne sont pas suffisamment performants. De plus, l'emploi de ces circuits, présente certains inconvénients (saturation magnétique, colmatage dû à la rémanence du circuit, équipement lourd et encombrant, consommation électrique....).

Des études récentes ont pu montrer que les problèmes posés pouvaient alors être résolus en utilisant des systèmes supraconducteurs qui génèrent des champs magnétiques élevés ($> 5 \text{ T}$), tout en ayant des consommations électriques faibles. Les premières recherches sur des systèmes cryomagnétiques autonomes (circuit fermé d'hélium) et complètement automatisé, ont pu montrer l'intérêt de ces techniques sur le plan efficacité et économie de séparation et étendre leurs applications à des secteurs nouveaux comme par exemple les purifications de fluides divers (recyclages-environnement).

L'évolution rapide dans le domaine de la cryogénie laisse entrevoir la possibilité d'utiliser de nouveaux cryostats à circuit ouvert, mais à très faible perte d'hélium liquide.

L'installation récente sur des sites miniers d'appareils basés sur ces principes a confirmé l'intérêt technologique et économique de ces circuits (diminution du coût de fonctionnement, du poids et de l'encombrement des séparateurs).

Dernièrement, on a pris conscience de l'existence et de l'importance industrielle potentielle de la supraconductivité à l'occasion de la découverte de la possibilité d'occurrence de ce phénomène à des

températures encore "cryogéniques" mais cependant très supérieures à celles de l'hélium liquide sous pression normale (4 K). Pour mieux comprendre cette découverte, il faut la situer correctement dans l'évolution continue des connaissances en matière de supraconductivité depuis le début du siècle. Le tableau I rassemble et date quelques faits marquants de cette histoire qui peut se diviser en trois périodes principales :

1911 - 1964 : de la découverte de la supraconductivité à la première démonstration significative d'application aux électro-aimants.

1964 - 1984 : exploitation des possibilités d'application en courant continu et premières réalisations industrielles.

1984 -1990 : élargissement du domaine d'application de la supraconductivité aux courants alternatifs, aux champs magnétiques et aux températures critiques élevés.

La première période a d'abord été celle de la description phénoménologique :

a) La supraconductivité est un état physique dans lequel :

- La résistivité électrique est nulle en courant continu,

- Le champ magnétique est nul dans la phase supraconductrice du matériau. Dans certains cas, cela se traduit par un diamagnétisme parfait (matériaux de première espèce). Dans les cas les plus intéressants pour l'application, le champ pénètre le matériau sous forme de tube de flux au coeur desquels il n'y a pas supraconductivité (matériaux de deuxième espèce).

b) La température, le champ magnétique et la densité de courant présentent des valeurs "critiques" au delà desquelles le matériau supraconducteur se comporte comme un matériau ordinaire.

TABLEAU 1REPÈRES DANS L'HISTOIRE DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

- 1909 : première liquéfaction de l'hélium (Kammerling Onnes)
- 1911 : découverte de la supraconductivité du mercure (K. Onnes)
- 1913 : premier solénoïde supraconducteur (K. Onnes) - 1000 spires de plomb et mise en évidence du champ critique.
- 1913 - 33 : collecte de données sur les matériaux supraconducteurs Types I et II.
- 1933 : mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs.
- 1935 : théorie de London - profondeur de pénétration du champ.
- 1952 : théorie de Ginsburg et Landau - longueur de cohérence.
- 1957 : théorie de Bardeen - Cooper - Schrieffer dite BCS - couplage quantique électrons-phonons.
- 1958 : premiers fils de seconde espèce - NbZr
- 1960 : Nb, Sn
- 1964 : chambre à bulles d'Argonne National Laboratory. - stabilité cryostatique - 2,46 T dans plusieurs mètres cubes.
- 1968 : stabilité intrinsèque des filaments fins (Rutherford - Appleton Laboratory).
- 1972 : Nb, GeAl- température critique record 23 K.
- 1974 : BEBC, grande chambre à bulles européenne au CERN, plus grand aimant en service de 1974 à 1984 (conception CERN, construction Alsthom).
- 1980 : plus grand dipôle supraconducteur tournant (Alsthom).
- 1982 : premières images IRM à 1,5 T.
- 1983 : mise en froid du Tevatron du Fermi Laboratory.
- 1983 : premiers fils supraconducteurs utilisables à 50 Hertz (Alsthom)
- 1983 : essais d'un SMES - 10 MW - 30 MJ dans le réseau THT de la Bonneville Power Administration à TACOMA (Washington, USA).
- 1984 : projets de grands collisionneurs (SSC, LHC).
- 1986 : premier transformateur monophasé 50 Hz (LdM - Alsthom)
- 1986 : découverte de la supraconductivité à haute température critique
- 1987 : premier induit triphasé 50 Hz (CRTBT - Alsthom)
- 1988 : premier limiteur de courant alternatif (LdM - Alsthom)

L'état supraconducteur se caractérise donc par un diagramme à trois dimensions : T, B, J.

Cette première période a également été celle de l'explication théorique couronnée par la théorie de Bardeen, Cooper et Schieffer (B.C.S.).

Enfin, cette période se conclut en 1964, avec la première démonstration significative d'application.

La deuxième période est surtout marquée par les nombreuses applications des bobines supraconductrices et les recherches correspondantes :

- Détecteur de particules
- Aimant pour fusion thermo-nucléaire
- Aimant pour imagerie par résonance magnétique
- Stockage et transport d'énergie
- Alternateur à inducteur supraconducteur
- Lévitiation magnétique.

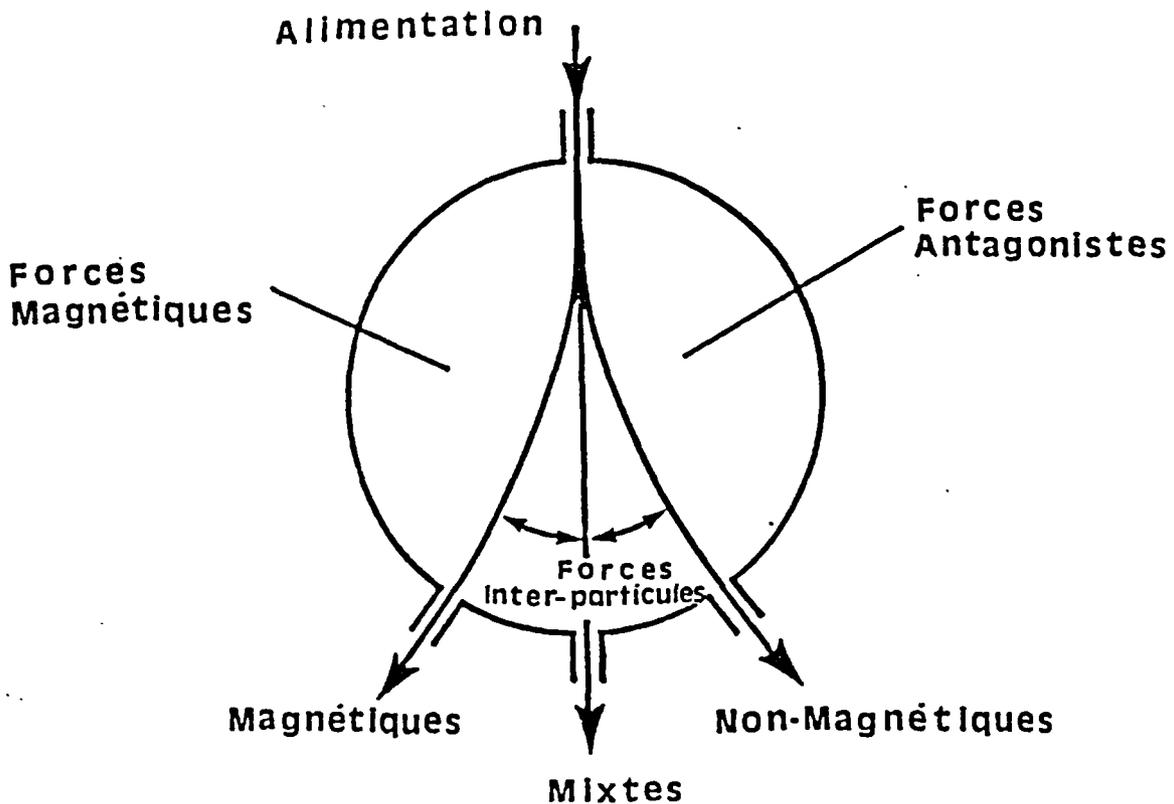
Au cours de la troisième période, l'actuelle, nombre d'idées reçues sont démenties : les matériaux supraconducteurs sont utilisables en alternatif, leurs températures critiques peuvent dépasser largement 23 K,.... Les limites du domaine d'application de la supraconductivité s'élargissent :

- Développement des applications existantes du Nibium-titane
- Développement de recherche sur les nouveaux matériaux
- Nouvelles applications à court et moyen termes
- Perspective d'application des supraconducteurs à haute température critique

II - LA TECHNOLOGIE DE LA SEPARATION MAGNETIQUE

II-1 Introduction

La concentration ou l'épuration magnétique est obtenue en appliquant à toutes les particules contenues dans un mélange une force magnétique $F_m = V M \text{ Gradient de } B$ où V est le volume de la particule, $M = \chi H$ son aimantation, (χ susceptibilité magnétique de la particule), $B = \mu_0 H$ l'induction magnétique. En plus de cette force d'attraction qui agit sur les particules magnétiques, s'applique à toutes les particules ou non une combinaison de force agissant dans différentes directions, dont les plus fréquemment rencontrées sont, les forces de gravités, centrifuges ou d'entraînement hydrodynamiques. Pour que la séparation ait lieu, il faut que la valeur de la force magnétique soit supérieure à la somme des forces antagonistes développées par le séparateur ou le système.



Les séparateurs magnétiques pourront être classés en plusieurs catégories, en fonction du fluide utilisé (air ou eau) et de la densité de force magnétique.

Pour le traitement magnétique, des aimants permanents, des électroaimants et des solénoïdes cuivre ou supraconducteurs, sont couramment employés.

On distinguera donc trois grandes catégories d'appareils pouvant opérer en voie sèche et humide : basse intensité, haute intensité, haut gradient et/ou haut champ (tableau II).

II-2 Bases théoriques et force magnétique

L'expérience montre que toute matière placée dans un champ magnétique acquiert un moment magnétique (s'aimante), le comportement diffère d'une matière à une autre, ce qui permet de classer les substances en plusieurs familles.

+ +

Cette aimantation, qui peut s'écrire $M = \chi_0 H$ est proportionnelle à la valeur de l'excitation magnétique (ou champ magnétique) où χ_0 (sans dimension dans le système SI) est la susceptibilité volumique de la substance considérée.

La susceptibilité est négative pour les substances diamagnétiques et positive pour les corps paramagnétiques ; sa valeur absolue est faible de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-2} . Elle peut varier entre certaines limites en fonction des impuretés ou des modifications du réseau. Pour les corps ferro ou ferrimagnétiques, la susceptibilité n'est plus considérée comme une caractéristique du corps dans le sens où l'aimantation M est une fonction complexe de la température, du champ magnétique et de l'histoire thermique et mécanique de la substance.

Pour les corps magnétiques parfaits, χ_0 est très faible et $\mu_r \approx 1$. Par contre, pour les corps ferro ou ferrimagnétiques, χ_0 est très grand par rapport à 1 et $\mu_r \approx \chi_0$

Par ailleurs, la susceptibilité peut être exprimée (en m^3/kg) par rapport à l'unité de masse, on est alors en présence d'une susceptibilité spécifique ou massique $\chi = \chi_0/\rho$, où ρ est la masse volumique de la matière.

TABLEAU 2

DIFFERENTS TYPES DE SEPARATEURS MAGNETIQUES

APPAREILS	GENERATEURS	GRANULOMETRIE DE TRAITEMENT (mm) (1)	CAPACITE TONNE/HEURE (2)	DENSITE DE FORCE MAGNETIQUE Nm ⁻³
<u>BASSE INTENSITE</u>	AIMANT PERMANENT	0,5 - 20	20 à 300 (.)	$2.10^4 - 2.10^6$
- SEPARATEUR A BANDE	AIMANT PERMANENT	10	60 (.)	5.10^4
- SEPARATEUR A TAMBOUR				
× VOIE SECHE		20	300 (.)	2.10^6
× VOIE HUMIDE		5	150 (.)	2.10^5
<u>HAUTE INTENSITE</u>	AIMANT PERMANENT OU CIRCUIT ELECTROMAGNETIQUE	1 - 5	6 à 180	$2.10^7 - 4.10^9$
- SEPARATEUR A TAMBOUR	AIMANT CERAMIQUE	5	10	2.10^7
- SEPARATEUR A ROTOR INDUIT	CIRCUIT ELECTROMAGNETIQUE	3	8	2.10^9
- SEPARATEUR TYPE JONES	CIRCUIT ELECTROMAGNETIQUE	1	180	4.10^9
<u>HAUT GRADIENT HAUT CHAMP</u>	SOLENOIDE	0,05 - 0,1	10 à 200	$6.10^{11} - 6.10^{12}$
- CONVENTIONNEL	BOBINE CUIVRE	0,1	200	6.10^{11}
- SUPRACONDUC- TEUR	BOBINE SUPRA	0,05	60 - 100	2.10^{12}

(1) Dimension du plus gros grain de l'alimentation.

(2) La capacité est donnée à titre indicatif ; elle dépend de nombreux facteurs, tels que granulométrie, pourcentage du produit magnétique, dimension du séparateur (longueur et diamètre du rotor par exemple).

(.) Capacité donnée par mètre de largeur utile (t/h.m)

Dans tous les cas, la valeur de la susceptibilité magnétique est représentée par la somme de deux susceptibilités, une négative (le diamagnétisme étant une propriété fondamentale de la matière) et une positive.

Dans les applications techniques, il est intéressant de considérer l'induction magnétique $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$ où μ_0 est la perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). Cette relation peut s'écrire également $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_0) \vec{H}$ et permet de définir la perméabilité relative $\mu_r = 1 + \chi_0$.

Un séparateur magnétique est un appareil qui modifie les caractéristiques du champ dans l'espace de traitement. Il engendrera donc, un champ magnétique qui agira de façon sélective sur les corps qui présenteront la plus grande aptitude à l'aimantation.

L'ensemble des particules traitées sera donc soumis à différentes forces :

- Une force magnétique, liée aux propriétés magnétiques de la matière et au système magnétique employé.

- Des forces indépendantes des propriétés magnétiques, mais dûes principalement au système de séparation lui-même et qui pourront être gravitationnelles, centrifuges et d'entraînement par un fluide.

L'expression de la force d'attraction (ou de répulsion) développée par un séparateur, peut être exprimée à partir de la relation de la force dipolaire agissant sur une particule dans le vide :

$$\vec{F}_m = V \int_V (\vec{J} \cdot \vec{H}) dv \text{ où } J \text{ est la polarisation magnétique de la particule (T), } V \text{ le volume de la particule (m}^3\text{) et } H \text{ le champ magnétique (A/m)}$$

L'expression générale de la force magnétique est de la forme:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (\chi_0 - \chi_m) V \nabla (H^2)$$

F_m : force magnétique (N)

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$, perméabilité du vide (H/m)

χ_0 = susceptibilité volumique de la matière

χ_m = susceptibilité volumique du milieu

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V \left(\frac{\chi_0}{1 + N\chi_0} - \chi_m \right) \vec{\text{grad}} (H^2)$$

Grad.H = gradient du champ magnétique (A/m²)

N = coefficient de désaimantation de la matière (important pour les corps ferro ou ferrimagnétique).

La perméabilité relative dans l'espace de séparation (air ou eau) d'un système de tri étant très voisine de 1, la source magnétique peut être caractérisée indifféremment par les valeurs de H (A/m) ou de B (T).

La correspondance est d'environ de 800 kA/m pour 1 Tesla.

L'organe essentiel d'un séparateur magnétique est la source de champ magnétique, à l'origine de la force utilisée pour la séparation. Trois dispositifs peuvent être employés : des aimants permanents, des électroaimants ou des solénoïdes (bobines cuivre résistif ou supraconducteur).

Les appareils mis en oeuvre dans le triage magnétique sont extrêmement nombreux et plusieurs critères de classement peuvent être utilisés : intensité du champ, force magnétique, milieu de séparation (air ou eau), mode de fonctionnement,etc....

Les relations de la force magnétique montrent que cette dernière dépend de deux facteurs principaux :

- La matière (ou la particule) par sa susceptibilité et son volume.
- Le séparateur magnétique, par le produit $\mu_0 \text{ grad} (H^2)$, c'est à dire par la force de son champ magnétique.

Les séparateurs magnétiques peuvent donc se classer en trois grandes familles :

- Séparateurs à basse intensité (aimant permanent) avec :

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) \approx 2 \times 10^4 \text{ à } 2 \times 10^6 \text{ N/m}^3$$

- Séparateurs à haute intensité (électroaimant ou aimant permanent céramique) avec :

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) \approx 2 \times 10^7 \text{ à } 4 \times 10^9 \text{ N/m}^3$$

- Séparateurs magnétiques à haut gradient et/ou haut champ avec :

$$\mu_0 \text{ grad } (H^2) \approx 6 \times 10^{10} \text{ à } 6 \times 10^{12} \text{ N/m}^3$$

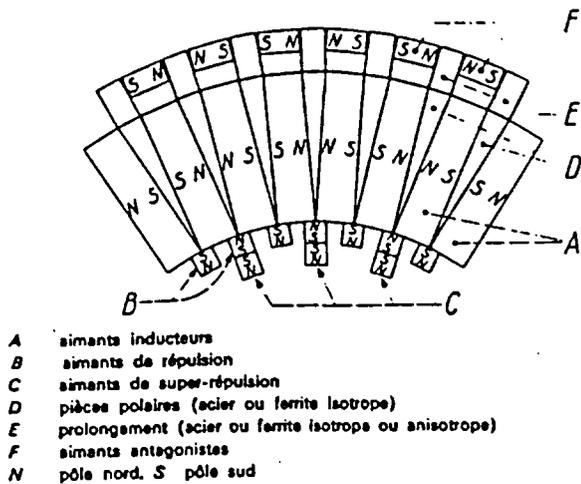
Pratiquement, les séparateurs magnétiques à basse intensité ne peuvent convenir que pour les produits fortement magnétiques (ferri ou ferromagnétiques) alors que les particules faiblement magnétiques (paramagnétiques) ne peuvent être traitées que sur les séparateurs à haute intensité ou haut gradient. Chacune de ces familles est subdivisée en séparateurs travaillant à sec et séparateurs travaillant en voie humide, les premiers étant réservés en général, aux traitements de produits grossiers (diamètre des particules de l'ordre du millimètre ou du centimètre), les seconds de produits fins (diamètre de l'ordre du micron à 100 μm).

II-3 Techniques de séparation magnétique

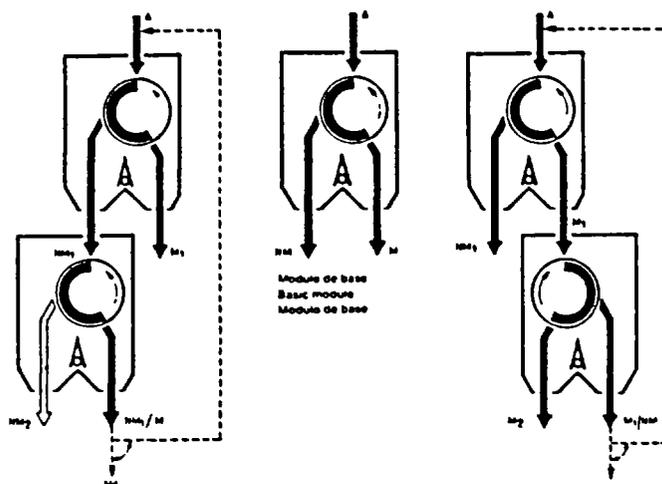
II.3.1 Séparation magnétique basse intensité (SMBI)

Ils sont de type Séparateurs à tambours (fig. 1 et 2) et peuvent fonctionner en voie sèche ou humide.

Les appareils de basse intensité fonctionnent à champ ouvert, c'est-à-dire que les lignes de champ se referment dans un milieu peu perméable, air ou eau. La source de champ magnétique, à l'origine de la force utilisée pour la séparation, est constituée par des aimants permanents, qui offrent l'avantage de ne pas consommer d'énergie. Les matériaux à aimants permanents sont très nombreux, mais les plus utilisés



Agencement de la couronne aimantée d'un séparateur basse intensité, haut gradient, grande vitesse.



Conception modulaire de séparateurs à basse intensité.

Figure 1 : Séparateur magnétique basse intensité voie sèche

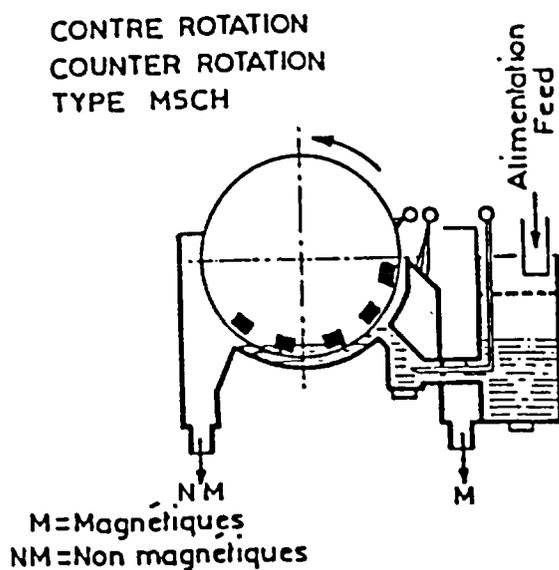
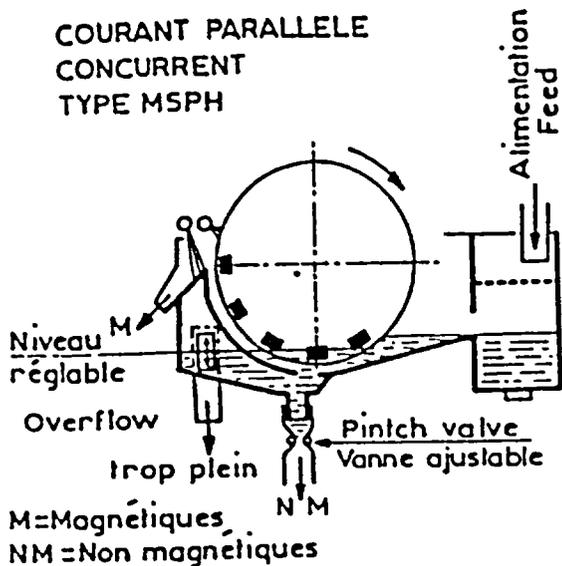


Figure 2 : Séparateur magnétique basse intensité voie humide

sont les aimants céramiques, ou ceux à base de micro-poudre (alliage Fe, Co, Cr à base de terre rare).

Ils sont constitués pour la plupart d'un tambour ou virole tournant autour d'un axe horizontal et renfermant un système magnétique immobile formant un arc de 150 à 180^0 , dont les éléments actifs peuvent être transversaux, longitudinaux ou radiaux. Ils ont des capacités pouvant atteindre 750 t/h, pour des vitesses périphériques de virole de l'ordre de 10 m/s. Leur conception est simple et robuste, ce qui rend l'entretien et la maintenance facile, et leur coût de fonctionnement est très faible.

Leur principal domaine d'activité est l'épuration ou la concentration de minéraux ferromagnétiques (traitement du minerai de fer ou magnétite de Mauritanie, par exemple) ou de ferrailles.

II.3.2 Séparation magnétique à haute intensité (SMHI)

Ces appareils sont pour la plupart à champ fermé et sont destinés à l'épuration ou à la concentration de produits faiblement magnétiques (paramagnétiques). Ils sont tous constitués d'un circuit magnétique conventionnel : culasse magnétique en fer doux, sur laquelle se trouve une ou deux bobines en cuivre résistif refroidies à l'air. La technologie diffère quelque peu suivant qu'ils opèrent en voie sèche ou en voie humide.

A) Séparateur travaillant à sec (fig. 3)

Ce sont des séparateurs qui travaillent par déviation de particules et qui sont constitués par un rotor induit tournant dans l'entrefer d'un circuit magnétique conventionnel. L'appareil présente deux pièces polaires. La pièce polaire arrière épouse le rotor et forme un entrefer le plus étroit possible. La pièce polaire avant peut avoir des formes très variées (inclivée, verticale, parabolique...) ; elle forme avec le rotor, l'entrefer dans lequel va s'effectuer la séparation.

L'hétérogénéité de champ, pour l'obtention de la force d'attraction, est obtenue grâce à l'emploi d'un rotor denté, qui produit une concentration élevée des lignes de forces magnétiques sur les dents. Ils développent des champs pouvant aller jusqu'à $2,2$ Teslas, avec une consommation énergétique comprise entre 1 et 3 Kwh/t traitée, et ont le

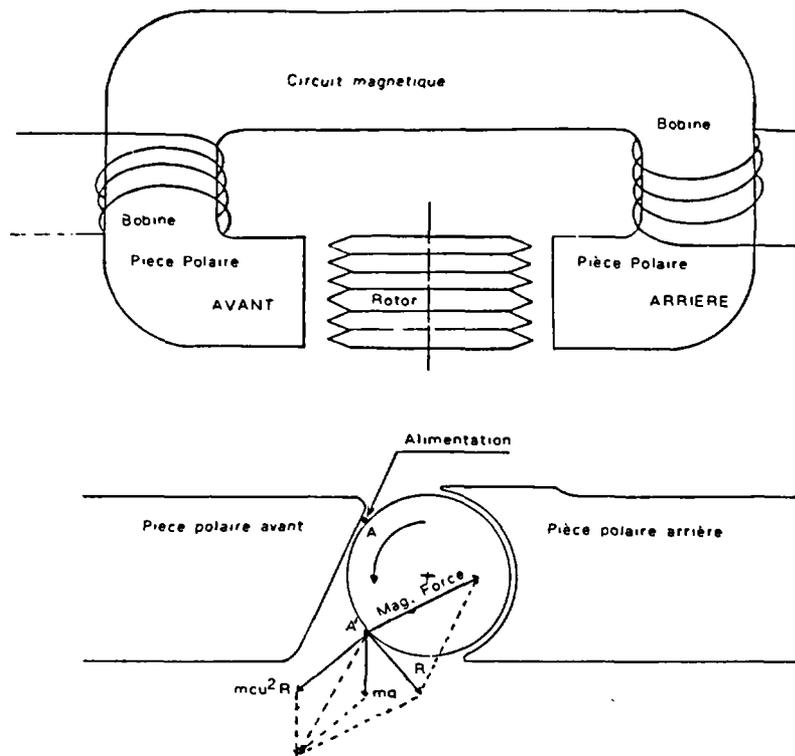
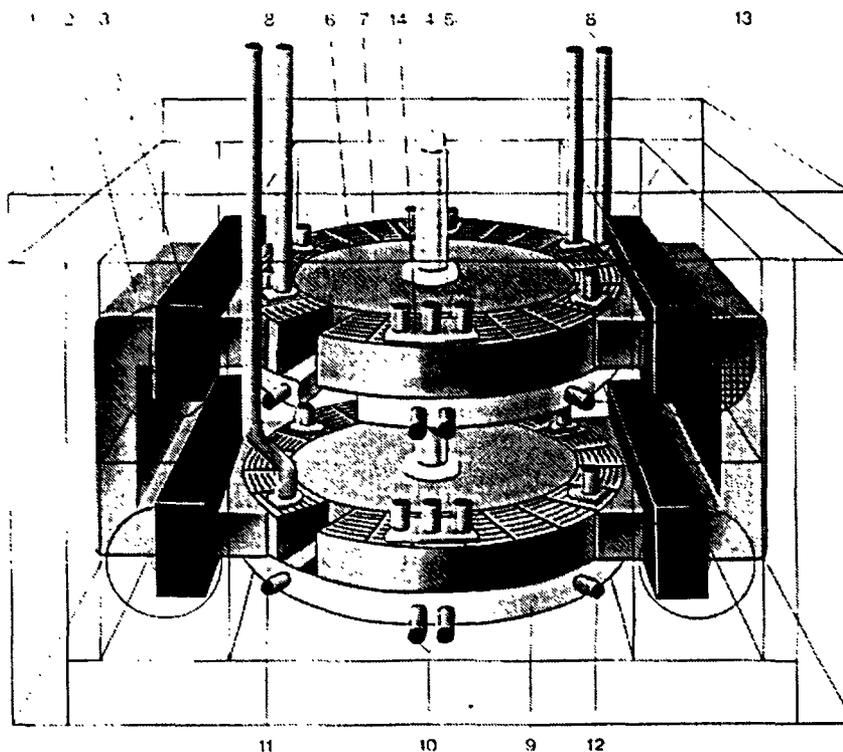


Figure 3 : Séparateur haute intensité à sec



- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Châssis | 10. Sortie du produit magnétique |
| 2. Culasses magnétiques | 11. Sortie du produit non magnétique |
| 3. Bobines | 12. Sorties des mixtes |
| 4. Arbre vertical | 13. Dispositif de lavage |
| 5. Entraînement | 14. Dispositif de rinçage |
| 6. Rotor | |
| 7. Boîtes de travail | |
| 8. Conduits d'alimentation | |
| 9. Couloirs collecteurs | |

Figure 4 : Séparateur haute intensité voie humide (type Humboldt)

désavantage d'avoir des capacités très faibles par rotor (6 t/h).

B) Séparateur travaillant en voie humide (fig.4)

Les techniques de séparation haute intensité voie humide, diffèrent des autres dans le sens où l'alimentation n'est plus distribuée sur un rotor ou tambour, mais circule au travers d'un matériel ferromagnétique, aimanté par un champ magnétique extérieur.

Ce matériel est dénommé matrice d'extraction et peut avoir des configurations variées : plaques dentées, rainurées, assemblage de tiges cylindriques, biseautées, billes d'acier, laine de fer, métal expansé,...

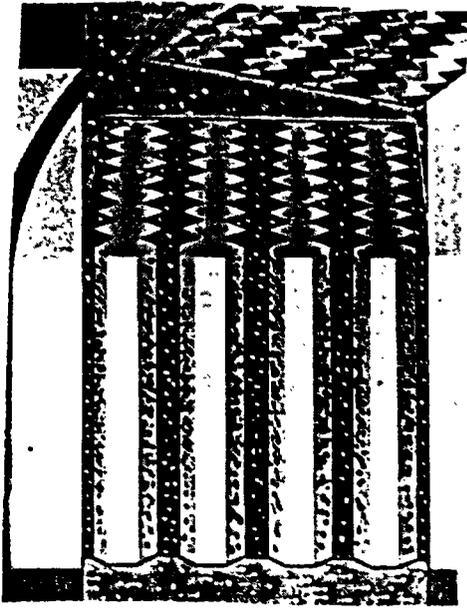
Cette matrice a trois buts principaux, et doit être choisie pour s'adapter au mieux aux caractéristiques des séparateurs et du minerai à traiter :

- Produire des sites de collection pour les particules magnétiques
- générer dans la zone de séparation des valeurs de gradient de champ élevé
- amplifier le champ magnétique extérieur appliqué, tout en distribuant le champ le plus uniformément à travers la zone de séparation

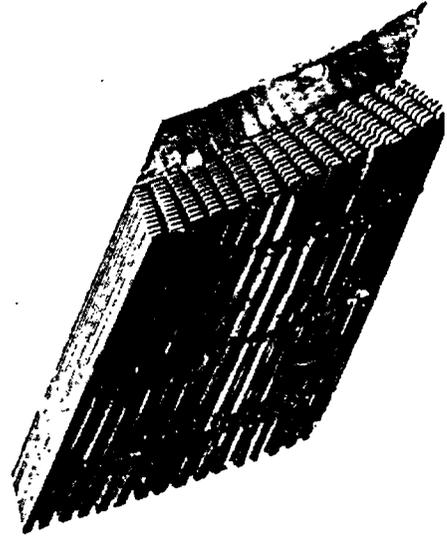
Le principe de ces appareils est le suivant : la matière composant la matrice est placée dans une enceinte annulaire tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique. L'alimentation en pulpe (mélange eau + solide) se fait au dessus des pôles des électroaimants de manière à ce que la pulpe passe dans une région de champ élevée. Les particules magnétiques peuvent donc être retenues dans les éléments de la matrice alors que les particules non magnétiques sont entraînées par le courant de pulpe. Les particules restées piégées sont portées par la rotation du carrousel vers une zone de champ faible et sont éliminées par un jet d'eau sous pression.

Tous les appareils mis en circulation actuellement sont de principe très voisin. Ils développent des champs allant de 0,5 à 2 T et ont une consommation énergétique comprise entre 0,5 et 2 kwh/t traitée. Leur capacité est très grande et varie suivant le type d'appareil de 10 à 180 t/h.

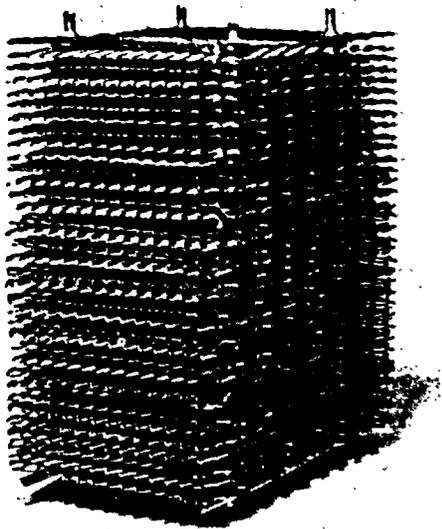
Différents types de matrices.



Matrice Jones
Plaques dentées.



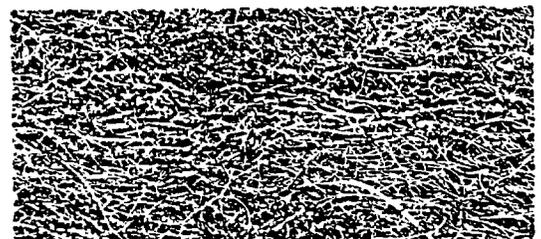
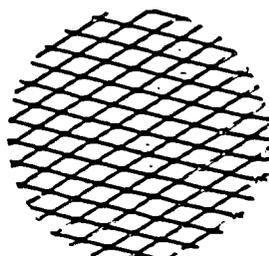
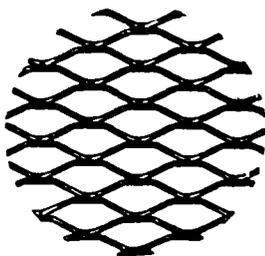
Matrice Rapid (Boxmag)
Grilles trapézoïdales.



Métal expensé



Laine de fer



II.3.3 Séparateurs magnétiques haut champ à aimant permanent (fig. 5 et 6)

Les séparateurs magnétiques à haute intensité à tambour sont encore très peu développés. Ils sont construits suivant le principe illustré par la figure 5. Le tambour comporte des cannelures constituant l'entrefer d'aimants permanents qui sont le siège d'un champ magnétique hétérogène intense capable de retenir des particules faiblement magnétiques.

Bien que ces systèmes magnétiques à aimants permanents développent des forces magnétiques élevées, ils ne peuvent entrer en compétition avec les supraconducteurs mais seulement avec les systèmes électromagnétiques conventionnels. L'emploi de nouveaux matériaux, par exemple à base de cobalt, alliés à des éléments de terres rares, permettent d'obtenir des aimants permanents dont le rémanent atteint 1 200 kA/m. Ces appareils sont équipés d'aimants constitués d'alliages de type CO_5RE (où RE est un élément de terres rares : Sm, Pr, La, Ce, Nd et Cd) ou d'aimants de type céramique anisotrope qui permettent d'obtenir des champs de l'ordre de 1,5 T.

Ces séparateurs à aimants permanents cobalt-terre rare (Ferrodure 330 de Philips) sont constitués d'un tambour comportant de nombreuses cannelures longitudinales (largeur de 2 mm à la base et profondeur de 5 mm). L'intensité du champ magnétique mesurée au fond de la cannelure est de 1 120 kA/m et la valeur du produit $H \frac{dH}{dx}$ est très élevée : $1,3 \times 10^{17} \text{ A}^2/\text{m}^3$. Ces appareils ont été expérimentés avec du minerai de chrome: pour un diamètre de tambour de 600 mm, la capacité de traitement était de 3,6 t/h par mètre de longueur de rotor. Ils peuvent également travailler en humide.

En 1982, un séparateur à aimant permanent générant un champ magnétique élevé (1,7 T) a été développé par la division magnétique de la Société Sud Africaine EDWARD L. BATEMAN LTD en collaboration avec la Société YANIO MAGNETIC (ISRAEL).

Le tambour du séparateur PERMROLL est constitué de disques fins d'alliage samarium-cobalt-terre rare séparé de disques d'acier doux. Cette conception permet de créer des champs et gradients de champs élevés supérieurs à ceux obtenus avec les rotors induits. Ce tambour est entouré d'une bande transporteuse fine et résistante à l'abrasion, sur laquelle

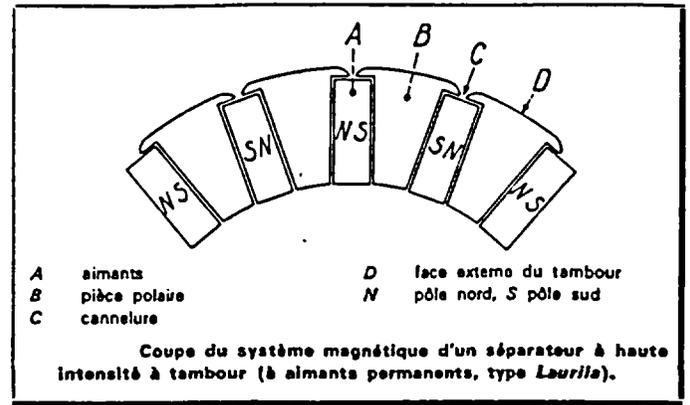
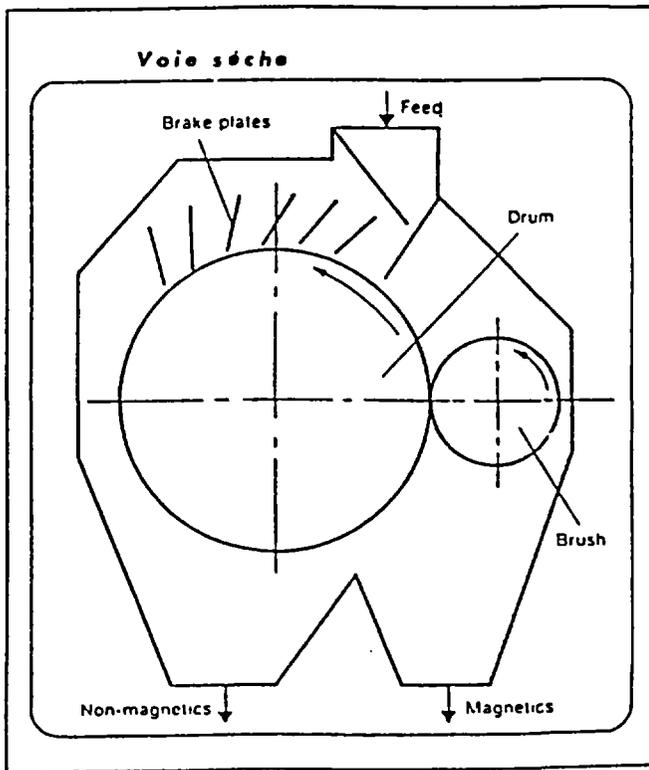


Figure 5 : Séparateur haut champ à aimant permanent

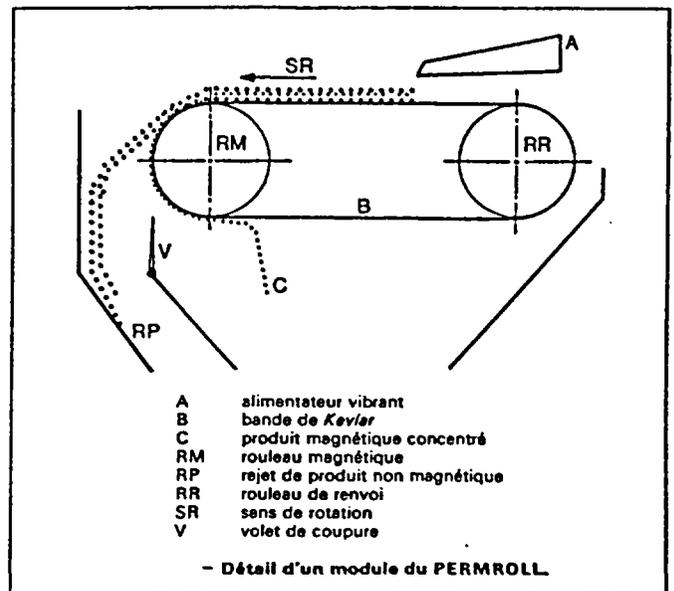
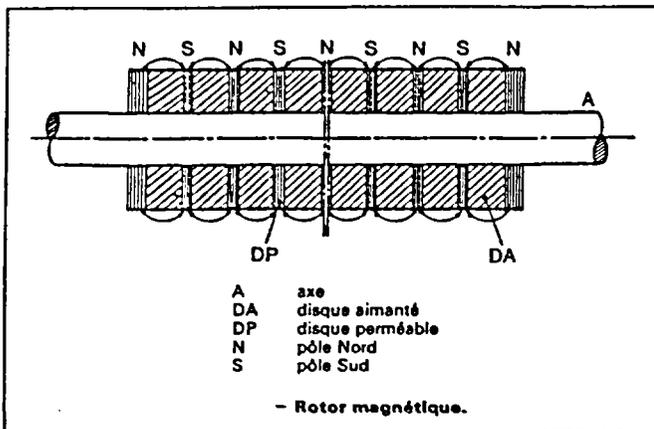


Figure 6 : Séparateur PERMROLL

est alimentée le minerai tout venant, et qui facilite la séparation entre magnétique et non magnétique. Les particules magnétiques adhérentes au convoyeur sont déchargées à l'arrière. Un arrangement de plaques et trémies permet la récupération des produits de séparation (fig.6).

Le séparateur standard a un tambour d'un diamètre de 72 mm pour 1 m de largeur, avec un débit moyen de l'ordre de 10 t/h/m. Suivant le type d'opération, ce débit varie de 1 t/h à 5 t/h (suivant le degré d'épuration voulu) à 40 t/h/m (pour la concentration de produits grossiers). Les granulométries acceptables de traitement vont de 45 μ m à 25 mm, mais peuvent dans certains cas être supérieures à 100 mm. Les unités industrielles peuvent comporter jusqu'à trois étages de traitement. De par leurs conceptions, ces séparateurs présentent de nombreux avantages vis à vis des séparateurs à rotors réduits :

- Coûts d'installation, de traitement et de maintenance relativement bas (environ 10 % inférieurs aux séparateurs induits).
- Réduction de l'énergie électrique consommée.
- Moins d'abrasion du rotor du fait que les matériaux n'entrent pas en contact avec ce dernier.
- Facilité de contrôle due à des ouvertures accessibles.
- Diminution du poids des unités et de l'encombrement au sol.
- Pas de risque de colmatage des entrefers dû à la présence d'éléments ferromagnétiques (ceux-ci étant facilement évacués par la bande).

II.3.4 Séparation magnétique à haut gradient et/ou haut champ (SMHG)

L'emploi des circuits mentionnés ci-dessus a malgré tout de gros inconvénients (saturation magnétique atteinte rapidement, mauvaise récupération des particules < 25 μ m, rémanence du circuit, risque de colmatage, appareils lourds et encombrants).

Cette technique permet d'obtenir un champ d'environ 2 T dans le noyau même ou à la surface des pôles ; mais ce champ ne peut être utilisé pour la séparation magnétique qu'à la condition de créer une discontinuité servant d'espace de séparation dans la culasse magnétique qui assure la fermeture des lignes de forces. Cet entrefer entraîne une réduction du champ magnétique disponible pour le triage, réduction en partie compensée par l'utilisation d'une matrice ferromagnétique.

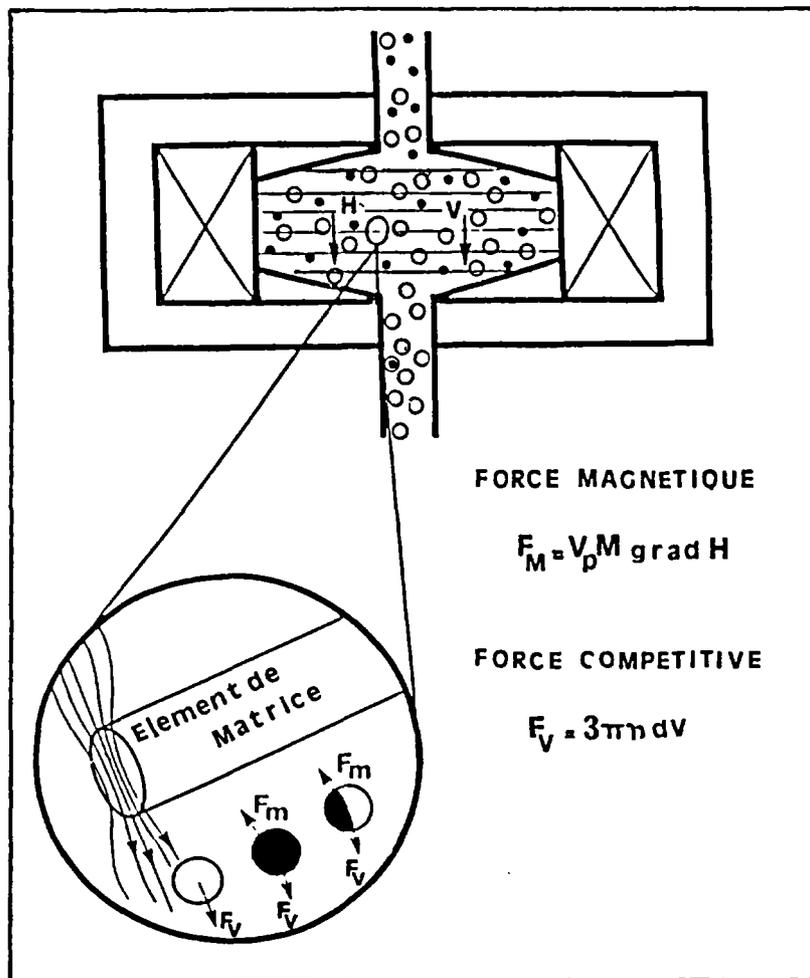
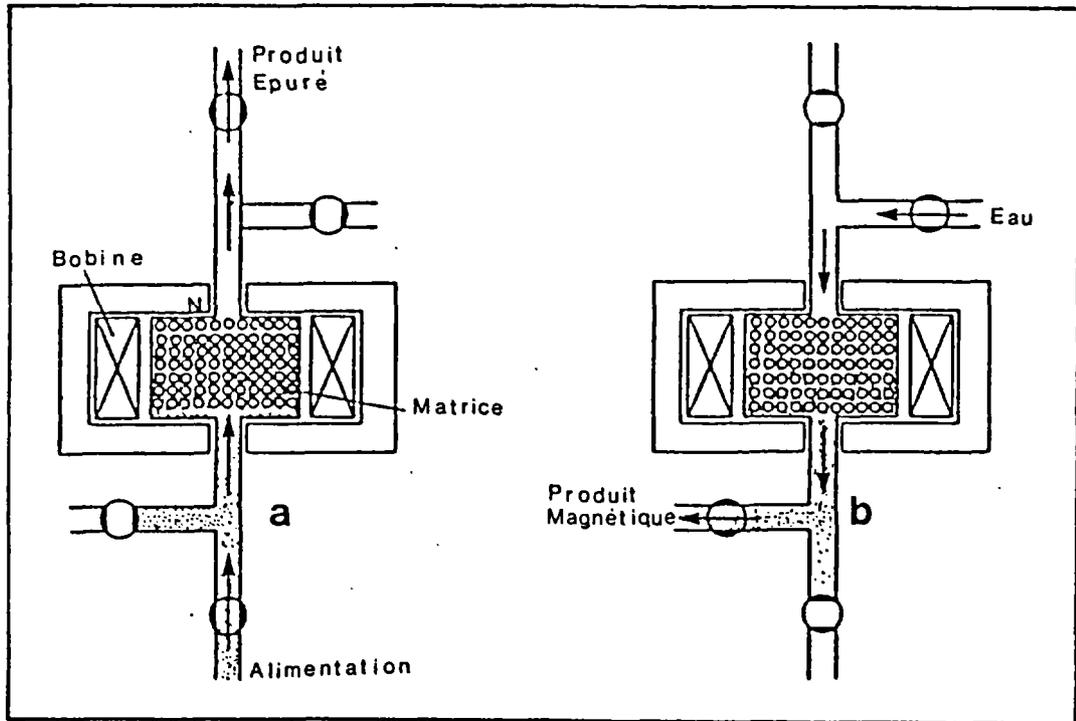


Figure 7 : Principe d'un séparateur haut gradient

Ces inconvénients ont poussé les utilisateurs et les constructeurs à chercher de nouveaux matériaux et générateurs de champ qui n'auraient pas ce travers. La tendance actuelle est donc de remplacer ces masses magnétiques induites par des solénoïdes.

Les séparateurs solénoïdes présentent l'avantage d'effectuer la séparation à l'intérieur même de la bobine d'induction où l'on a mis une matrice de type laine de fer ou plaque de métal expansé produisant des gradients de champ élevé au voisinage des éléments de cette matrice et sur lesquels seront attirées les fines particules paramagnétiques.

Ces séparateurs existent en deux versions, une cyclique à fonctionnement discontinu de capacité allant jusqu'à 100 t/h, et une autre de marche continue à carrousel pouvant atteindre 800 t/h.

Dans l'appareil discontinu, la séparation s'effectue de manière cyclique (alimentation, lavage, expulsion de produit magnétique, fig.7) dans un bobinage pouvant atteindre 2 m de diamètre et réalisé à partir d'un conducteur creux en cuivre de haute conductivité isolé avec des fibres de verre imprégnées de résine epoxy. Un système de réfrigération, par circulation d'eau déminéralisée, permet le refroidissement de la bobine. L'enveloppe du solénoïde pour la fermeture de champ est faite en acier à bas taux de carbone (fig.8).

L'appareil continu industriel reprend la technique du carrousel, qui peut suivant la capacité (200 à 800 t/h) porter quatre têtes magnétiques.

Ces têtes magnétiques sont constituées de deux bobinages allongés en cuivre (dipôles) et refroidies à l'eau.

Le solénoïde dipôle comprend une culasse de fermeture de champ en forme de grille sur les faces supérieures et inférieures, de façon à laisser passer la pulpe minérale et l'eau de rinçage. Le carrousel lui, comporte des compartiments renfermant la matrice d'extraction. Suivant le champ requis pour la séparation (de 0,5 à 2 T), la puissance installée varie de 25 à 400 kw (fig.9).

L'application de ces techniques a permis d'étendre la séparation magnétique à des minerais non économiquement valorisables par d'autres

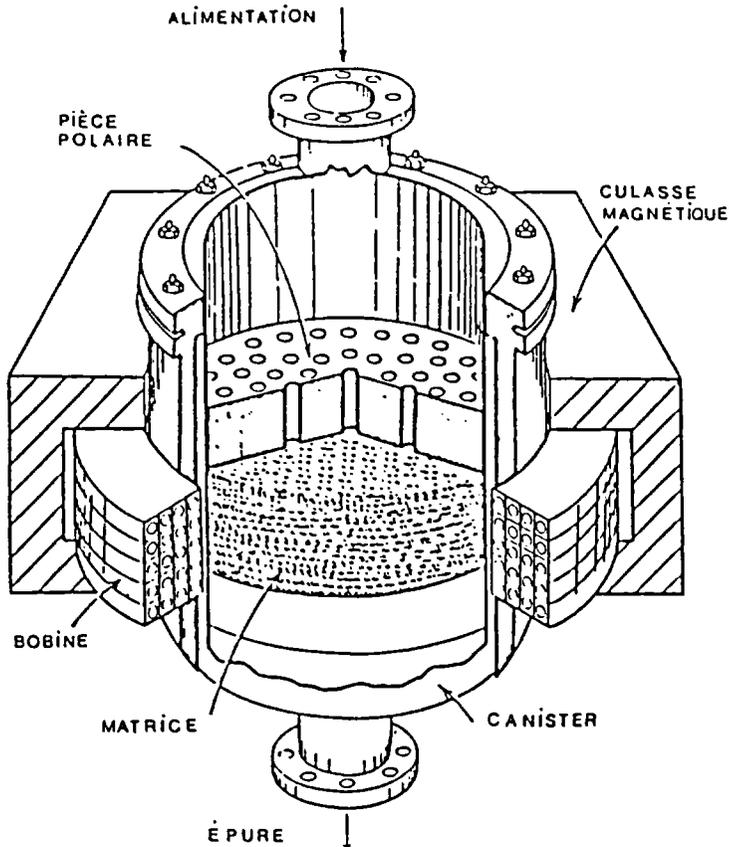
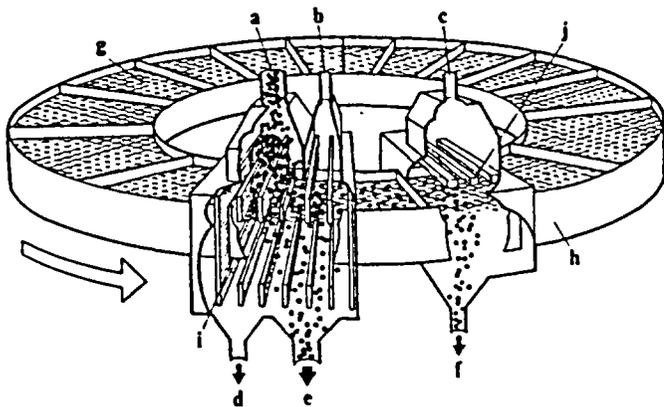


Figure 8 : Séparateur haut gradient discontinu (type SALA)



- a. Trémie d'alimentation
- b. Eau de rinçage
- c. Eau de chasse
- d. Eau refoulée
- e. Fraction non magnétique
- f. Fraction magnétique

- g. Fils de la matrice
- h. Matrice tournante
- i. Aimants
- j. Ramps d'éjection des fractions non magnétiques

Figure 9 : Séparateur haut gradient continu (type SALA)

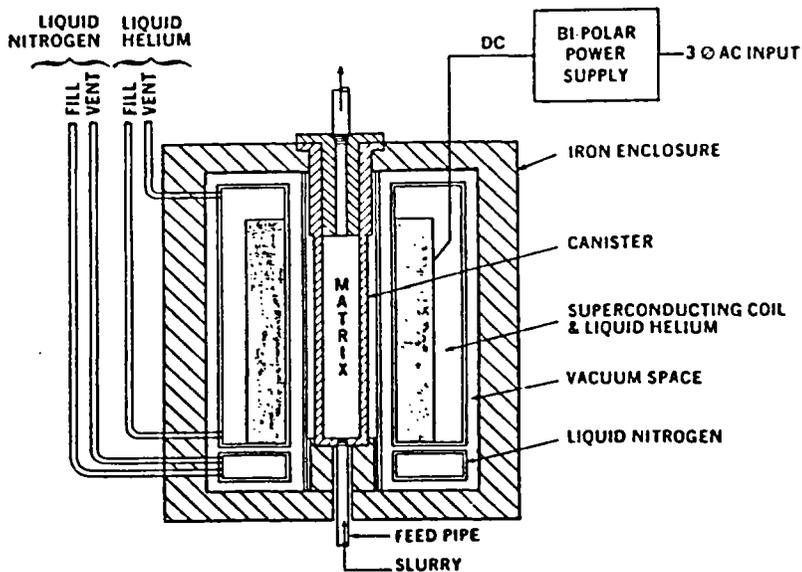


Figure 10 : Séparateur supraconducteur (type ERIEZ)

méthodes ou à d'autres domaines d'application. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- Epuration de produits destinés à l'industrie du verre ou de la céramique et qui demande un taux d'épuration élevé (argiles kaoliniques, sables, syénites néphéliniques).

- Epuration des sulfures des charbons pulvérulents destinés aux centrales thermiques ou électriques.

- Epuration des eaux industrielles (métallurgie et sidérurgie) des eaux urbaines, des eaux de refroidissement des centrales électriques, thermiques ou nucléaires,...

- Extraction de particules contenues dans les procédés de synthèses chimiques, dans des alimentations de fluide énergétique ou vapeurs des centrales électriques ou thermiques.

- Concentration de minéraux comme des ultrafines de Fe, Mo, W, terre rare ou de résidus métalliques pour le recyclage.

- Epuration de divers fluides industriels (industrie de traitement de surface, hydrométallurgie, industrie pétrolière) dans les domaines de l'environnement ou du recyclage.

- Traitement des catalyseurs usés.

Comme les séparateurs haute intensité, les séparateurs à haut gradient conventionnel présentent des inconvénients majeurs, quand le champ magnétique nécessaire à la séparation dépasse 1 T (puissance installée et énergie consommée élevées ; complexité du système de refroidissement et consommation d'eau de refroidissement élevées (0,6 à 1 l d'eau/kw de puissance installée), quantité d'acier utilisé pour le circuit de fermeture du champ considérable (300 t d'acier par tête magnétique).

Ces problèmes, l'évolution de la supraconduction et la maîtrise des techniques de refroidissement font que l'on se tourne peu à peu vers l'emploi de séparateurs à haut gradient à bobines supraconductrices.

Ils sont en effet capables de produire des champs magnétiques élevés sans une consommation d'énergie électrique excessive. De plus, la possibilité d'augmenter le champ magnétique au-delà de 2 T peut être utilisée pour augmenter les performances ou les capacités de production des unités de séparation.

Pour qu'un séparateur à aimant supraconducteur soit industriellement intéressant, il est nécessaire :

- que sa mise en exploitation et son fonctionnement soient affranchis de toutes les contingences liées à la cryogénie (approvisionnement en hélium liquide, maintenance réclamant la présence de techniciens spécialisés,...),

- que son coût d'exploitation soit économique (consommation électrique réduite, perte en hélium minimum ou récupération de l'hélium gaz).

En résumé, pour satisfaire ces exigences, un séparateur supraconducteur doit remplir les trois conditions essentielles suivantes: autonomie, minimum de maintenance, fiabilité.

C'est dans cette optique, que les premières études ont été réalisées et ont porté sur des systèmes à circuit fermé d'hélium entièrement autonome et automatisé, dans lequel l'enceinte froide du solénoïde est incluse et dont le cycle de réfrigération offre l'intérêt de ne nécessiter aucune maintenance particulière.

Les études comparatives de séparation menées sur de telles installations, ont pu montrer l'intérêt de ces techniques sur le plan efficacité et économie.

L'évolution très rapide dans ce domaine, ainsi que dans celui de la cryogénie et de la récupération de l'hélium gaz, laisse entrevoir la possibilité d'utiliser de nouveaux cryostats à circuits ouverts, mais à très faible consommation d'hélium.

Ces technologies étaient encore, il y a quelques années, du domaine du laboratoire, ou du pilote de petite capacité. Depuis 1987, une unité de séparateurs supraconducteurs, a été installée, sur un site

minier, en Géorgie (U.S.A.), en remplacement des séparateurs à haut gradient conventionnel, opérant sur des kaolins. Ces séparateurs sont à circuit ouvert en hélium, et ont une capacité de près de 100 t/h. Leur installation a pu confirmer l'intérêt technologique (gain de 47 % en poids et 35 % en place occupée), et économique (diminution du coût de fonctionnement par gain de 90 % de l'énergie électrique consommée) du procédé vis-à-vis de tous les autres types d'appareils. (fig.10).

Le tableau 3 donne un aperçu rapide des techniques de séparation magnétique.

TABLEAU 3

COMPARAISON DES TECHNIQUES DE SEPARATION MAGNETIQUE : AIMANT PERMANENT,
ELECTROAIMANT, SUPRACONDUCTEUR

	Aimant permanent	Electroaimant Bobine résistive	Bobine supraconductrice
Energie consommable	Faible	Elevé	Faible
Induction magnétique	de 0,2 à 1,5 T	Limité à 2 T	> 5 T
Poids appareil	Léger	Lourd	Léger
Source de champs ou conducteur	Aimant permanent céramique	Conducteur creux en cuivre résistif	Supraconducteur Nb-Ti
Refroidissement	Néant	Air ou eau dé-ionisé	Hélium liquide
Culasse de fermeture du champ (blindage acier doux)	Néant	Important	Néant
Fiabilité de fonctionnement	Excellent	Elevé	Suivant système de mise en froid : élevé à moyen
<u>Investissement</u>	Faible	Elevé	Elevé
Générateur champs	Moyen	Elevé	Elevé
Puissance installée	Très faible	Elevé	Faible
Refroidissement	Néant	Faible à moyen	Elevé
<u>Coût de fonctionnement</u>	Faible	Elevé	Faible à moyen
Séparateur cyclique	—	Bien établi	Etabli
Séparateur continu	Bien établi	Bien établi	Non établi

III - LES SUPRACONDUCTEURS INDUSTRIELS ET LEURS PERSPECTIVES

La supraconductivité est un état remarquable de la matière qui apparaît sur un certain nombre de métaux, alliages et même sur certains matériaux (organiques ou céramiques). La propriété la plus spectaculaire des matériaux supraconducteurs est l'absence de résistance électrique lorsqu'ils sont refroidis au dessous d'une certaine température. On dit alors qu'il y a transition du conducteur de l'état normal (N) à l'état supraconducteur (S). Dans cet état S, un courant électrique peut alors circuler sans aucune dissipation d'énergie. Le transport de l'énergie électrique est assuré par des paires d'électrons de spins antiparallèles et de quantité de mouvement opposés qui traversent la matière sans interagir avec elle.

Depuis 1964, les applications des supraconducteurs métalliques à la température de l'hélium liquide se sont peu à peu répandues en physique de hautes énergies, en fusion thermonucléaire contrôlée, en tomographie médicale par résonance magnétique et leur progression se poursuit (stockage, transport énergie, séparation magnétique). En matière de matériaux supraconducteurs, la possibilité d'emploi en courant alternatif a été démontrée en 1983 et la possibilité de fonctionnement à des températures supérieures à celles de l'azote liquide a été prouvée en 1987. Ces deux révolutions ouvrent des perspectives nouvelles d'industrialisation. En matière de températures de fonctionnement les inconnues physiques, chimiques et technologiques sont encore trop grandes pour que les praticiens du développement puissent partager l'optimisme des médias. Au contraire, en matière de courant alternatif, la démonstration de 1983 ouvre à la cryoélectricité la quasi totalité du marché du matériel électrique et permet la conception de machines nouvelles ou surclassant tous les équipements connus. C'est vraisemblablement dans ce domaine du courant alternatif qu'on peut attendre de nouveaux développements de la cryoélectricité à court et moyen termes.

L'évolution rapide dans la domaine de la supraconduction et de la cryogénie: nouveaux réfrigérateurs et cryostats à faible perte, laisse entrevoir l'utilisation de nouvelles technologies moins sophistiquées et un affranchissement quasi total des contraintes d'exploitation cryogénique (avant de pouvoir utiliser des matériaux supraconducteurs refroidis à l'azote liquide).

L'installation récente sur des sites miniers d'appareils basés sur ces principes a confirmé l'intérêt technologique et économique de l'emploi de ces circuits.

Mais il importe en premier lieu de souligner la difficulté certaine pour des chercheurs appliqués ou pour des industriels utilisateurs ne pouvant suivre qu'indirectement les progrès et errements de la recherche fondamentale dans un domaine aussi évolutif que celui de la supraconductivité et des matériaux correspondant : annonces de découvertes exceptionnelles parfois sans lendemain, confidentialité des travaux porteurs.

Quoiqu'il en soit, les récentes découvertes dans le domaine montrent bien qu'une inexorable révolution technique sur les matériaux conducteurs est en cours : il semble délicat d'en estimer l'échéance pratique, quelques décénies peut être.....

III-1 La supraconductivité

III.1.1 Rappels et définitions théoriques

La propriété la plus spectaculaire des matériaux supraconducteurs est l'absence de résistance électrique lorsqu'ils sont refroidis à des températures voisines du zéro absolu. C'est H.K ONNES qui découvrit en 1911, qu'à la température de l'hélium liquide ($\approx 4,2$ K), la résistance électrique d'un fil de mercure chute à des valeurs non mesurables. 70 ans après sa découverte, la supraconductivité n'a pas encore trouvé une place significative au sein des industries électrotechniques et électroniques.

Le premier motif ayant empêché une utilisation massive est le fait que l'état supraconducteur n'existe que dans certaines conditions bien définies de température, de champ magnétique, de courant appliqué (figure 11).

A l'heure actuelle, parmi les matériaux supraconducteurs trouvés, celui qui a la température critique la plus élevée est le Nb_3Ge , avec une température critique de 24 K. Les recherches se poursuivent, et il est probable que l'on trouve des matériaux supraconducteurs ayant des températures critiques largement plus élevées que 24 K, soit 77 K voire

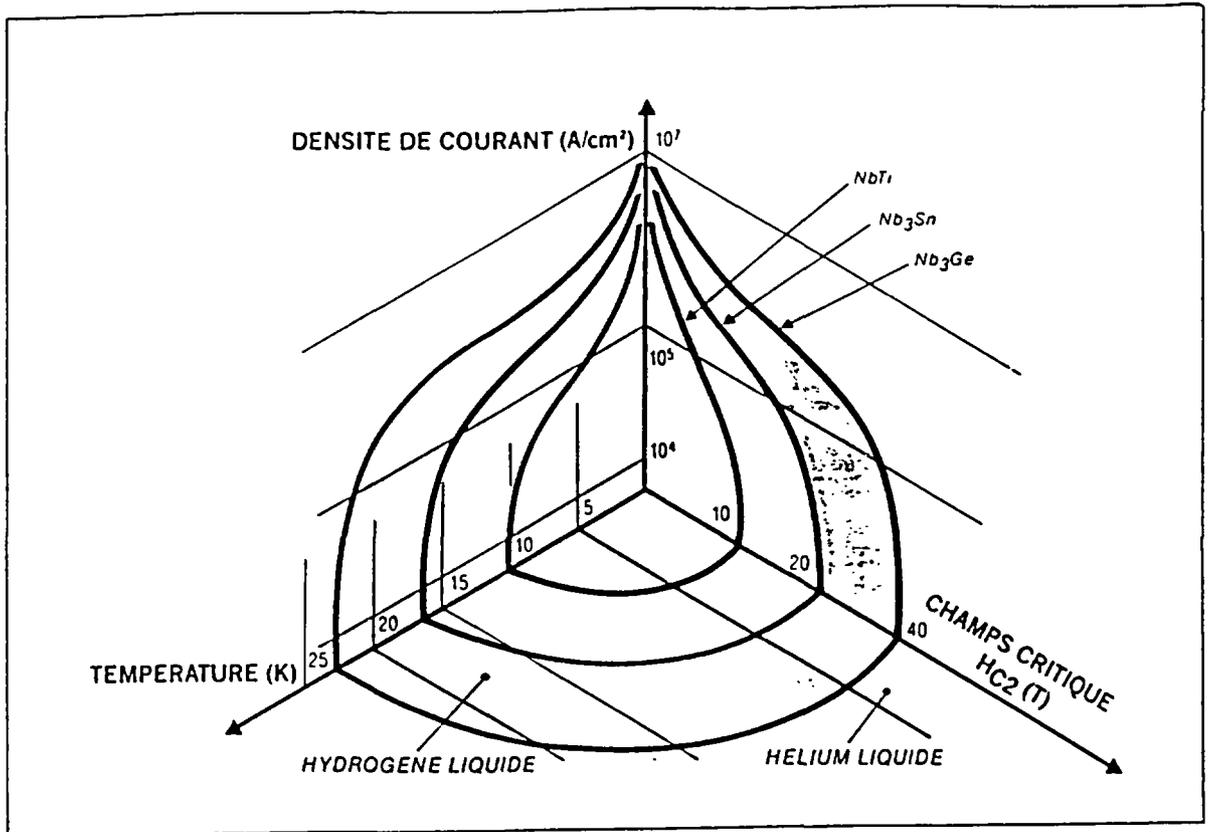


Figure 11 : Diagramme de phase T.H.J. d'un matériau supraconducteur

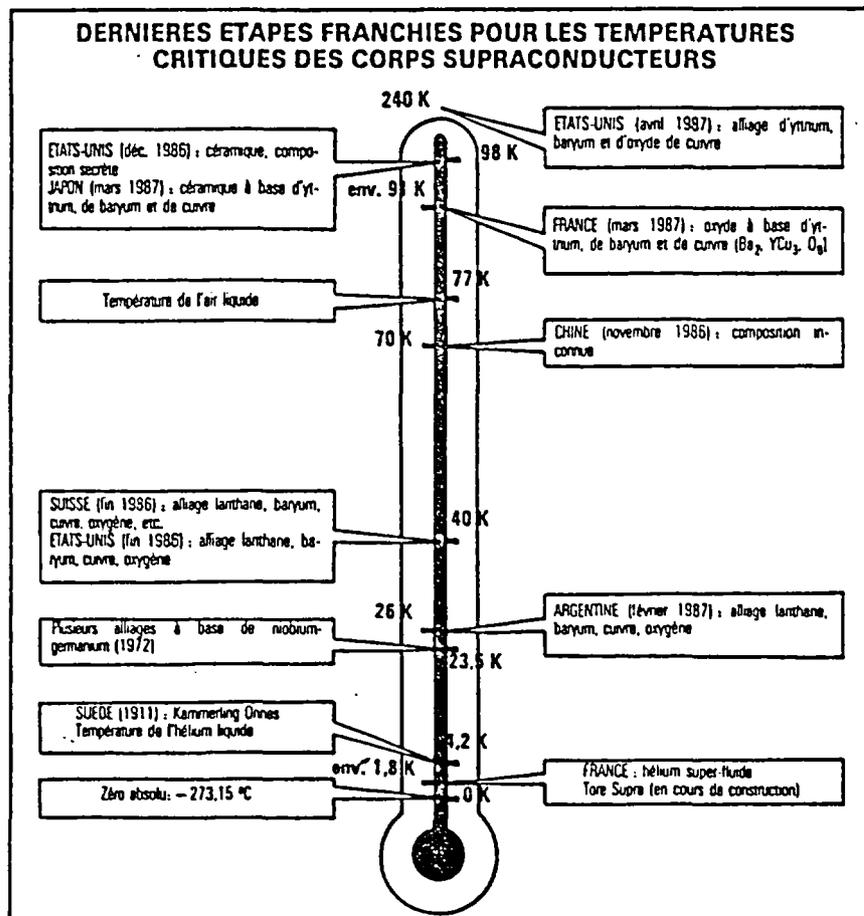


Figure 15 : Evolution de la température critique

la température ambiante.

Les premiers matériaux supraconducteurs découverts voyaient leur état supraconducteur disparaître pour des courants de quelques centaines d'ampères et pour des champs appliqués de quelques dixièmes de tesla, ce qui les rendait inutilisables, car la plupart des applications de l'énergie électrique demandent des intensités très grandes et/ou des champs très intenses. C'est dans les années 60 qu'au terme de nombreuses recherches on a découvert des alliages et des composés supraconducteurs supportant de forts courants électriques en présence de champs magnétiques intenses. Avec l'apparition de ces nouveaux matériaux, l'utilisation des supraconducteurs n'était plus un problème fondamental, mais plutôt un problème technologique et économique. De nombreuses recherches, ainsi que des projets de démonstration sur les applications de la supraconductivité sont développées dans les divers domaines pouvant intéresser l'électrotechnique. Les principaux sujets sont les lignes de transport supraconductrices, le stockage de l'énergie, les machines tournantes, les aimants supraconducteurs pour les programmes de fusion thermonucléaire contrôlée, pour la conversion magnétohydrodynamique (M.H.D.) et pour la lévitation des trains. Les supraconducteurs sont également utilisés pour les grands laboratoires de recherche (accélérateurs).

Une autre application de la supraconductivité dans le domaine de l'électronique est l'utilisation de l'effet Josephson. Un des dispositifs utilisant l'effet Josephson est le SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).

Le SQUID est un dispositif permettant la détection de champs magnétiques, de courants et de voltages extrêmement faibles. Les jonctions Josephson sont aussi à la base des ordinateurs supraconducteurs (Recherches I.B.M.), qui permettraient des calculs beaucoup plus rapides que les ordinateurs classiques.

Depuis la découverte de la supraconductivité en 1911, la compréhension de ses propriétés physiques et la théorie n'ont cessé d'évoluer. Initialement, on pensait qu'un supraconducteur était un conducteur parfait avec une conductivité infinie, mais les expériences de Meissner (1933) montrèrent que le comportement d'un supraconducteur dans un champ magnétique était très différent de celui que l'on pouvait

attendre d'un métal ayant une conductivité infinie. Dans les années 30, des alliages furent étudiés et ils montrèrent une faible sensibilité aux courants et aux champs magnétiques. Ceci conduisit à faire la distinction entre deux types de supraconducteurs, type I et type II, les supraconducteurs de type II pouvant opérer dans de forts champs avec de forts courants. On montra aussi que le flux magnétique ne peut pénétrer un supraconducteur que de façon discrète par quantum de flux $\phi_0 = hc/2e$ où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et e la charge électrique de l'électron. Ces résultats expérimentaux permirent aux théories d'avancer. Les théories initiales étaient phénoménologiques, elles décrivaient le supraconducteur comme formé de deux systèmes d'électrons : le premier formé d'électrons normaux et le second formé d'une phase condensée d'électrons pouvant se déplacer à travers le réseau du métal sans aucune résistance, ces électrons étant appelés supraconducteurs. Le groupe de théoriciens russes L.D. LANDAU, V.L. GINZBURG, L.P. GORKHOV et A.A. ABRIKHOSOV développèrent une théorie phénoménologique qui permit d'expliquer de nombreuses propriétés des supraconducteurs de type I et II. Il fallut attendre 1957 pour qu'une théorie microscopique de la supraconductivité basée sur les interactions quantiques entre les électrons et le réseau soit développée par J. BARDEEN, L. COOPER et J.R. SCHIEFFER, ce qui leur valut le Prix Nobel de Physique en 1972. En 1962, B. JOSEPHSON indiquait que la théorie permettait de penser qu'un effet tunnel était possible à travers une jonction supra-isolant-supra, se manifestant par un supercourant sous un voltage nul. Il prévoyait également que si on maintenait une d.d.p.V. aux bornes de la jonction, le supercourant devait osciller à une fréquence $V = 2eV/h$. Ces effets furent rapidement vérifiés expérimentalement.

1) Propriétés des supraconducteurs

Dans ce chapitre, nous donnons la description des propriétés et théories de base des supraconducteurs.

a) Températures critiques

Nous avons vu que la transition à l'état supraconducteur apparaît pour une température critique T_c ; au dessus de T_c les propriétés du matériau sont normales, en dessous de cette température, la résistance électrique devient non mesurable. Des expériences ont été effectuées sur des anneaux supraconducteurs parcourus par un courant électrique, au bout

d'un an, aucune décroissance du courant n'a pu être mesurée. Compte tenu des précisions de mesure, on peut penser que la constante de temps est de l'ordre de 10^5 années (tableau 4).

	T_c (K)	H_c ou H_{c2} (T)	J_c (A/cm ²)
TYPE I			
Al	1,2	0,01	
Hg	4	0,04	
Pb	7,2	0,08	
Sn	3,7	0,03	
Ln	3,4	0,028	
TYPE II			
Nb	9,2	0,2	$5 \cdot 10^4$
NbTi	9,5	12,2	$5 \cdot 10^6$
Nb ₃ Sn	18,1	25	$5 \cdot 10^7$
Nb ₃ Al	18,7	33	
Nb ₃ Ge	23,2	38	$5 \cdot 10^7$
Nb ₃ Al _{0,7} Ge _{0,3}	20,7	44	
V ₃ Ga	16,5	35	
Phase de chevrel	15	60	
PbM _{0,5} S ₆			

TABLEAU 4 : PRINCIPAUX SUPRACONDUCTEURS

b) Propriétés thermoélectriques

En général, les métaux normaux bons conducteurs de l'électricité, sont aussi bon conducteurs de la chaleur. Au contraire, lorsqu'un métal devient supraconducteur, la conductivité thermique diminue. Ceci s'explique par le fait que les électrons supraconducteurs sont retirés de la distribution thermique et ne peuvent donc pas participer au processus de conduction.

c) Propriétés magnétiques

Lorsqu'un supraconducteur est refroidi en-dessous de sa température de transition, il existe une valeur maximale du champ magnétique pour laquelle les lignes de champ sont expulsées à l'extérieur du matériau (effet Meissner Ochsenfeld). Le supraconducteur est un diamagnétique parfait, le champ magnétique est repoussé vers l'extérieur grâce à des

courants de surface formant écran, le champ ne peut pénétrer que sur une distance extrêmement faible (10^{-5} cm).

Les courants de surface sont juste assez forts pour annuler le champ magnétique à l'intérieur du matériau. La distance sur laquelle le champ pénètre est appelée profondeur de pénétration. Il est important de remarquer que l'effet Meissner ne peut être expliqué par une conductivité infinie.

Lorsque Onnes découvrit que le plomb était supraconducteur, il l'essaya dans un champ magnétique ; il s'aperçut qu'il transitait autour de 0,1 T. Cette propriété est générale et s'applique à tous les supraconducteurs. Le champ pour lequel on perd l'état supraconducteur dépend du matériau et aussi de la température ; on l'appelle champ critique H_C . La figure 11 montre la relation qui lie T_C , H_C et J_C .

L'existence d'un champ critique explique pourquoi un supraconducteur a aussi un courant critique. Le courant dans le supraconducteur croît jusqu'à ce que le champ magnétique à la surface du conducteur (self-courant) atteigne H_C . A ce moment là, le flux pénètre complètement dans le matériau et la supraconductivité est détruite. Les supraconducteurs se comportant comme sur la figure 12 sont appelés supraconducteurs du type I. Les supraconducteurs du type I sont des métaux purs. Les valeurs de H_C pour ces types de matériaux sont trop faibles pour qu'ils soient utilisés dans des applications industrielles.

Lorsqu'on commença à étudier des alliages supraconducteurs (dans les années 20), on s'aperçut que le flux magnétique entraît progressivement dans le matériau au-dessus d'une valeur H_C et la pénétration n'était complète que pour des valeurs de champ beaucoup plus élevées. Cette nouvelle classe de supra fut baptisée Type II.

La courbe de magnétisation de ces supraconducteurs est montrée en figure 12. Contrairement au cas des supraconducteurs du type I, on a deux champs critiques H_{C1} et H_{C2} . En-dessous de H_{C1} , on a le même comportement que pour le type I. Au-dessus de H_{C2} , le champ pénètre complètement à l'intérieur du matériau. Lorsque le champ appliqué est situé entre H_{C1} et H_{C2} , le matériau se trouve dans un état intermédiaire nommé "état mixte" ou "état de vortex", le champ pénètre partiellement suivant un réseau compliqué mélangeant état normal et état supraconducteur. Ce sont les

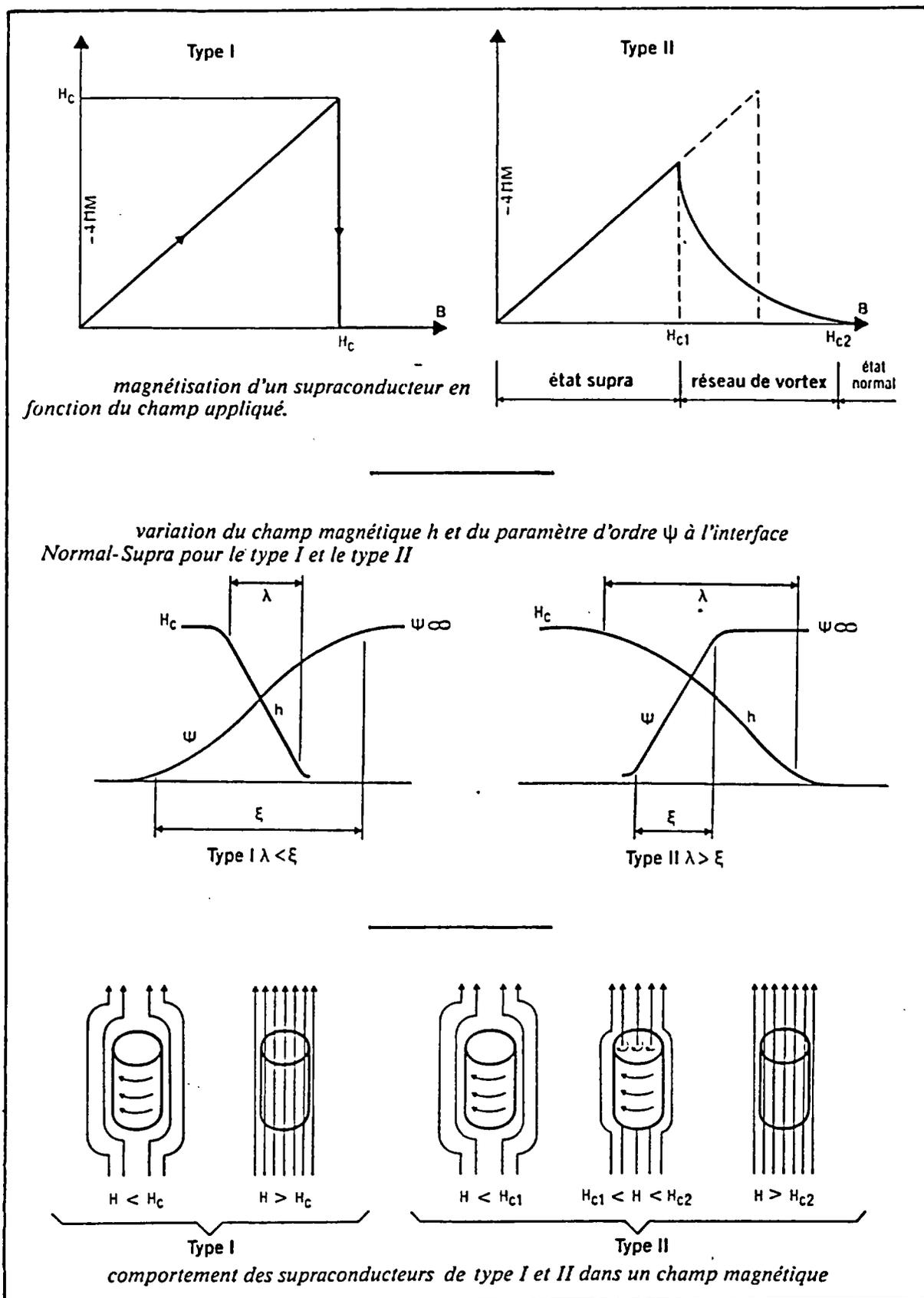


Figure 12 : Propriétés magnétiques des supraconducteurs de type I et II

matériaux du type II qui peuvent avoir une application intéressante en électrotechnique grâce à leurs grands champs critiques et grands courants critiques. Comme nous le verrons par la suite, le courant critique des matériaux du type II est plus déterminé par des propriétés métallurgiques que par des propriétés intrinsèques du matériau.

2) Théorie de l'état supraconducteur

Ce paragraphe n'a pas la prétention de traiter la théorie des supraconducteurs au sens où les physiciens théoriciens l'entendent, mais seulement de donner les éléments fondamentaux permettant de comprendre l'essentiel du phénomène. Les premières théories furent phénoménologiques et permirent d'expliquer un grand nombre de propriétés des supraconducteurs (Equations de LONDON-1935-Equations de GINSBURG-LANDAU 1950). Ce n'est qu'en 1957 qu'une théorie microscopique quantique est établie par BARDEEN - COOPER- SCHRIEFFER (Théorie B.C.S.); elle explique une grande partie des raisons pour lesquelles la supraconductivité existe dans certains matériaux. De nombreuses recherches sur la théorie des supraconducteurs sont encore actives afin d'expliquer certains comportements non prévus par les théories existantes et pour trouver de nouveaux types d'interactions, permettant d'obtenir des matériaux à température critique plus élevée. On essaye également d'expliquer quelques interactions métallurgiques permettant de déboucher sur des matériaux ayant de meilleures performances. D'une façon générale, c'est la théorie qui suit l'expérience, mis à part l'effet Josephson qui avait été prévu grâce à la théorie.

a) Etat condensé - gap d'énergie

Des expérimentations sur l'effet tunnel et sur la chaleur spécifique indiquent que l'état supraconducteur est un état condensé au niveau d'énergie le plus bas. Ces expérimentations montrent l'existence d'un gap d'énergie E_g . Cette énergie est l'énergie nécessaire pour créer des excitations à partir de l'état fondamental. La courbe d'effet tunnel montre que l'on n'obtient aucun courant tant que le voltage n'a pas atteint $eV = 1/2 E_g$. La valeur de E_g ainsi déterminée correspond à celle déterminée à partir de la chaleur spécifique.

Comme la transition supra est réversible (effet Meissner), on peut appliquer les lois des équilibres thermodynamiques. Si nous considérons

seulement les supraconducteurs de type I, on peut montrer que la différence d'énergie libre entre l'état supraconducteur et l'état normal est :

$$F = F_n - F_s = \frac{H_c^2 (T)}{8\pi} = (H_c \text{ en gauss})$$

La différence d'entropie est :

$$S = S_n - S_s = - \frac{1}{4\pi} \cdot H_c \cdot \frac{dH_c}{dT}$$

Lorsque le matériau devient supraconducteur, il passe dans un état d'énergie plus basse donc plus ordonné et l'entropie est plus faible.

b) Profondeur de pénétration - longueur de cohérence

Pour comprendre les propriétés des supraconducteurs du type II, 2 longueurs fondamentales doivent être définies. La première mesure la profondeur de pénétration du champ magnétique à l'intérieur du supraconducteur.

Dans la théorie de LONDON, des supraconducteurs type I, on a

$$\lambda_L^2 = \frac{mc^2}{16\pi ne^2}$$

où n est la densité des électrons supra et m la masse de l'électron. La valeur typique de λ est 500 Å. La deuxième est la longueur de cohérence: cette distance mesure l'espace sur lequel le paramètre d'ordre supra ou encore la densité des électrons supra varie de 1 à 0.

c) Théorie de Ginzburg-Landau

La première théorie phénoménologique décrivant l'état supraconducteur est celle de Ginzburg Landau (1959). Cette théorie permet d'expliquer les supraconducteurs du type II et l'effet Josephson, elle utilise un paramètre d'ordre $\psi(r,t)$ complexe, caractérisant l'état supraconducteur. Physiquement, ce paramètre d'ordre peut être interprété comme étant une représentation de la densité des électrons supraconducteurs $\psi^* \cdot \psi = n_s$, la fonction d'ordre s'écrivant :

$$\psi = \psi_0(r, t) e^{i\theta}$$

θ étant la phase du paramètre d'ordre.

Utilisant la théorie de l'électromagnétisme, on peut montrer que le courant devient :

$$\vec{j} = - \frac{2e^2}{mc} \vec{A} + \frac{eh}{2\pi m} \vec{\nabla} \theta / \psi^2$$

où \vec{A} est le potentiel vecteur du champ magnétique.

d) Quantification du flux

Une autre propriété importante nécessaire à la compréhension du comportement supraconducteur est la quantification du flux. Si un anneau supraconducteur est placé dans un champ magnétique, le flux à travers cet anneau est égal à un nombre entier de fois le quantum de flux ϕ_0 .

$$\phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ G.cm}^2.$$

e) Théorie de BARDEEN - SCHRIEFFER - COOPER (B.C.S).

Une analyse détaillée de la théorie B.C.S. n'est pas nécessaire pour comprendre les applications des supraconducteurs. Toutefois, nous donnons ci-après une description rapide de cette théorie. La théorie B.C.S. est basée sur l'attraction entre paires d'électrons à l'intérieur d'un métal résultant de l'interaction de chaque électron avec le réseau.

Un électron interagit avec le réseau et le déforme créant ainsi localement une concentration de charge positive. Un second électron qui "voit" cette déformation du réseau est attiré, on a donc attraction d'un électron par un autre électron, par l'intermédiaire du réseau. Ces deux électrons forment une paire de Cooper. Ce couplage est faible, ce qui explique que si l'énergie thermique est trop grande ce couplage est inefficace d'où l'apparition de cet effet uniquement à basse température en-dessous de T_c .

Un des résultats fondamentaux de la théorie B.C.S. est que la température de transition est donnée par :

$$T_c \approx \theta_D e^{-1/n(0)r}$$

θ_D = température de Deybe $n(0)$ est la densité d'états au niveau de Fermi, r est l'interaction électron-phonon.

Cette équation donne de bons résultats pour des supraconducteurs à faible couplage mais pas très bons pour de hautes valeurs de T_c .

f) Comportement en champ magnétique et courant critique

La théorie développée par Ginzburg-Landau peut donner une description phénoménologique des propriétés des supraconducteurs de type I et II. L'énergie de surface entre partie supra et partie normale peut être positive ou négative selon la valeur du rapport de la profondeur de pénétration à la longueur de cohérence. Si nous définissons le paramètre de G.L. $\chi = \lambda/\zeta$ pour le type I on a $\chi < \sqrt{1/2}$ et pour le type II $\chi > \sqrt{1/2}$. Pour un matériau de type II, l'énergie de surface est négative pour $H > H_{c1}$ et le système aura une énergie plus basse si une interface se forme entre supra et normal (figure 12).

Le flux magnétique pénètre les supraconducteurs II sous forme de vortex de flux quantifié. Un vortex peut être décrit comme une partie centrale non supraconductrice avec des courants supraconducteurs tournant autour. A cause de la quantification du flux, chaque vortex possède un quantum de flux ϕ_0 . Au fur et à mesure que le champ augmente, un nombre croissant de vortex pénètre le matériau jusqu'au H_{c2} pour lequel la densité de vortex devient trop importante et le métal devient normal. La figure 12 montre le comportement des supraconducteurs de type I et II dans un champ magnétique. Ceci n'explique pas entièrement les propriétés à fort courant des supraconducteurs du type II car pour ces matériaux, la résistance électrique peut apparaître pour des champs inférieurs à H_{c1} . Lorsqu'un courant passe dans un matériau supraconducteur type II, le champ pénètre à un courant juste suffisant pour qu'à la surface du matériau on ait $H = H_{c1}$. A cause des forces de Lorentz, dues à l'interactions entre le courant de transport et le champ magnétique des

lignes de vortex, les fluxoïdes se déplacent et l'énergie dissipée qui en résulte entraîne une apparition de résistance en même temps que H_{c1} est atteint. Cependant, dans la plupart des matériaux du type II, ceci ne se produit pas, les fluxoïdes pénètrent mais ne se déplacent pas, à cause des propriétés métallurgiques du matériau les fluxoïdes sont bloquées. Ce phénomène dû à l'état métallurgique du matériau peut s'expliquer par la compréhension des interactions entre le flux magnétique et le réseau.

III.1.2 Les matériaux supraconducteurs

1) Les supraconducteurs "industriels"

Malgré une connaissance théorique suffisante de l'état supraconducteur du type II dès 1957, à la suite des travaux d'ABRIKHOSOV, le développement de ces matériaux ne s'est fait qu'au cours des années 60. Actuellement, les supraconducteurs NbTi, Nb_3Sn , V_3Ge , NbZn sont commercialisés, mais Nb_3Ge et $Nb_3(Ge-Al)$ sont encore en développement. Les matériaux ayant la technologie la plus avancée sont le NbTi et le Nb_3Sn , le NbTi étant de loin le plus utilisé.

Si le NbTi est actuellement le réseau supraconducteur le plus utilisé, c'est grâce à ses propriétés métallurgiques très favorables qui permettent d'en faire du fil, c'est un alliage ductile facilement étirable, on peut l'extruder à partir de billettes composées de NbTi et d'autres matériaux (Cu ou Al). Au contraire, les matériaux Nb_3Sn et V_3Ge possédant de meilleures propriétés supraconductrices sont fragiles et difficiles à mettre en oeuvre.

Des alliages de structure cristalline appelée A15 peuvent se former dans des conditions précises de températures. Par exemple, une méthode pour fabriquer les fils de Nb_3Sn est obtenue en formant une billette de Nb et de Sn par perçage de trous dans un cylindre d'étain et en insérant dans ces trous des barres de Nb. Du cuivre est rajouté pour assurer la stabilité de la billette, celle-ci est ensuite extrudée. Le nombre de brins de Nb dans le fil peut être augmenté en utilisant à nouveau le produit de la 1ère billette dans une 2ème et en recommençant les opérations. Des câbles de Nb_3Sn possédant plus de 500 000 brins ont été ainsi fabriqués. Le fil doit être ensuite chauffé en atmosphère inerte à une température voisine de $700^{\circ}C$ afin que le composé Nb_3Sn se forme au

contact du Nb et du Sn.

Le Nb_3Sn est actuellement disponible sur le marché sous forme multifilamentaire ou sous forme de rubans. Nb_3Ge est aussi une structure A15, cependant sa fabrication est plus compliquée.

Dans la pratique, la quasi-totalité des supraconducteurs pouvant avoir des applications industrielles sont des supraconducteurs de deuxième espèce dont le champ H_{c2} est élevé, supraconducteurs de deuxième espèce sales, c'est-à-dire ayant une très forte densité de défauts. Ces défauts doivent avoir une taille assez fine pour que le piégeage soit efficace et donc la densité du courant critique du matériau particulièrement élevée. Le courant transportable à 5 T et 4 K par un fil Nb-Ti est 50 fois supérieur à celui d'un fil Cu de même diamètre utilisé à $10A/mm^2$. Le coût de l'ampère kilomètre obtenu par des fils supraconducteurs standard est d'environ 40 % inférieur à celui obtenu avec 1 fil Cu utilisé à $10 A/mm^2$.

2) Courant-critique - pinning

Si on prépare un échantillon de supra II pur et recuit avec précaution, on trouve des courants critiques très faibles. Une fois que H_{c1} est dépassé, soit par le champ appliqué, soit par le champ propre généré par le courant de transport, l'échantillon montre une résistance au passage du courant continu. Quoique cette résistance soit plus faible que dans l'état normal, elle rend le matériau inutilisable comme supraconducteur. La résistance vient du mouvement des lignes de flux causé par les forces de Lorentz $J \times B$ entre le courant de transport et les fluxoïdes. Ce mouvement amène une dissipation d'énergie. Des fluxoïdes entrant dans le matériau, se meuvent à travers et sont détruits ; le travail effectué dans ce mouvement est proportionnel à $(J \times B) l$ où l est la distance que le fluxoïde parcourt dans le supra avant d'être détruit. Pour fabriquer des matériaux utiles technologiquement, les fluxoïdes doivent être bloqués. Le mouvement des fluxoïdes peut être réduit en introduisant des défauts dans la structure cristalline. Des défauts comme des dislocations, des vides, des précipités, les joints de grain, favorisent l'augmentation du courant critique par "pinning". Il faut remarquer aussi que le fait d'augmenter le courant critique dans les A15 réduit en même temps T_c , il faut donc un juste compromis entre les deux effets.

3) Intérêt des hautes températures critiques

Les courants critiques et les champs critiques de ces matériaux sont fonctions de la température. La figure 11 montre J_c , H_c et T_c pour des échantillons type Nb_3Sn . Pour avoir un fort J_c et un fort H_c , il faut que la température soit largement inférieure à T_c . Typiquement dans la plupart des applications du NbTi ou du Nb_3Sn , la température du système doit être maintenue à la température de l'hélium liquide voire plus bas. Ces températures nécessitent des puissances de réfrigération importantes et un des avantages d'avoir des températures critiques plus élevées, supérieures à 20 K (ou 77 K) serait de pouvoir utiliser l'hydrogène liquide (ou l'azote liquide) au lieu de l'hélium. Ceci est important pour les applications à grande échelle des supraconducteurs d'où l'importance d'un matériau tel que Nb_3Ge .

4) Training et stabilisation

Quand les fils supraconducteurs à haut courant critique sont montés en courant pour la première fois dans un bobinage, invariablement le système redevient normal pour des courants et des champs inférieurs à ceux obtenus sur des échantillons courts. Dans le cas des grosses bobines, la transition (quench) est spectaculaire car elle libère une très grande énergie lors du retour à l'état normal ($1/2 LI^2$). Ceci peut se produire plusieurs fois avant d'obtenir les performances attendues et s'appelle le "training".

Les raisons pour lesquelles les bobines transitent avant d'atteindre les performances des échantillons courts sont maintenant connues et on peut réduire leurs effets lors de la conception des bobines. Ces effets sont dus à des conditions électriques ou thermiques instables, qui génèrent des sauts de flux, ce qui produit un effet dissipatif conduisant à une production de chaleur. Dans une bobine, cette chaleur est produite très localement et une courte partie du bobinage redevient normale. Si cette chaleur ne peut être absorbée, la transition se propage et toute la bobine redevient normale en libérant l'énergie magnétique stockée. Très tôt, on a résolu le problème en faisant des conducteurs stabilisés cryostatiquement, en ajoutant du cuivre ($Cu/Supra = 20$ ou plus). Lorsque, localement, le supra redevient normal, le Cu shunte cette partie résistive et dissipe la chaleur grâce à sa grande conductibilité

thermique, la transition reste alors locale et la température redevient inférieure à T_c , l'état supra est restauré.

La cryostabilisation par le cuivre entraîne quelques problèmes qui font que l'on a cherché d'autres techniques pour éliminer cette transition. Le premier inconvénient est que le fait d'avoir beaucoup de cuivre conduira à de grosses pertes par courant de Foucault si on utilise le fil en courant pulsé ou alternatif. L'autre problème important avec la cryostabilisation résulte du fait que pour un aimant à fort champ le paramètre important étant la densité du bobinage supraconducteur, avec un fort rapport cuivre sur supra, la densité du bobinage est réduite et la fabrication des bobines à haut champ est impossible.

Deux mécanismes provoquent la transition prématurée : les sauts de flux et les mouvements mécaniques à l'intérieur des conducteurs. Les effets des mouvements mécaniques sont réduits en réalisant des supports pour chaque conducteur adéquats et les sauts de flux peuvent être réduits par "training", après plusieurs cycles de charges et décharges. Les sauts de flux résultent du fait que, momentanément, les forces de "pinning" accrochant les lignes de flux au réseau, sont détruites. Ces phénomènes génèrent des pics d'énergie thermique donc causent une élévation de température locale dépassant T_c , ce qui entraîne un retour à l'état normal. L'énergie dégagée par un saut de flux est proportionnelle au diamètre du fil supra, d'où l'idée de fabriquer un fil dans lequel le supraconducteur est sous forme de fils très fins, noyés dans une matrice à forte conductibilité thermique Cu ou Al. La taille typique des filaments est autour de 10 μm . Ceci aide aussi à minimiser les effets d'instabilité et permet d'avoir un excellent transfert thermique entre le fluide cryogénique et les fils.

5) Vues futuristes et espoirs

Les supraconducteurs dont nous avons parlé ci-dessus sont des supraconducteurs métalliques appartenant aux composés ductiles cubique-centrés comme le NbTi ou aux composés de structure A15 comme Nb_3Sn ou Nb_3Ge .

A l'heure actuelle, des recherches se poursuivent pour trouver de nouveaux matériaux ayant des températures critiques, des champs critiques et des courants critiques plus élevés. Pour terminer nous ne citerons que

quelques voies de recherches actuelles :

- les structures B_1 (carbonitrures) T_c max. 15,7 K

- les phases de laves $V_2Hf_xZr_{1-x}$ (structure C15).

$T_c = 10K - H_c = 20 \text{ à } 25 \text{ T} - J_c 10^5 \text{ A/cm}^2$

- Composés ternaires : type $ErRH_4B_4$

- Les phases de Chevrel M_x, Mo_6, X_8

$X = Cu, Sn, Pb$

$M = S, Se, Te$

(chalcogénure de molybdène) $0 < \chi < 4$

permettant d'obtenir de forts champs critiques (60 T).

- Les supraconducteurs organiques : recherches faites en particulier en France à Orsay où on a découvert le Tétraméthyltétrasélénafulvalènehexafluorophosphate $(TMTSF)_2PF_6$ qui est supraconducteur (collaboration ORSAY-COPENHAGUE)

- Les "sandwich" pyridine - TaS_2 .

III.1.3 Fabrication de fils supraconducteur et application industrielle

1) Conception et fabrication des brins supraconducteurs

Nous avons vu qu'un matériau devient supraconducteur, lorsqu'il est maintenu à une température inférieure à une certaine valeur T_c (température critique), soumis à un champ magnétique inférieur à une certaine valeur H_c (champ critique) est parcouru par un courant d'une intensité inférieure à une certaine valeur I_c (intensité ou courant critique) ou J_c (densité de courant critique). Chacune de ces valeurs critiques est en outre fonction des deux autres (figure 11). Le but des alliages est d'obtenir des T_c, H_c, I_c de plus en plus élevées et des relations "f" (par exemple $H_c = f(I_c)$) les plus favorables possibles. Les valeurs de T_c, H_c et I_c et les relations qui les lient, dépendent non seulement de la composition de l'alliage, mais aussi, et très fortement, de sa teneur en impuretés, de son état structural (l'écrouissage et autres défauts de structure favorisant la supraconductivité), de son traitement thermique.

Historiquement, ce sont les alliages Nb-Zr qui furent les premiers fabriqués industriellement, mais ils ont été totalement supplantés par les Nb-Ti, qui, non seulement ont des meilleures propriétés globales,

mais sont aussi beaucoup plus ductiles. Les propriétés du Nb₃Sn sont jusqu'ici inégalées; malheureusement, il s'agit là d'un composé intermétallique extrêmement fragile dont la mise en forme en tant que tel, est quasi impossible. Pour le mettre en oeuvre, il faut donc recourir à des procédés très spéciaux, ce qui freinent son développement et le relèguent pour l'instant au second plan. Malgré qu'il ait des propriétés moins performantes, le Nb-Ti doit son développement privilégié à sa ductibilité exceptionnelle qui autorise un coétirage avec d'autres matériaux permettant ainsi l'obtention de fil, donc la possibilité de faire des bobinages.

La conception industrielle d'un brin supraconducteur sera fonction de son utilisation en courant continu, ou en régime variable avec champ magnétique local variant également (cryoalternateur ou aimants pulsés). Les performances exigées et le mode de fonctionnement du conducteur vont donc définir la composition et la structure du brin supraconducteur.

La stabilité du conducteur impose une réduction de la taille des filaments et la présence d'un matériau hautement conducteur autour de chaque filament. Le rapport section matrice/section supra peut être déduit de ce critère.

La section finale du brin, le nombre de filaments et leur diamètre seront définis à partir de la valeur du courant que le conducteur doit transporter.

En régime variable, il est nécessaire également de réduire les pertes : filaments très fins pour réduire les pertes hystérétiques, torsadage du brin, augmentation de la résistivité électrique transverse.

Dans la définition de la structure du brin, il est également nécessaire de tenir compte du critère de rupture et choisir une disposition des filaments permettant une réduction des risques de rupture au cours des transformations. Actuellement, la fabrication des brins est réalisée à partir de quelques dizaines à plusieurs dizaines de milliers de filaments de Nb-Ti ayant des diamètres de moins de 1 µm à une cinquantaine de µm. Ces filaments sont noyés dans une matrice de cuivre pure (figure 13 b) pour les conducteurs utilisés en régime continu ou dans une matrice mixte cuivre et cupronickel (figure 13 c), pour ceux destinés à une utilisation en champ pulsé ou variable.

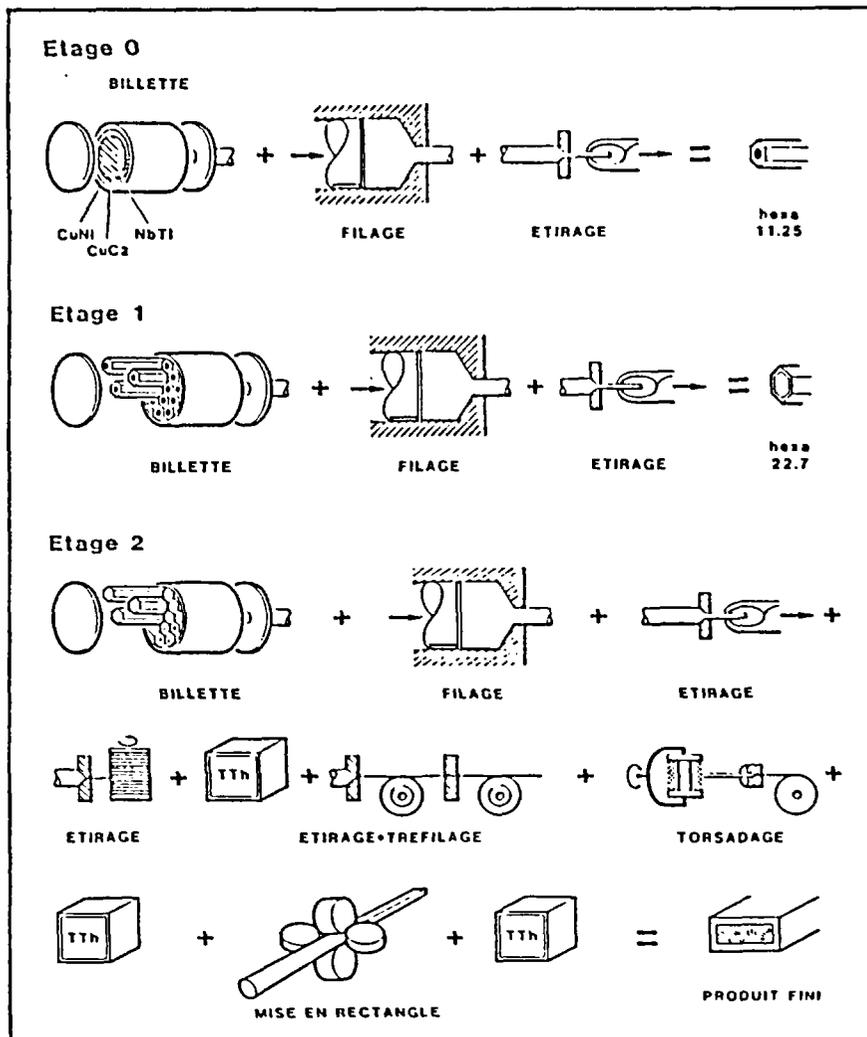
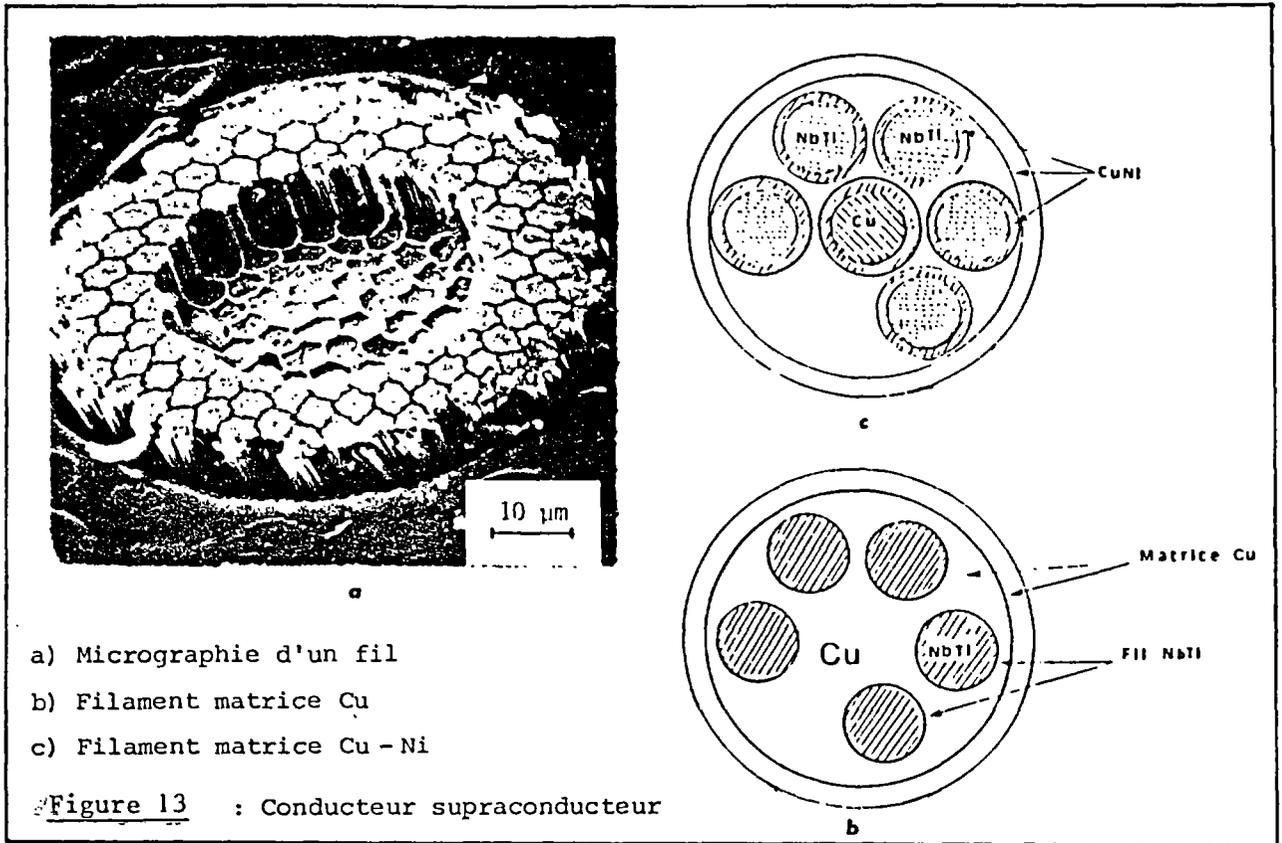


Figure 14 : Fabrication d'un brin supraconducteur

Les alliages de Niobium-Titane utilisés en pratique contiennent généralement 40 à 50 % en poids de titane de structure B cubique centrée. La fabrication des brins supraconducteurs s'effectue par des moyens de transformation conventionnels : filage, étirage et tréfilage. Suivant la structure du brin, la fabrication peut être réalisée en une ou plusieurs étapes. On trouvera à la figures 14 les différentes étapes de fabrication d'un brin supraconducteur.

Dans chaque étape, les billettes composites (10 à 200 kg) sont filées à chaud (500 à 600°C) puis étirées et tréfilées, pour aboutir soit à des barreaux composites, constituant les billettes de l'étape suivante, soit pour arriver au diamètre final. Ces billettes sont constituées d'un corps de cuivre ou de cupronickel contenant un certain nombre de tiges Nb-Ti couverte ou non de cuivre ou de cupronickel. Au cours des transformations de la dernière étape, le brin subit un certain nombre de traitements thermiques pour acquérir les caractéristiques supraconductrices et pour restaurer les propriétés mécaniques et électriques de la matrice. Après le filage, les barres sont redressées avant leur introduction dans la filière du banc à étirer pour l'obtention de barres hexagonales destinées à l'étape suivante. Après la dernière étape d'étirage et après passage éventuel au bull block pour diminuer encore le diamètre des barres, le produit après traitement thermique passe dans des tréfiloirs simples ou multipasses pour obtenir des diamètres de fil allant de 2 à 0,8 mm. En fin de parcours, une opération de torsadage est effectuée, si cela est nécessaire au produit. Tout au long de ces étapes des contrôles par un appareil à courant de Foucault permettant de déceler des inclusions et des défauts de surface sont effectués.

Le tableau ci-dessous donne les performances obtenues sur des conducteurs Nb-Ti à matrice cuivre.

Nombre de filaments	Cu/Supra	ϕ brin mm	ϕ filament μm	$J_c \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ 4,2 °K - 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$		
				2 T	5 T	8 T
666	43	0,33	1,7	3 883	2 027	815
4 080	1,7325	0,605	5	5 820	3 042	1 216
14 496	1,784	0,12	0,6	5 003	1 994	647
12	6,6	0,12	10	1,8 °K / 11 T 1 195 A / mm ²		

2) Principales applications des supraconducteurs

Les applications de la supraconductivité à 4 K se sont d'abord développées dans le contexte de la physique des particules de haute énergie comme le montrent le tableau 1. Aujourd'hui, elles ont largement débordé ce cadre mais force est de constater que le seul matériau réellement utilisé à l'échelle industrielle est le Niobium Titane. Le Niobium-Etain qui permet théoriquement d'atteindre des champs magnétiques de l'ordre de 15 T avec des marges de sécurité de températures supérieures à celles du Nb-Ti est très difficile à mettre en oeuvre à grande échelle : les exemples du solénoïde (10 t. environ) du Lawrence Livermore Laboratory (USA) ne sont pas concluants : le premier n'a jamais été mis en service opérationnel et la deuxième n'est pas supraconductrice même si elle atteint son courant nominal au prix de pertes intolérables en régime permanent. Les seules applications satisfaisantes du Nb_3Sn concernent de petits solénoïdes à fort champ magnétique.

2.1 Détecteurs de particules

Ces appareils servent en analyse des collisions de particules de haute énergie pour mettre en évidence l'existence et les caractéristiques des sub-particules constitutives. Ils utilisent généralement un champ magnétique dans un volume atteignant souvent plusieurs dizaines de mètres cubes.

Aleph, par exemple, l'un des quatre détecteurs en cours d'installation au CERN comporte un solénoïde supraconducteur ($NbTi$) d'environ 5 mètres de diamètre et 5 mètres de hauteur.

Un autre exemple est fourni par la grande chambre à bulles (BEBC, Big European Bubble Chamber) utilisée au CERN de 1974 à 1984. L'aimant supraconducteur comportait deux bobines ($NbTi$) de cent tonnes chacune dans un cryostat d'acier inoxydable (316 LN) de deux cents tonnes. L'exploitation de BEBC est un des éléments de la démonstration de la fiabilité possible en cryoélectricité et de sa compétitivité économique dès que des champs magnétiques continus sont nécessaires dans de grands volumes.

"Plus grand aimant du monde ayant duré le plus longtemps....il a

fonctionné 24 000 heures à plein courant (5 700 Ampères). Son premier refroidissement complet avait été effectué en novembre 1974. Dès lors, soit depuis plus de 9 ans, l'aimant est resté emmuré à l'intérieur de ses cryostats sans jamais nécessiter une intervention quelconque. Aujourd'hui, le livre comptable des dépenses de BEBC montre que le coût de la consommation totale d'énergie de cet aimant supraconducteur, depuis sa mise en service, est de l'ordre de 4 millions de francs suisses chiffre modeste si l'on sait que la consommation d'un aimant classique équivalent aurait atteint, pour le même laps de temps, la somme coquette de 115 millions de francs suisses".

2.2 Accélérateurs et collisionneurs de particules

Depuis 1930, le développement des accélérateurs a permis de passer du méga au téra électron-volt, soit un gain de 10^6 en une soixantaine d'années. Ce gain a été obtenu par l'augmentation des rayons de courbure des trajectoires et par celle des champs magnétiques utilisés. La conjugaison de ces deux facteurs a mené les aimants utilisés dans le domaine de compétitivité de la supraconductivité à 4 K.

Le LHC (Large Hadron Collider) dont le projet se précise utilisera des dipôles et quadripôles supraconducteurs à haut champ : le choix entre Niobium-Titane et Niobium-Etain n'est pas encore fait.

Le plus gigantesque projet existant est celui du SSC (Superconducting Super Collider) aux Etats-Unis. Le diamètre de l'anneau est d'environ 30 km et il comporte près de 8 000 dipôles supraconducteurs Nb-Ti, 5 T, environ 2 000 tonnes de fil).

2.3 Aimants pour l'étude de la fusion thermo-nucléaire contrôlée

Ces tokamaks nécessitent des champs magnétiques aussi élevés que possible dans des volumes de plusieurs dizaines, voire centaines, de mètres cubes. Autant dire que la technologie classique est économiquement exclue et que la seule solution raisonnable aujourd'hui est l'emploi de la supraconductivité pour les principales machines en construction ou en projet.

Tore Supra, du programme européen de fusion, a commencé ses essais au printemps 1988, au centre d'études nucléaires de Cadarache près d'Aix

en Provence. La machine comporte 18 solénoïdes identiques formant le tore de confinement (50 tonnes de Nb-Ti à 1,8 K et 9 T).

2.4 Aimants pour l'imagerie par résonance magnétique

L'imagerie par R.M.N. nécessite un champ magnétique d'une très grande homogénéité dans le volume observé. Actuellement, il existe dans le monde environ 1 500 systèmes d'imagerie médicale utilisant des champs magnétiques allant de 0,1 à 4 T. Pratiquement, tous les systèmes à champ supérieur ou égal à 0,5 T, utilisent des bobines supraconductrices moins coûteuses que toute autre technologie connue tant à la construction qu'à l'exploitation.

2.5 Stockage magnétique d'énergie

L'idée de stockage d'énergie dans de grandes bobines supraconductrices a été lancée par EDF en 1970 en vue de la "couverture" des pointes de consommation des grands réseaux. La démonstration a malheureusement été interrompue en 1984 par la crise de l'énergie aussi ne dispose-t-on pas de résultats complets bien que l'ensemble du matériel ait subi des essais satisfaisants.

2.6 Lévitiation magnétique

La presse a rapporté les expérimentations japonaises à ce sujet : 517 km/h en 1984, 250 km/h plus récemment avec un "train" de taille standard. D'aucuns pensent que le développement de ce système est retardé par les sujétions cryogéniques pour le matériel embarqué. Il n'en est rien et la réussite japonaise en matière d'adaptation de bobines supraconductrices et de liquéfacteurs d'hélium aux véhicules terrestres est tout à fait remarquable.

L'objection réelle est de nature économique :

La consommation par passager/kilomètre d'un véhicule du type japonais à 300 km/h est intermédiaire entre celle de l'avion et celle de la voiture particulière : c'est environ 10 fois la consommation d'un TGV à roues....

2.7 Alternateur à inducteur supraconducteur

Trois grands programmes de développement sont en cours à l'heure actuelle : en RFA, en URSS et au JAPON.

Dans tous les autres pays les programmes lancés au cours des années 70 ont été stoppés par la crise de l'énergie en 82 et 83. Il faut rappeler les succès remarquables obtenus par General Electric avec sa machine de 20 MVA et par Alsthom avec son rotor de 350 MW (essayé en 81 et 82).

2.8 Tri magnétique

Il n'y a pour l'instant qu'une application industrielle aux USA par la société Eriez Magnetics (Kaolin de Géorgie) mais de nombreuses évaluations expérimentales sont actuellement en cours pour déterminer les marchés porteurs de ces équipements avant de passer à des essais de prototypes.

2.9 Aimants pour analyses

En dehors des machines, généralement de grandes dimensions qui ont été signalées dans les paragraphes précédents, il existe de très nombreux petits électro-aimants de laboratoire utilisés pour des analyses diverses : séparation magnétique, diffraction neutronique, spectroscopie de masse, analyses par résonance magnétique.

3 - Nouvelles applications à court et moyen termes

Les progrès en cours sur les matériaux devraient conduire à des applications nouvelles à court et moyen terme :

- Machines à courant alternatif entièrement supraconductrices
- Groupe alternatif supraconducteur (GRASC) : transformateur, induit-triphasé, régulateur
- Pré-disjoncteur et limiteurs de courants
- Redresseurs
- Stockage et transport supraconducteur d'énergie.

Ce sont sans doute les domaines les plus prometteurs à court terme. Toutes les évaluations de machines faites à partir des performances

mesurées des fils au Niobium-Titane à fréquence industrielle montrent que ces machines devraient surclasser de loin toute machine classique de même fonction à l'un au moins des cinq points de vue suivants :

a) Légèreté : - les masses peuvent être divisées par un facteur supérieur ou égal à 3.

b) Capacité : - Les volumes peuvent être divisés par un facteur supérieur ou égal à 2.

c) Rendement : - Les pertes, en tenant compte des puissances des réfrigérateurs d'hélium, peuvent être divisées par un facteur supérieur ou égal à 3.

d) Vibrations et bruits : - Ils peuvent être réduits, d'une manière pas encore quantifiée, en raison de l'allègement, voire suppression de circuits magnétiques, et de la suppression dans certains cas de réducteurs mécaniques.

e) Temps de réponse : - Ils sont au moins dix fois plus brefs que ceux des machines classiques en raison de la suppression d'enroulements amortisseurs qui seraient ici inefficaces et inutiles.

III.1.4 Réfrigération

La technologie des aimants supraconducteurs et des systèmes cryogéniques associés a fait des progrès très importants depuis une dizaine d'années et voit son domaine d'utilisation progresser rapidement dans les laboratoires de physique pour des applications illustrées par les accélérateurs de particules, les machines de confinement de plasma pour la fusion contrôlée et de nombreux autres aimants supraconducteurs de toutes dimensions.

Cependant, il y a peu d'applications industrielles en dehors des laboratoires de recherche, à l'exception très notable des aimants utilisés en RMN, pour l'imagerie médicale et la spectroscopie haute résolution.

A) Consommations cryogéniques

Suivant le procédé de réfrigération choisi, réservoirs enthalpiques ou réfrigérateurs, la consommation peut s'exprimer en débit de fluides cryogéniques ; hélium, azote liquide ; ou en watts à un ou plusieurs niveaux de température. La consommation d'un système cryomagnétique est produite par la somme des apports de chaleur. On peut distinguer les apports thermiques cryostatiques et les apports thermiques dus au système magnétique.

a) Apports de chaleurs cryostatiques

Les techniques d'isolations thermiques des systèmes à hélium liquide sont aujourd'hui bien établies :

- vide poussé dans une double enceinte.
- Un ou plusieurs écrans anti-rayonnements.
- Superisolation multi-couches.
- Supports isolants.

Parmi les principaux paramètres qui gouvernent les entrées de chaleur, l'on peut citer :

* Pour le rayonnement, la surface externe du réservoir d'hélium liquide. Des flux de chaleur inférieurs à 50 mW/m^2 sont maintenant couramment obtenus.

* Pour les systèmes de support, les forces exercées :

- Le poids du système magnétique et du réservoir à 4,2 K.

Il faut prendre en compte également les régimes de vibrations éventuelles auxquelles le système peut être soumis.

- Les forces électromagnétiques entre la bobine et son environnement telles que les forces ferromagnétiques et les autres aimants.

Le système de support inclut, en outre, les espaceurs qui préviennent les contacts thermiques internes. Ces espaceurs, notamment utilisés dans les régions centrales des bobines apportent fréquemment une contribution non négligeable dans le bilan des apports de chaleurs due à leur rapport d'aspect défavorable. Les entrées de chaleur sur le bain hélium peuvent être très sensiblement réduites en utilisant une source froide annexe, azote liquide ou cryogénérateur, pour le refroidissement des écrans et la thermalisation des supports.

b) Apports thermiques dus au système magnétique

* Liaisons électriques

Pour monter le courant dans les enroulements supraconducteurs, ceux-ci sont reliés à une alimentation électrique extérieure au système cryogénique. Cette liaison électrique produit un apport thermique qui est fréquemment la cause très prépondérante de la consommation. L'apport de chaleur est proportionnel au courant nominal. Ainsi, les amenées de courant d'une bobine ayant un courant nominal de 1 kA produisent l'évaporation de 3,3 litres par heure à plein courant et 2 litres à courant nul. On cherche donc à utiliser des courants faibles, mais la valeur est en pratique imposée par les conditions de construction et de fonctionnement du système magnétique.

* Autres pertes

Pendant les variations de courant, le niveau de consommation est augmenté du fait des courants induits. Cette contribution est généralement très limitée. Les apports thermiques proviennent principalement des liaisons électriques et aussi de la consommation cryostatique. Pour donner quelques ordres de grandeur des aimants supraconducteurs de 20 cm d'ouverture et de 50 cm de long pourront présenter, selon le courant nominal, des consommations totales d'hélium liquide dans une gamme de 0,1 à 0,5 l/heure, si l'on utilise une garde à l'azote liquide. On voit qu'il n'y a pas de relation directe entre l'induction magnétique développée par l'aimant et la consommation cryogénique. Par voie de conséquence, le gain économique d'un aimant supraconducteur sur un aimant conventionnel sera d'autant plus grand que le champ magnétique de fonctionnement sera élevé.

B) Réfrigération

a) Réservoirs enthalpiques

En associant des réservoirs d'hélium et d'azote liquides, on peut atteindre des autonomies de fonctionnement entre remplissages compris entre quelques jours et quelques mois suivant le dimensionnement. A noter, cependant, que l'augmentation de dimensions (surface) augmentent dans même temps, la consommation de l'ensemble. D'autre part, les

remplissages en hélium sont des causes de consommation importante (pouvant atteindre 20 % de la quantité transférée). Des dispositifs de transfert à faibles pertes sont actuellement mis au point et testés. Ils pourront dans l'avenir apporter une solution intéressante.

Ce procédé sera valable surtout si l'on a atteint un niveau de consommation très bas. Il prend tout son intérêt dans les systèmes cryomagnétiques utilisant la technique des amenées de courants débouchables. Plusieurs variantes devront être examinées dans la mise en oeuvre de ce procédé.

- Utilisation d'azote liquide
- Association d'un cryogénérateur pour obtenir l'autonomie en azote liquide ou supprimer son emploi.
- Association d'un cryogénérateur à deux étages pour refroidir un écran à 20 K.
- Intégration des réservoirs au cryostat ou utilisation de réservoirs séparés.
- Récupération ou non de l'hélium vaporisé. Suivant la consommation et le système de réfrigération choisis, le rejet à l'atmosphère du gaz vaporisé occasionne une dépense plus ou moins importante dans le fonctionnement. Des dispositifs de récupération maintenant commercialisés (Air liquide par exemple) permettent le recyclage immédiat ou la revente du gaz qui est placé dans des conteneurs HP (unités mobiles récupérant dans une bache de rétention le gaz vaporisé qui sera ensuite comprimé et stocké en bouteilles).

b) Réfrigérateur hélium associé

Une disposition particulièrement attractive est d'associer un réfrigérateur à l'aimant cryogénique pour atteindre l'autonomie complète. Les systèmes à réservoirs enthalpiques demandent, en effet, des manipulations au moment des rechargements de la réserve, ainsi que des risques d'introduction d'impuretés susceptibles de boucher les lignes de transfert. Une compétence d'opérateur en cryogénie est alors parfois nécessaire pour assurer le bon fonctionnement continu. Il est à noter cependant que cette contrainte semble être bien surmontée actuellement dans l'exploitation des aimants cryogéniques utilisés en I M R.

Dans le cas du fonctionnement continu d'un système magnétique, de

consommation cryogénique importante, la question devient aisée à trancher. Par exemple, sur la base de 40 Francs le litre d'hélium liquide à gaz perdu, et d'une consommation continue de 5 litres/heures, le budget annuel serait de 1,7 millions de francs, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur du coût du réfrigérateur. La question du bilan économique ne se posera donc que pour les systèmes à faible consommation, inférieure à 2 litres/heure environ. Il est à noter que les réfrigérateurs de petites puissances à 4,2 K sont pratiquement inexistantes sur le marché, et que le coût d'une machine n'est pas directement proportionnel à sa puissance et que le domaine des petites puissances n'est ni simple ni économique. Les petites installations doivent comporter évidemment les mêmes fonctions de processus que les grosses ; compresseurs, ligne d'échange, machines de détente, vannes et systèmes de contrôle. De plus, du fait des dimensions réduites, elles deviennent plus sensibles aux conditions de pureté du gaz du cycle.

Cet effet de taille est très apparent en ce qui concerne les machines de détente. Pour les unités importantes, au-dessus de 100 litres/heure, l'utilisation de turbines de détente est largement adoptée. En dessous de 20 litres/heure, la miniaturisation des turbines devient difficile et on utilisera alors des détenteurs à piston. Pour les plus petites puissances, en dessous de 4 litres/heures, les détenteurs à piston deviennent aussi problématiques et on sera conduit à rechercher d'autres technologies ; l'emploi de cryogénérateurs reposant sur des cycles Stirling peut apporter une solution satisfaisante. Ces cryogénérateurs actuellement bien développés pour les pompes cryogéniques fournissent généralement des puissances de quelques watts vers 15 K et plusieurs dizaines de watts à 80 K. Il suffit d'associer un circuit Joule-Thomson (compresseur, ligne d'échange, vanne de détente) pour obtenir un réfrigérateur complet. La puissance disponible à 80 K pouvant être utilisée pour thermaliser les écrans, cet ensemble peut assurer l'autonomie complète de maintien en température ; bien qu'il sera souvent nécessaire d'utiliser un apport d'hélium liquide pour effectuer la mise en froid. L'autonomie complète du système implique aussi une automatisation complète des installations cryogéniques et magnétiques. Les équipements de contrôle basés sur les microprocesseurs sont actuellement parfaitement adaptés à cette fonction. C'est cette solution qui a été retenue pour équiper le dispositif supraconducteur de séparation qui a été étudié et développé au CEN-SACLAY en collaboration étroite avec le CRVM et qui a pu démontrer la fiabilité, l'efficacité et

le peu de maintenance du procédé (caractéristiques les plus importantes recherchées par l'utilisateur). (contrats MRT 80-7-0424 et 81 D 1104).

Enfin, à la question souvent posée "Peut-on aujourd'hui introduire dans les milieux de production industrielle des systèmes cryomagnétiques fiables et d'utilisation aisée ?", une réponse peut résider dans le degré d'autonomie d'un appareillage vis-à-vis des sources fluides cryogéniques et des spécialistes. La démonstration a été faite, il y a quelques années et s'est ensuite concrétisée industriellement par la commercialisation, par la société Air Liquide d'un liquéfacteur d'hélium (7 à 14 litres/heures) à fonctionnement entièrement automatique nécessitant seulement de la part de l'opérateur le choix du mode de fonctionnement et l'ordre de démarrage.

Il est à noter également que certains nouveaux cryostats composites ont des pertes d'environ 0,5 l d'He liquide/jour et que les cryostats plastiques ont une perte d'environ 1 litre He/jour.

On trouvera au tableau suivant un résumé des principales causes de consommation et les moyens d'y remédier (tableau 5).

III-2 Evolution de la supraconductivité : les matériaux à haute température critique

III.2.1 Développement en cours sur les matériaux

Les supraconducteurs de type II peuvent opérer dans de forts champs avec de forts courants et représentant la catégorie la plus intéressante du point de vue technologique.

A l'heure actuelle, parmi les matériaux supraconducteurs métalliques, celui qui a la température critique la plus élevée est le Nb_3Ge (24 K), mais des matériaux comme le Nb_3Sn et surtout le $NbTi$ ont une technologie plus avancée. Le $NbTi$ est actuellement le matériau le plus utilisé, grâce à ses propriétés métallurgiques très favorables (facilement étirable). En effet, entre ses trois propriétés fondamentales (T_c , H_c , J_c), un matériau supraconducteur industriellement intéressant doit satisfaire aux contraintes suivantes :

- Facilité de création de paires de Cooper

TABLEAU 5

Systèmes Cryogéniques	Consommations Cryogéniques (He liquide)	Causes des consommations	Possibilités de diminution des consommations ou des coûts de fonctionnement.
Système ouvert : réservoirs enthalpiques	<p>Suivant taille, matériaux cryostatique, conception cryogénique et magnétique (champ permanent : technique des courants persistants).</p> <p>0,03 à 5 l/h</p>	<p>* Matériaux de structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Propriétés physiques : chaleur spécifique, dilatation, conductivité thermique. - Propriétés optiques : émissivité, absorptivité, rayonnement. <p>* Conception :</p> <p>Réservoir, isolation, supports, tuyauteries, dispositif de transfert.</p>	<p>* Optimisation des cryostats.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Choix des matériaux composites pour le cryostat et ses composants (plastique de type verre + époxy par exemple). - Choix de l'isolation (sous vide ou isolants stratifiés) - Ecran antirayonnement (superisolant ou traitement de surface). - Source froide (azote) : refroidissement des écrans, thermalisation des supports. - Joints froids élastiques.
Systèmes à Réfrigération: Réfrigérateur- liquéfacteur hélium associés	<p>Très faible à pratiquement nulle</p>	<p>* Apports thermiques cryostatiques:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Systèmes de supportage : poids et forces magnétiques. - Surface externe du réservoir : rayonnement - Tuyauterie, jonctions internes. <p>* Apports thermiques magnétiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Liaison électrique, courant nominal, - Conditions de construction et de fonctionnement du système magnétique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aménée multicourant (faible section). - Connecteurs froids d'ébrochables (champ permanent) - Interrupteurs supraconducteurs. - Systèmes de refroidissement par gaz d'évaporation. <p>* Optimisation des lignes de transferts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ecrans thermiques refroidis par vapeurs froides à l'aide d'échangeurs.
<p>TECHNIQUES CRYOGENIQUES</p>			<ul style="list-style-type: none"> * Utilisation de réfrigérateurs montés sur le cryostat (refroidissement des écrans ou autonomie azote). * Utilisation d'unité mobile de récupération des gaz (système Zodiac de compression, stockage, revente) * Utilisation de reliquéfacteur intégré ou de réfrigérateur-liquéfacteur compact.cryogénérateur. * Optimisation du circuit magnétique : Faible diamètre de conducteur, grand nombre de spires, alimentation faible courant.

- Résistance mécanique importante si l'on veut utiliser le matériau sous grands champs avec de fortes courants (contraintes internes importantes).

- Stabilité chimique

- Possibilité de mise en oeuvre technologique (filage, étirage, frittage, gainage, dépôt en couches minces.....).

Toutes les applications actuelles, relèvent de la supraconductivité comme on le voyait au début des années 1980. Il s'agit d'une cryoélectricité presque exclusivement fondée sur les applications du NbTi en courant continu. Cette cryoélectricité est, comme nous l'avons vu, maintenant bien maîtrisée, elle continue à se répandre et à se perfectionner.

Au contraire, depuis le milieu des années 1980 sont apparus des produits nouveaux qui élargissent le champ d'application de la cryoélectricité à deux points de vue :

- La mise au point maintenant accomplie de conducteur en NbTi utilisable de manière économique à 4 K en courant alternatif de fréquence industrielle ouvre à la cryoélectricité tout le champ des applications industrielles jusqu'ici limité au courant continu.

- La découverte des matériaux dit "à haute température critique" est de nature à abaisser les seuils de compétitivité des cryoéquipements donc à élargir vers les machines de taille moyenne, voire petite, le domaine d'application de la cryoélectricité.

Actuellement, les recherches et développements en cours sur les matériaux supraconducteurs s'effectuent selon les axes suivants :

- Augmentation des températures critiques (T_c)
- Augmentation des champs magnétiques critiques (H_c)
- Augmentation des densités de courant critique (J_c)
- Maîtrise de fonctionnement à fréquence industrielle
- Maîtrise de fonctionnement à régime de transition.

Il faut admettre que les récentes découvertes annoncées dans le domaine de matériaux supraconducteurs ne correspondent qu'à la mise en évidence de température critique très intéressante pour des matériaux

céramiques dont les performances et contraintes de mises en oeuvre posent encore d'importants problèmes.

Ces matériaux ont fait passer en quelques mois la température à laquelle apparaît l'effet supraconducteur de 23 K à 98 K comme le montre la figure 15.

III.2.2 Phases de Chevrel

Outre les matériaux métalliques comme le Nb₃Sn ou le Nb-Ti utilisés pour champs élevés, à fréquence industrielle ou en régime de transition, des matériaux de synthèse ont été mis au point à RENNES dans les années 70 par les professeurs CHEVREL et SERGENT. Comme les céramiques, ils se présentent sous forme de poudre et la composition chimique la plus simple est PbMo₆S₈ (Plomb-molybdène-soufre).

La poudre PbMo₆S₈ est supraconductrice avec une température critique de l'ordre de 15 K mais son intérêt principal vient d'un champ critique voisin de 60 Teslas : on peut donc espérer produire des conducteurs à phase de Chevrel utilisables dans des champs magnétiques très supérieures à ceux du Niobium-Titane (par exemple 30 Teslas au lieu de 8 à 4,2 K).

La connaissance de ces matériaux a beaucoup progressé depuis 10 ans et plusieurs équipes savent aujourd'hui que des fils de longueur kilométrique sont capables de supporter des densités de courant de 10^8 A/m² dans des champs de 20 T.

Il reste cependant encore beaucoup à faire. D'une part, les courants critiques supérieurs sont nécessaires et d'autre part les fils obtenus sont fragiles et se prêtent mal aux opérations de fabrication industrielle de bobinages. L'opération EUREKA 96 qui implique Suisse, Autriche, Hollande et France vise à la mise au point dans les quatre ans d'un fil utilisable industriellement.

III.2.3. Matériaux à haute température critique (HTC).

A) Supraconducteurs organiques

Pour obtenir une hausse appréciable de la température critique, on a cherché à développer des supraconducteurs de nature différente, en

particulier des molécules de polymères organiques ramifiées à longue chaîne.

Les molécules les plus performantes mises au point à ce jour sont à base de BEDT-TTF (biséthylénedithiotetrathiofulvalène) ou le Tetraméthyltétrasélénafulvalène hexafluorophosphate (TMTSF)₂ PF₆.

Cependant, il semble que la température critique la plus élevée atteinte à ce jour avec ce type de composés ne dépasse pas 10 K.

B) Les céramiques supraconductrices

On assiste depuis quelques années à un phénomène sans précédent dans la communauté scientifique internationale. Des centaines de chercheurs dans le monde se sont lancés dans l'étude d'une famille de matériaux surprenants, aux propriétés qui semblaient hors d'atteinte. Ces matériaux céramiques d'oxydes métalliques sont supraconducteurs au dessus de la température d'ébullition de l'azote liquide. (77 K ou -196 °C).

La grande presse a relaté la découverte en 1986 de céramiques supraconductrices à "hautes températures critiques". Cette découverte a été une révolution dans le microcosme des physiciens du solide et des spécialistes de la supraconductivité. Cette révolution est loin d'avoir atteint les praticiens du développement d'application qui ne suivent généralement pas la presse dans l'expression de perspectives visiblement trop optimistes.

Le phénomène de supraconductivité dans des céramiques, dans un domaine de température allant de 13 à 35 K, a été mis en évidence en février 1986 par A. MULLER et J.C. BEDNORZ au laboratoire de recherche d'IBM à ZURICH.

Les matériaux sur lesquels ils travaillaient, de formule :



avaient été développés par des chimistes français de l'Université de Caen, Claude MICHEL et Bernard RAVEAU dans le cadre de travaux de recherche sur les condensateurs céramiques multicouche.

La publication, prudente, des résultats obtenus en septembre 1986, dans *Zeitschrift für Physik B*, suscita au départ assez peu de réactions. Deux équipes (une japonaise : Pr. TANAKA, Université de TOKYO, l'autre américaine: Pr Ching WU CHU, Université de HOUSTON) engagèrent sur leur base des travaux qui confirmèrent rapidement des résultats des chercheurs d'IBM en les améliorant.

Depuis, un nombre considérable d'équipes de recherches se sont focalisées sur ce sujet dans le monde. Les températures critiques réalisables connaissent un glissement quasi continu vers le haut : les 100 K semblent acquis. L'espoir de disposer à moyen terme de matériaux supraconducteurs au voisinage de la température ambiante ne semble plus relever de l'utopie.

Les résultats partiels actuels sont caractérisés par les éléments principaux suivants :

- Chimiquement, les composés qui apparaissent comme les plus intéressants sont du type :



avec :

R = La, Y ou lanthanides : Samarium - Europium - Gadolinium -
Dysprosium - Holmium - Ytterbium -

X = Ba, Sr,.....

- Tous ces composés ont une structure du type perovskite dont des exemples types sont Mg (SiO₃) ou Ba (TiO₃).

Dans les minéraux naturels de ce type, on trouve 3 atomes d'oxygène pour 2 atomes métalliques.

Dans les composés nouveaux intéressants, il y a défaut d'oxygène avec, en général, entre 6,5 et 7 atomes d'oxygène pour 6 atomes métalliques.

En dessous de 6,5 atomes d'oxygène, ces composés deviennent des

semi-conducteurs.

- La structure ainsi obtenue a un caractère bidimensionnel qui entraîne une anisotropie des propriétés supraconductrices, la densité de courant critique étant la plus élevée parallèlement aux plans de la structure que perpendiculairement à ces plans.

Le tableau 6 indique les températures critiques homologuées jusqu'ici et leurs éléments constitutifs.

ELEMENTS CONSTITUTIFS	T ⁰ CRITIQUE	
	K	°C
Lanthane - Strontium - Cuivre - Oxygène.....	36	- 237
Baryum - Lanthane - Cuivre - Oxygène.....	40	- 233
Yttrium - Baryum - Cuivre - Oxygène.....	95	- 178
Bismuth - Plomb - Strontium - Calcium - Cuivre - Oxygène.....	108	- 165
Thallium - Baryum - Calcium - Cuivre - Oxygène....	126	- 147

TABLEAU 6 : TEMPERATURES CRITIQUES DES CERAMIQUES SUPRACONDUCTRICES

Il y a certainement là une grande nouveauté puisque de 1911 à 1986, les températures critiques ont stagné en-dessous de 23 K (Niobium - Germanium - Aluminium) et que les supraconducteurs étaient métalliques à deux exceptions près (supraconducteurs organiques et phases de CHEVREL). Depuis 1986, de nombreux théoriciens, physiciens et chimistes, se sont replongés dans la supraconductivité et la communauté scientifique et technique mondiale a reconnu de nombreux problèmes à résoudre avant d'en arriver à des applications de ces céramiques.

a) Les pérovskites et caractérisation des phases supraconductrices

Initialement la pérovskite était un minéral précis, un titanate de calcium, mais le terme de pérovskite désigne aujourd'hui un ensemble de

composés possédant tous un même arrangement atomique. Les pérovskites sont les minéraux les plus abondants sur Terre ; les géologues les utilisent pour étudier l'histoire de notre planète. Leur potentiel industriel est immense et fascinant, notamment parce que, naturelles ou synthétiques, les pérovskites ont des propriétés électriques variées. Alors que les cristaux ont généralement des propriétés électriques bien définies, les pérovskites ont des résistivités électriques très variables: on connaît des pérovskites isolantes, semiconductrices, conductrices ioniques (où l'ensemble des ions, plutôt que les électrons seuls, migrent dans le cristal), conductrices de type métallique et supraconductrices à haute température. Ces matériaux sont les composants de base de l'industrie des électrocéramiques, dont le chiffre d'affaire annuel atteint 100 milliards de francs ; cette valeur pourrait être bientôt faible par rapport au chiffre d'affaires des systèmes supraconducteurs.

Pourquoi les pérovskites ont-elles des propriétés particulières ? Les défauts cristallins à l'origine des propriétés supraconductrices nous l'indiquent : des modifications mineures de la structure pérovskite idéale produisent souvent de nouvelles caractéristiques physiques. On ne connaît cependant pas les modifications de propriétés physiques dues à des variations de la structure cristalline ; notamment on ne sait pas encore prévoir la conductivité électrique d'une pérovskite de composition donnée. Toute modification de la structure pérovskite idéale est une occasion d'obtenir de nouvelles propriétés, électriques par exemple, mais des pérovskites est encore pleine d'imprévus.

On savait, depuis 1964, qu'un certain nombre de céramiques telles que SrTiO_{3-x} , Na_xWO_3 , $\text{Li}_{1+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_4$, $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ avaient un caractère supraconducteur. Des températures critiques de 13 K avaient été atteintes pour les deux premières familles.

Les céramiques supraconductrices "haute température" synthétisées ces dernières années appartiennent quant à elles à deux grandes familles:

La famille La-X-Cu-O ($X = \text{Ba}, \text{Sr} \dots$) pour laquelle T_c est voisine de 40 K.

La famille R-Ba-Cu-O ($R = \text{Y}, \text{lanthanides autres que le lanthane}$) pour laquelle T_c est supérieur à 90 K.

Les études par diffraction des rayons X ont permis de montrer que les premiers matériaux synthétisés par les pionniers (Muller, Chu, Tanaka) étaient constitués d'au moins trois phases dont une seule était supraconductrice, ce qui explique la largeur de la transition. Ces phases supraconductrices sont $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_{4-y}$ et $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ dans chacune des familles.

Toutes ces céramiques supraconductrices ont une structure cristalline de type perovskite. Les perovskites, dont l'exemple type est le titanate de baryum BaTiO_3 , contiennent trois atomes d'oxygène pour deux atomes métalliques. Les composés de type $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, par exemple avec 6 atomes métalliques dans leur formule, devraient donc contenir 9 atomes d'oxygène. Ils n'en contiennent en fait qu'entre 6,5 et 6,9. Ces composés sont semi-conducteurs au dessous de 6,5 atomes d'oxygène par maille. C'est cette déficience en oxygène qui rend ces céramiques normalement isolantes, supraconductrices.

Ces structures sont constituées par l'empilement de trois cubes de type perovskite, chaque cube ayant un atome métallique (Ba, Y, Ba) en son centre, et des sites en oxygène vacants. Ces perovskites peuvent exister sous deux formes allotropiques quadratique et orthorombique avec une transition de phase autour de 750 K.

Des études par diffraction des rayons X et des neutrons ainsi que par microscopie électronique à haute résolution ont permis d'avoir une idée de la répartition des lacunes en oxygène. Les lacunes d'oxygène dans le plan de l'yttrium donnent à la structure un caractère bidimensionnel : le flot d'électrons se fait entre les atomes de cuivre et d'oxygène situés dans les plans Cu-02/03, en raison de la présence de ces lacunes. L'ordre des lacunes d'oxygène dans les plans supérieurs et inférieurs de la maille permet quant à lui un recouvrement des orbitales du cuivre et de l'oxygène selon les chaînes Cu1-01.

Le caractère bidimensionnel de la structure se traduit par une anisotropie des propriétés supraconductrices : la densité de courant critique est beaucoup plus importante parallèlement que perpendiculairement à ces plans.

b) Synthèse des matériaux

Il semble qu'à l'exception de certains résultats qui restent à confirmer, la course aux records de températures critiques ait atteint un plateau. La synthèse de ces oxydes supraconducteurs est encore très empirique. Il n'existe pas de stratégie bien définie pour modifier de façon rationnelle leur composition afin de leur donner les propriétés supraconductrices recherchées, c'est-à-dire une température, un champ et un courant critique élevés.

Leur synthèse et leur mise en oeuvre doivent également progresser pour réaliser des produits utilisables sous forme de dépôts, de fils ou de films, ayant des propriétés reproductibles. Ces propriétés dépendent, en effet, fortement des conditions de préparation des échantillons, en particulier des atmosphères et des cycles thermiques de traitement compte tenu en particulier de la non-stoéchiométrie de ces oxydes.

Les premières céramiques de Bednorz et Muller étaient obtenues par coprécipitation à partir de solutions aqueuses de nitrates de lanthane, de baryum et de cuivre, suivie par une réaction à l'état solide et une décomposition des précipités à 900°C en atmosphère réductrice.

Chu et Tanaka ont préféré utiliser une méthode de synthèse classique à l'état solide qui est celle désormais couramment adoptée. Elle consiste à préparer le matériau de base par calcination entre 900 et 1100°C des oxydes et carbonates : CuO , La_2O_3 , BaCO_3 ou CuO , Y_2O_3 , BaCO_3 ; ceci permet d'éliminer le CO_2 et les autres éléments volatiles. La poudre, obtenue par broyage de ce résidu calciné, peut être ensuite pressée sous forme de disque, puis frittée (consolidation des grains par diffusion) vers 1000°C sous balayage d'oxygène pendant plusieurs heures. Les disques subissent ensuite un recuit, particulièrement important pour leur donner les propriétés supraconductrices souhaitées.

Il semblerait que les caractéristiques optimales (température critique élevée et domaine de transition étroit) soient en effet obtenues à la limite de la stoéchiométrie. Les conditions de refroidissement de la température de frittage à l'ambiante sont donc particulièrement importantes pour permettre au matériau de réabsorber l'oxygène perdu au cours du frittage. Il semble qu'un palier de plusieurs heures entre 400 et 520°C sous atmosphère d'oxygène soit indispensable. Une vitesse de

refroidissement lente après ce palier semble également être importante ($100^{\circ}\text{C}/\text{heure}$).

c) Problèmes rencontrés

Le facteur déterminant, semble-t-il, pour les propriétés supraconductrices est la stoechiométrie vis-à-vis de l'oxygène. Elle est très dépendante de la phase de refroidissement qui suit le recuit et qui doit être très lente. L'une des premières difficultés mises en évidence a donc été celle de la teneur en oxygène dont dépend fortement la température critique : la composition idéale de l' YBaCuO de ce point de vue semble être $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Dans les très nombreuses publications existantes l'indice de l'oxygène va de 4 à 10 selon les conditions de préparation mais seul un indice voisin de 7 conduit à la supraconductivité et à 95 K. Comme tous ces corps échangent facilement leur oxygène, il faut bloquer les mécanismes d'échange et cette passivation n'est pas maîtrisée en général.

Une autre difficulté se présente lorsqu'on veut éviter des mélanges de phase : les céramiques du tableau 6 sont habituellement très faciles à préparer mais on obtient presque toujours des mélanges de phases supraconductrices et non supraconductrices ou de températures critiques différentes.

Troisième grande difficulté, le courant critique obtenu est généralement très petit devant celui des supraconducteurs classiques. En outre, il décroît très vite en présence d'un champ magnétique. Certains résultats très encourageants ont été obtenus sur des couches minces par exemple d' YBaCuO : courants critiques de l'ordre de 10^8 A/m^2 dans des champs pouvant atteindre 1,5 T.

L'étude de courant critique conduit à la notion de courants internes aux grains supraconducteurs et de courants dans les jonctions entre grains : ces courants présentent de très grandes différences attribuées par certains à la présence de phases nocives entre grains et par d'autres à des écarts d'orientation même minimes des axes des réseaux cristallins de grains adjacents. Récemment, on aurait même détecté des variations de courants critiques et de composition chimique à l'intérieur d'un même grain.

La quatrième difficulté, est d'ordre technologique, la mise en forme de ces céramiques pour en faire des produits utilisables (fils, tores,...). C'est un problème de mise en forme des matériaux, intéressant l'industrie de la céramique, et qui risque de ne pas être résolu avant quelques années.

Enfin les propriétés électriques de ces céramiques sont très fortement anisotropes et pour le moment on n'imagine pas comment fabriquer à partir d'elles des composants pratiquement utilisables.

d) Objectif des travaux en cours

Trois problèmes principaux sont à résoudre pour voir utiliser ces matériaux dans des produits :

- Définir des supraconducteurs ayant une température critique T_c plus élevée et synthétiser des matériaux qui puissent résister aux contraintes internes créées par les champs magnétiques.

- Amélioration des performances supraconductrices, en particulier par l'obtention des densités de courant critique (J_c) suffisamment élevé et l'augmentation du champ magnétique critique (H_c).

- Mise en oeuvre technologique des matériaux supraconducteurs.

Jusqu'à présent le premier point était absolument essentiel. Il le demeure, mais la certitude de pouvoir fabriquer des matériaux supraconducteurs à la température de l'azote liquide, maintenant acquise, fait qu'il n'est plus aujourd'hui un point d'échappement pour les développements technologiques de la supraconductivité.

Le deuxième point reste critique pour de nombreuses applications parmi celles évoquées ci-dessus.

A l'heure actuelle, les courants critiques dans les céramiques supraconductrices sont de 10 à 100 fois plus faibles que celui des alliages Niobium-Titane par exemple (quelques centaines ou milliers d'ampères par cm^2 au lieu de 10^5 - 10^6) pour les matériaux massifs.

Cela limite considérablement leurs possibilités d'usage dans les

systèmes électrotechniques où les densités de courant habituelles sont de l'ordre de $10^6 - 10^7$ A/cm².

En couches minces des densités de courant de 10^6 A/cm² ont été atteintes (5×10^6 A/cm² à 4,2 K).

Au niveau du champ magnétique, il semble que les performances actuelles soient déjà très satisfaisantes avec des inductions critiques de plusieurs dizaines de Tesla à 77⁰ K (BELLS a annoncé 50 Tesla à cette température—soit 1 million de fois le champ magnétique terrestre — alors que pour les alliages métalliques supraconducteurs la valeur maximale atteinte était de 35 Tesla pour un alliage Nb-Sn au voisinage de 0⁰ K.

L'élévation de la température critique et l'amélioration des propriétés supraconductrices sont recherchées en examinant des compositions nouvelles (par substitution totale ou partielle des éléments de base par d'autres éléments) et en optimisant, pour une formule donnée, les conditions d'élaboration.

Avec les connaissances actuelles, la démarche suivie reste encore très empirique et un besoin de développements théoriques permettant de mieux comprendre les phénomènes et d'orienter les recherches est généralement ressenti.

Plusieurs équipes de recherche considèrent maintenant que ce qui est essentiel pour le développement technologique des céramiques supraconductrices c'est de surmonter les problèmes mécaniques liés à leur fragilité et de savoir fabriquer des fils par exemple à partir de ces matériaux.

On a ainsi développé des systèmes de gainage métallique ou encore essayé d'extruder des fils de céramiques supraconductrices après les avoir mélangés à un liant organique. Le liant organique peut ensuite être détruit par un traitement thermique approprié.

Jusqu'à présent, les densités de courant obtenues sur les fils ainsi préparés restent très limitées mais en augmentation constante. Récemment une société anglaise, BASIC VOLUME, en association avec une équipe de recherche d'IMPERIAL COLLEGE à LONDRES a annoncé la fabrication de tubes supraconducteurs de diamètres et de formes variées.

Ainsi un communiqué de l'AFP du 8 décembre 1988 annonçait :

<<SUPRACONDUCTIVITE FRANCE

PREMIERE DES LABORATOIRES DE MARCOUSSIS DANS LE DOMAINE DES FILS SUPRACONDUCTEURS.

PARIS - Les laboratoires de Marcoussis du groupe Alsthom viennent de réaliser les premiers fils supraconducteurs transportant, sans dissipation, du courant électrique à la température de l'azote liquide (-196 degrés C), avec une matrice en alliage de cuivre, annonce un communiqué.

Ces fils, de près de 100 m de long et de 1 millimètre de diamètre, sont des "monofilaments à base de nouveaux composés à haute température critique" constitués d'un mélange d'yttrium, barium et oxyde de cuivre (YBaCuO).

Les laboratoires de Marcoussis ont entamé le processus nécessaire au dépôt d'un brevet pour protéger leur réalisation, mais on n'y cache pas que dans l'immédiat, il n'y a pas encore d'application pratique de ces fils car ils transportent encore des courants trop faibles. Ces filaments ont été obtenus, à l'issue de dix huit mois de travaux, par une technologie consistant à étirer des tubes métalliques remplis de poudre d'YBaCuO et en les traitant à 900 degrés C pour obtenir de bonnes propriétés supraconductrices.

La percée technique des Laboratoires de Marcoussis, agissant avec un souci de réalisme industriel, a consisté à démontrer que l'on pouvait utiliser des conducteurs à matrice en alliage de cuivre au lieu de matrice en argent, très chère, comme l'avient fait jusque là les chercheurs du monde entier, pour éviter la désoxygénation de l'oxyde de cuivre.

Les densités du courant critique à -196 degrés C (77 degrés Kelvin) transportées par les nouveaux fils supraconducteurs ne dépassent pas les quelques centaines d'ampères par cm^2 , c'est-à-dire celles des fils à matrice d'argent ou celles d'échantillons non tréfilés.

"L'objectif de 100 000 ampères par centimètre carré pour une utilisation économiquement valable est encore éloigné, mais l'obstacle économique soulevé par l'utilisation de l'argent est, dès à présent, levé", souligne le communiqué des Laboratoires.

Déjà leaders mondiaux dans le domaine de la fabrication et de l'utilisation de fils supraconducteurs à base de Niobium Titane pour des applications aux fréquences industrielles, les laboratoires de Marcoussis et le groupe Alstom se placent ainsi en position de leaders dans le domaine des brins supraconducteurs à base de matériaux à haute température critique.>>

D'autres équipes travaillent sur les préparations de couches minces qui sont à la base des applications électroniques. Cette technologie pourrait éventuellement s'envisager également pour la réalisation de fils conducteurs (notons à ce niveau, les progrès de la pulvérisation par plasma).

Une équipe du groupe matériaux avancés d'ICI, a déclaré avoir mis au point un procédé de fabrication de câbles en céramique supraconductrice. Leur technique permettrait d'obtenir des fils à la fois flexibles, résistants et très faiblement poreux. Ces câbles n'ont toutefois pas une résistance électrique nulle. Néanmoins, ils sont capables de transporter des courants de très forte intensité pour les réalisations dans le domaine électronique et dans celui des aimants employés en médecine.

Pour les praticiens du développement d'applications nouvelles, les connaissances actuelles sont insuffisantes et le chemin vers les applications passe par les grands efforts en cours dans les domaines suivants :

- Théorie de la supraconductivité des céramiques en vue d'orienter les travaux expérimentaux ;

- Recherche des composés chimiques les mieux adaptés aux applications pour limiter le risque de s'engager dans des impasses ;

- Technologies, performances et coûts des composants utilisables en électricité ou électronique (matériau massif, couches minces, rubans, fils,....).

L'aboutissement de tels travaux est imprévisible mais tous les praticiens s'accordent à penser qu'en matière de courants forts, il faudra bien une dizaine d'années pour commencer à y voir clair.

Six grosses entreprises européennes (PIRELLI, CABLES DE LYON, SIEMENS, GEC ALSTHOM, BICC et ABB) viennent de décider de mener en commun un projet de recherche et développement sur des matériaux supraconducteurs à haute température pour les câbles de transmission d'énergie. Le programme de deux ans mobilisera près de 30 millions de francs.

Enfin, quel impact aurait l'utilisation des supraconducteurs HTC ?

L'utilisation de l'azote liquide (77 K) au lieu de l'hélium liquide (4,2 K) serait un avantage incontestable. Le coût de la réfrigération serait à peu près divisé par 50 (dépend de la machine). D'autre part, on peut trouver facilement de l'azote liquide partout, ce qui n'est pas toujours le cas l'hélium. A titre de comparaison, le litre d'hélium peut coûter de l'ordre de 50 F alors que le prix du litre d'azote liquide est plutôt de l'ordre de 1 F. La cryogénie associée serait également moins coûteuse (investissements plus faibles), car on peut tolérer des pertes thermiques plus élevées. On peut également compter sur un gain de place pour la séparation à la place de l'isolation thermique. Des études américaines ont montré que l'utilisation des supraconducteurs HTC permettrait d'obtenir des économies de l'ordre de 20 % en frais d'investissement et de fonctionnement. Cette valeur n'est pas fondamentale dans la décision, mais elle favorise une meilleure commercialisation. Le tableau 7 montre la comparaison entre 3 systèmes de tri magnétique (étude américaine) comparant le classique, le cas hélium et le cas HTC (bien entendu, le 3ème cas suppose que l'on ait un matériau ayant une densité de courant convenable).

e) Perspectives d'application des matériaux à haute température critique

Indépendamment de toutes les difficultés décrites plus haut à propos des matériaux à haute température critique, la détermination d'une ligne de conduite à leur propos nécessite l'examen des enjeux économiques potentiels de leurs applications. Pour ce faire nous sommes contraints de

poser au moins deux hypothèses tout à fait arbitraires aujourd'hui :

1. Les composants élaborables dans le futur avec ces matériaux ont des performances, à 77 K, comparables à celles du Niobium-Titane.

2. Le coût des éléments de machines constructibles avec ces matériaux n'est pas supérieur à celui des éléments analogues des cryomachines connues (inducteurs, induits, amenées de courant, etc.....).

Dans ces deux hypothèses, injustifiables aujourd'hui, les réflexions générales suivantes s'imposent.

En premier lieu, les applications à courant fort seraient généralement les mêmes que celles du Niobium-Titane. En effet, en octobre 1988, il n'est pas apparu à notre connaissance de propriétés spécifiques de ces matériaux capables de conduire à des applications nouvelles. Le champ des possibilités se limite donc actuellement aux équipements décrits au long du paragraphe 2, chapitre III.1.3. Les collisionneurs de particules devraient cependant faire exception à cette règle. Dans ces machines, les particules doivent nécessairement circuler dans un vide très poussé. Ce vide s'obtient naturellement, dans un accélérateur utilisant des conducteurs fonctionnant à 4 K, par le cryopompage dû au fait qu'à l'intérieur de chaque aimant supraconducteur les parois du tube dans lequel circule le faisceau sont à la température de l'hélium liquide. Dans le cas d'aimants à 77 K, il serait nécessaire d'adjoindre pratiquement à chaque aimant des cryopompes à l'hélium liquide pour maintenir un vide suffisant sur le trajet des paquets de particules : l'hélium liquide n'est pas supprimé et la compétitivité économique paraît compromise.

En second lieu, le gain sur le coût de construction dû au passage de 4 à 77 K est à la réflexion plutôt modeste. La simple simplification mécanique tient généralement à la suppression d'un écran thermique situé entre les régions à 4 et 300 K. Cette simplification de construction ne concerne qu'une partie de poids minime dans le coût. Dans le cas des cryoalternateurs par exemple, les experts de la CIGRE évaluent à moins de 10 % la réduction du coût de construction.

TABLEAU 7 : COMPARAISON DES SYSTEMES

	CLASSIQUE	4 K SUPRACONDUCTEUR	77 K HTC
PUISSANCE REQUISE(kW)	270	0,007	0,007
REFROIDISSEMENT	30	60	3 à 4
TOTAL	300	60	3 à 4
POIDS (TONNES)	490	230	<230
SURFACE AU SOL (m ²)	50	17	< 17
COUT DU CAPITAL (\$ 10 ⁶)	1,6 - 1,7	1,7 - 1,8	1,5 - 1,6
COUT D'OPERATION ANNUEL (\$ 10 ³)	81	15,8	1,1
COUT ANNUEL CAPITAL (\$ 10 ³)	425,6 - 452,2	452,2 - 478,8	399,0 - 425,0
COUT TOTAL ANNUEL (\$ 10 ³)	506,6 - 535,2	468,0 - 494,6	400,1 - 426,7

Pour un champ de 2 T, prix électricité 5 cent/kWh, facteur de capacité 50 %, facteur de nivellement 1,20, taux de charge fixe 26,6 %.

Avantages des séparateurs magnétiques supraconducteurs

- 1) La puissance nécessaire est réduite
- 2) Réduction des poids et volume (fer doux)
- 3) Plus forte intensité magnétique qui permet une vitesse plus élevée, une efficacité donnée de séparation ou une meilleure séparation pour une vitesse donnée.

En troisième lieu, il faut considérer les réductions possibles des coûts de réfrigération et d'exploitation. Le coût de la réfrigération à l'hélium est très supérieur à celui de la réfrigération à l'azote. Cependant, là encore, le gain n'est pas significatif. Du point de vue de l'investissement le coût de la cryogénie étendu à l'hélium n'est qu'une fraction assez petite du coût global de l'équipement. Du point de vue de l'exploitation il n'est pas évident qu'un gain de 0,1 ou 0,2 % de rendement justifie d'importants efforts de développement.

Dans l'état actuel des connaissances, l'avantage économique potentiel d'une cryoélectricité à l'azote est probable mais très incertain compte-tenu de l'état embryonnaire de nos connaissances en matière de matériaux à haute température critique.

Comme on peut le constater, il est très difficile de se faire une idée précise de l'impact qu'aurait ces nouveaux matériaux d'un point de vue économique.

Si ces nouveaux matériaux, pour des raisons de propriétés et technologies encore mal maîtrisées, sont exclues pour des emplois en électrotechnique dans un avenir proche, les chercheurs parviennent peu à peu à les adapter à la "cuisine technologique" que requiert la micro-électronique (meilleure maîtrise des couches minces monocristallines, interfaçage avec le silicium...). Certains prévoient même que des circuits logiques ultra rapides et des dispositifs de mesure ultra sensible seront disponibles avant deux ans.

Quant à l'avantage économique d'une cryogénie à l'azote, le problème doit se poser différemment suivant qu'il s'agit d'une bobine supraconductrice pour accélérateur collisionneur, ou détecteurs de particules ou d'une petite bobine pour tri magnétique, par exemple, technologiquement moins sophistiquée et performante. Il se pourrait que dans l'avenir, ce soit des voies de développement qui bénéficient en premier lieu des avantages ouverts par ces nouveaux matériaux.

f) Conclusions

Les considérations précédentes nous amènent à trois conclusions :

1) Le Niobium-Titane est le seul supraconducteur industriel en 1990

Il a fallu 53 ans de 1911 à 1964 pour aboutir à la première application utile de la supraconductivité avec les bobines en Niobium Zirconium de la "petite" chambre à bulles d'Argonne National Laboratory (C. Laverick, J. Purcell, J. Steckly). Depuis lors le Zirconium a cédé la place au Titane dans la quasi totalité des applications et la part du Niobium-Titane peut être évaluée aujourd'hui à plus de 99 % du marché des matériaux supraconducteurs.

2) La cryoélectricité au Nb-Ti en courant continu se développe constamment

Les conducteurs au Niobium-Titane en courant continu sont bien maîtrisés et progressent constamment en courant critique. Leur utilisation jusqu'à 12 T est maintenant en vue.

En outre leur compétitivité par rapport au cuivre est acquise pour les aimants des que l'énergie stockée est de l'ordre du megajoule. Cela a d'abord été démontré pour les détecteurs de particules et pour les multipôles des accélérateurs et collisionneurs. C'est devenu clair en matière de fusion contrôlée. Depuis quelques années le grand public peut en profiter dans le cas des imageurs médicaux à résonance magnétique et dans plusieurs pays on attend incessamment les essais de grands générateurs électriques à inducteur supraconducteur.

Le champ d'application du Niobium-Titane ne cesse donc de s'élargir pour les usages en courant continu (séparateur à bobine supra-ERIEZ).

3) La connaissance des matériaux à haute température critique doit être approfondie

Il ne faudra probablement pas 53 ans comme dans le cas du Niobium-Titane pour arriver aux premières applications mais on est encore loin de pouvoir en faire des évaluations fondées : la physique, la chimie et la technologie de ces matériaux sont encore aujourd'hui pratiquement inconnues malgré deux ans de recherches assidues.

En définitive, une opinion de praticien du développement pourrait

s'exprimer en deux phases :

Les applications des supraconducteurs métalliques en courant continu sont de plus en plus portées par le marché des champs magnétiques continus.

L'évaluation des possibilités des céramiques à haute température critique demande encore d'importants efforts en matière de physique et technologie des composants.

Aucun dispositif à base de supraconducteur "chaud" n'est encore à ce jour commercialisé : toutefois, certaines techniques de réalisation de couches minces sur des substrats divers (silicium), en sont au stade pré-industrialisation: Notamment à CAEN, ces techniques ouvrent la voie, à court terme à des applications dans le domaine de l'électronique.

IV - MONTAGE EXPERIMENTAL D'UNE BOBINE DE TRI A AIMANT SUPRACONDUCTEUR - EXEMPLE D'APPLICATION

Nous avons vu que pour certaines opérations de séparation (ultrafines de faibles susceptibilités), il est nécessaire de développer des densités de forces magnétiques de l'ordre de $6 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-3}$. La conception même des appareils conventionnels, les matériaux entrant dans leurs conceptions et celles des matrices utilisées ne permettent pas d'atteindre de telles valeurs. Ces valeurs ne peuvent être atteintes que par une augmentation du champ magnétique appliqué au delà de 2 T. La consommation électrique importante, les dimensions des circuits magnétiques, la complexité des unités de réfrigération excluent la possibilité d'utiliser des bobines classiques en cuivre résistif. Par contre, l'évolution et la maîtrise acquise dans la technologie des aimants supraconducteurs et des systèmes de refroidissement associés peuvent contribuer, sans nul doute, à l'évolution attendue des séparateurs magnétiques.

La construction des bobinages supraconducteurs en courant continu n'est pas limitée par la nécessité d'évacuer des pertes proportionnelles au volume de conducteur, comme c'est le cas des métaux résistifs. Il est donc possible d'obtenir en régime permanent des champs magnétiques plus élevés dans des volumes plus grands qu'avec du cuivre et ceci en utilisant des masses très inférieures de conducteurs. Le courant

transportable à 5 T et 4 K, par exemple, par un fil de Nb Ti (de type \approx 15 000 filaments de 0,6 μm) est en gros 50 fois supérieur à celui d'un fil de cuivre de même diamètre à 10 A/mm². Il en résulte que le coût de l'ampère-kilomètre obtenu par des fils supraconducteurs standards est inférieur d'environ 40 % à celui obtenu avec du cuivre utilisé à 10 A/mm². Dans la comparaison du coût, il faut également faire intervenir les pertes Joule, du matériel classique et la puissance de réfrigération du matériel cryoélectrique. Des études économiques réalisées par le CERN par exemple, conduisent à estimer qu'un équipement supraconducteur surclasse un équipement classique au delà de 1 200 heures de marche. Le surcroît d'investissement (pouvant être le double dans certains cas spécifiques) étant équilibré par la diminution des coûts d'exploitation. En courant continu, on peut dire que la compétitivité des équipements supraconducteurs est réelle dès que les dimensions physiques ou les champs à créer sont assez élevés.

IV-1 Réalisation d'un dispositif de séparation magnétique à aimant supraconducteur

IV.1.1. Pourquoi utiliser des supraconducteurs froids ?

Comme on a pu le constater dans le 1er chapitre, le pouvoir séparateur un système magnétique est caractérisé par la grandeur $1/2 \mu_0 \nabla H^2$ qui s'exprime en N/m³. Lorsqu'on utilise des systèmes classiques (aimants permanents ou électro-aimants à enroulement cuivre), ce facteur ne peut dépasser 10^{11} N/m³ et déjà à ces valeurs, la consommation électrique et le refroidissement des bobinages deviennent extrêmement pénalisants. Les deux avantages essentiels apportés par l'utilisation des supraconducteurs (type NbTi) sont d'une part la non consommation d'énergie par effet Joule et d'autre part la possibilité d'augmenter $1/2 \mu_0 \nabla H^2$ ($6 \cdot 10^{12}$ N/m³). Seuls, des systèmes d'aimants supraconducteurs semblent raisonnables pour l'obtention de champs élevés et pour répondre au mieux aux exigences actuelles telles que :

+ Mise au point de nouvelles méthodes ou amélioration de celles existantes, susceptibles de favoriser l'exploitation de gisements de plus en plus pauvres et complexes ou de traiter des matières difficilement valorisables techniquement et/ou économiquement par les procédés classiques.

+ Compensation de l'épuisement des gisements à minéralogie grossière et maille de libération élevée qui conduit à des broyages de plus en plus fins.

+ Production de produits plus concentrés pour augmenter les rendements métallurgiques ou mieux épurés pour diminuer les coûts de traitements chimiques, ou augmenter la valeur ajoutée du produit final, et ceci avec des coûts énergétiques les plus bas possibles.

+ Elargissement des domaines d'activité aux traitements de fluides industrielles: (liquide ou gaz) pour :

- l'environnement
- le recyclage et la récupération

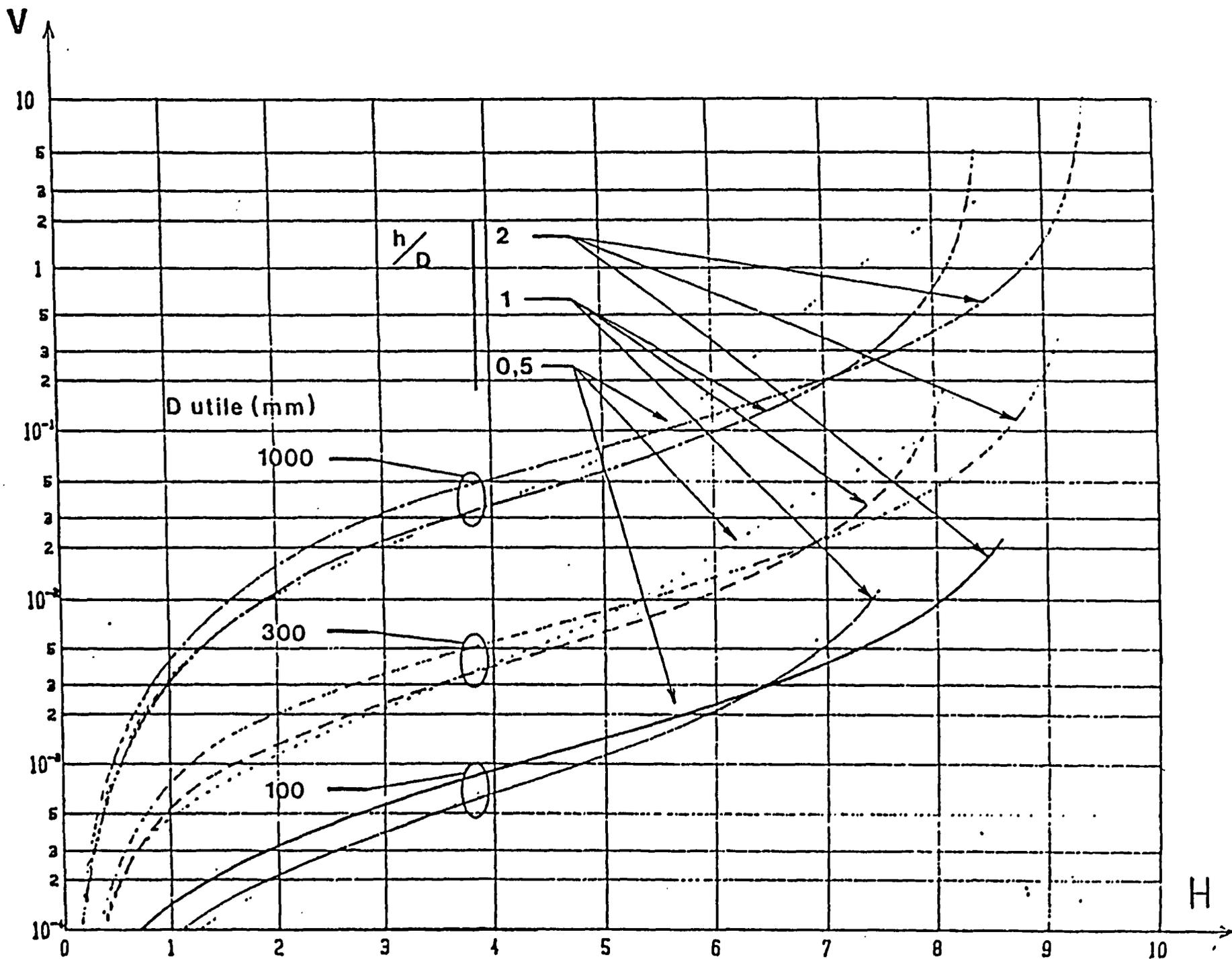
IV.1.2. Problèmes posés par l'utilisation des supraconducteurs froids

Il faut tout de suite dire qu'il n'y a pas de problème technique (dans la mesure où l'on s'en tient à des champs inférieurs aux champs critiques ≈ 8 T). Les problèmes sont purement économiques, problème d'investissement, coût des bobines supraconductrices et problème de maintien en froid, consommation d'hélium liquide ou coût de réfrigération.

En ce qui concerne le coût de l'aimant, il dépend approximativement du volume de supraconducteur nécessaire, ce poids dépendant lui-même des spécifications du client. Si on utilise par exemple un solénoïde, le champ sera imposé par le pouvoir de séparation que l'on désire, le diamètre intérieur imposé par le débit et la longueur liée au temps de passage dans le solénoïde.

Donc, en gros, les trois données imposées par le client sont le champ, le diamètre intérieur, la longueur de la bobine. Afin de mieux appréhender le coût du supra, on montre sur la figure 16 le volume de supra (NbTi) nécessaire en fonction du champ demandé pour 3 ouvertures données ($\phi = 100-300-1\ 000$ mm) et pour des rapports longueur/diamètre de 0,5, 1 et 2. Ces courbes ne sont qu'une estimation ; tout projet

Figure 16 : Volume de fil supraconducteur en fonction du champ magnétique



demanderait une étude approfondie (*). Typiquement, pour 5 T, on voit qu'il faut 10 fois plus de supra pour un ϕ de 300 au lieu de 100, et 100 fois plus pour 1 000 au lieu de 100.

Entre 2 et 7 Teslas, le volume de supraconducteur est à peu près proportionnel à H^2 et ϕ^2 .

En ce qui concerne la consommation d'hélium, les techniques modernes de cryostats permettent de descendre à des consommations faibles (0,3 l/h dans les bobines IRM et même de 0,03 l/h pour les cryostats composites).

Lorsqu'on utilise un fluide cryogénique en bain, le coût qui intéresse l'utilisateur est le prix du litre de cryogène rendu dans son usine. Ces prix dépendent de nombreux paramètres (lieu géographique, quantité, récupération, liquéfaction sur site.....), mais grossièrement, on peut donner les valeurs suivantes :

- 1 l d'hélium liquide sous pression atmosphérique :

4,2 K, 50 F (1 W vaporise 33 l/jour)

(Il faut compter entre 20 à 50 F/litre suivant contrat fournisseur en en système de récupération).

- 1 l d'hydrogène liquide sous pression atmosphérique :

20 K, 5 F (1 W vaporise 2,71 l/jour)

- 1 l d'azote liquide sous pression atmosphérique :

(1 W vaporise 0,541 l/jour : environ 1 F/l).

Lorsqu'on utilise un réfrigérateur, ce qui intéresse l'utilisateur, c'est le coût énergétique de la machine. Pour quantifier la qualité de la machine, les spécialistes définissent le Coefficient de Performance (COP).

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance frigorifique à la température d'utilisation}}{\text{Puissance fournie à la machine}}$$

(*) En séparation magnétique dans le sens où une variation de la valeur du champ sur l'axe de la bobine n'affecte pas de façon importante les résultats métallurgiques, la conception et la réalisation de la bobine peuvent être plus simples et moins onéreuses.

La thermodynamique nous enseigne qu'une machine thermique ne peut avoir un rendement supérieur au rendement de Carnot, donc pour une machine parfaite, on a un coefficient de performance idéal :

$$(\text{COP})_i = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \begin{array}{l} T_f : \text{température froide} \\ T_c : \text{température chaude} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Par exemple pour } T_f = 4,2 \text{ K } (\text{COP})_i = 0,0142 \\ T_f = 77 \text{ K } (\text{COP})_i = 0,3453 \end{array}$$

Les spécialistes définissent également le facteur de mérite F.O.M. (figure of merit).

$$\text{F.O.M.} = \frac{\text{COP}}{(\text{COP})_i}$$

Ce facteur peut être exprimé en ‰ et mesure l'imperfection de la machine réelle par rapport à la machine idéale. Très souvent, les utilisateurs se servent de l'inverse du COP et dans ce cas, on a ce que les spécialistes appellent le "coût du watt froid" en "watt chaud". Typiquement, pour des machines de grosses puissances, on admet dans des calculs préliminaires les chiffres suivants :

1 W à 4,2 K coûte 500 W à la température ambiante
 1 W à 20 K coûte 80 W à la température ambiante
 1 W à 77 K coûte 10 W à la température ambiante

Il était nécessaire de donner quelques indications sur le coût de la réfrigération car il est déterminant dans les applications industrielles possibles ; néanmoins, il faut savoir qu'à l'heure actuelle, l'utilisation d'un environnement cryogénique fait appel à des techniques bien maîtrisées et que leur coût et leurs performances pourraient être largement améliorées par un effet de série. Enfin, dans certains cas d'applications, on peut dire que l'utilisation de l'hélium liquide peut être banalisée, comme par exemple pour l'imagerie à résonance magnétique (IRM) ou par utilisation de petits liquéfacteurs hélium comme l'Hélial 7 de TBT (Air liquide).

IV.1.3. Application industriel

Un certain nombre d'appareils ont déjà été testés et ont montré l'efficacité des séparateurs supraconducteurs. Ces séparateurs utilisent deux types de séparation, l'HGMS (High Gradient Magnetic Separation) et l'OGMS (Open Gradient Magnetic Separation).

Les principaux fabricants actuels sont : Eriez Magnetics pour J.M. Huber Corporation (Georgie USA), SMIT Nymegen (HGMS mobile), International Research and Development (IRD) UK, English Clays Lovering Pochin (ECLP), IGC, Humbolt Wedag (RFA).

a) HGMS (High Gradient Magnetic Séparation)-Séparation magnétique à gradient élevé (figure 17).

L'aimant supra fournit un champ plus ou moins homogène et le gradient est accentué par un milieu magnétisable (matrice de type "mousse de fer" ou "laine de fer"). Le facteur de force magnétique peut être augmenté par élévation du champ magnétique de l'aimant ou par la configuration des éléments composant la matrice.

Exemple de capacité

ERIEZ MAGNETIC : figure 17-1

Canister.....	213,36 cm de diamètre x 51 cm de profondeur
Dimension bobine.....	391,16 cm ² x 210,82 cm de profondeur
Poids bobine.....	227 tonnes
Temps de montée.....	1 min maximum
Consommation hélium.....	2 l par cycle pour 1 min de temps de montée
Liquéfaction.....	20 l par heure
Puissance du compresseur.....	27,8 kW (nominal). Puissance réelle 5 kW
Champ magnétique.....	2 Tesla

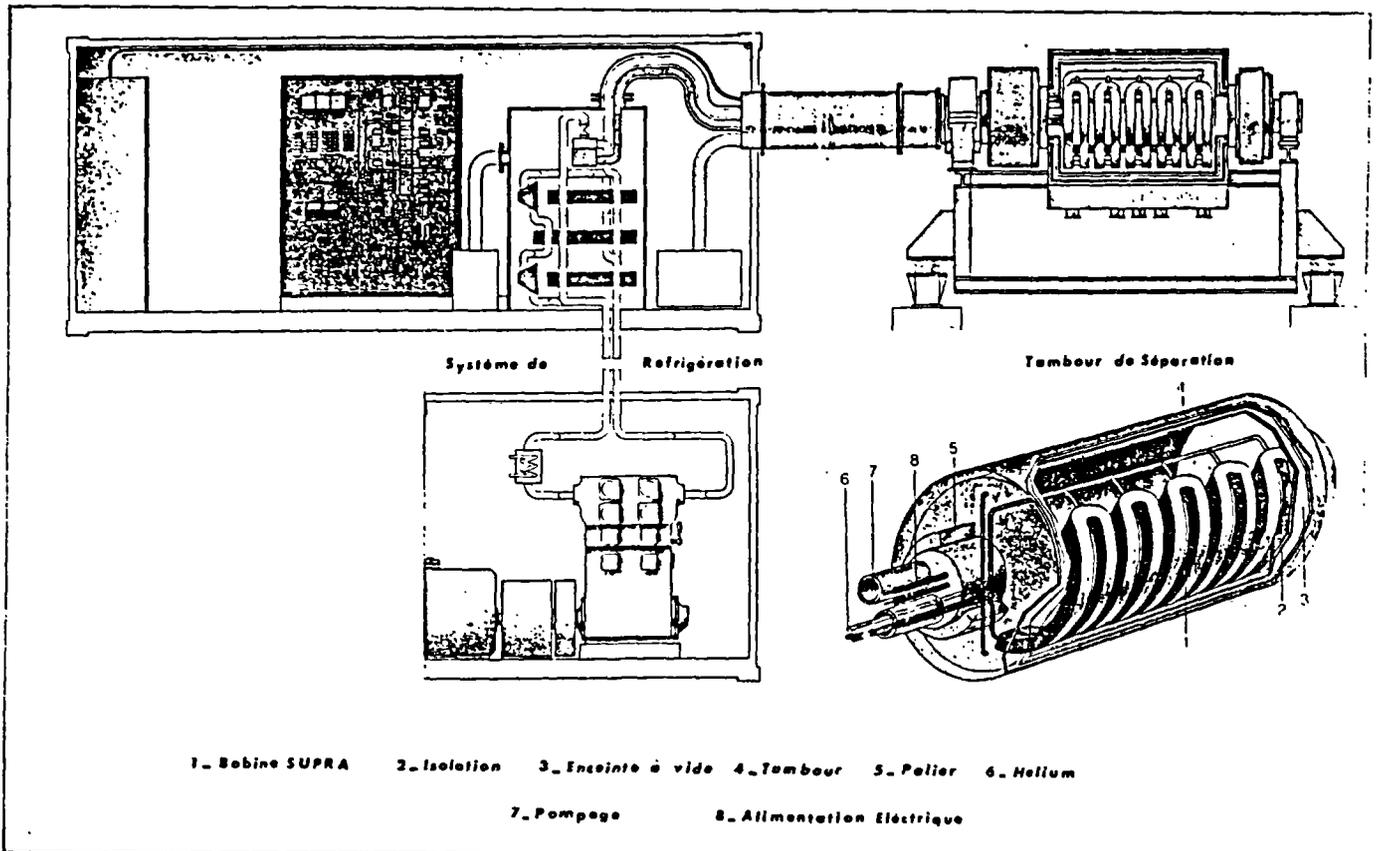
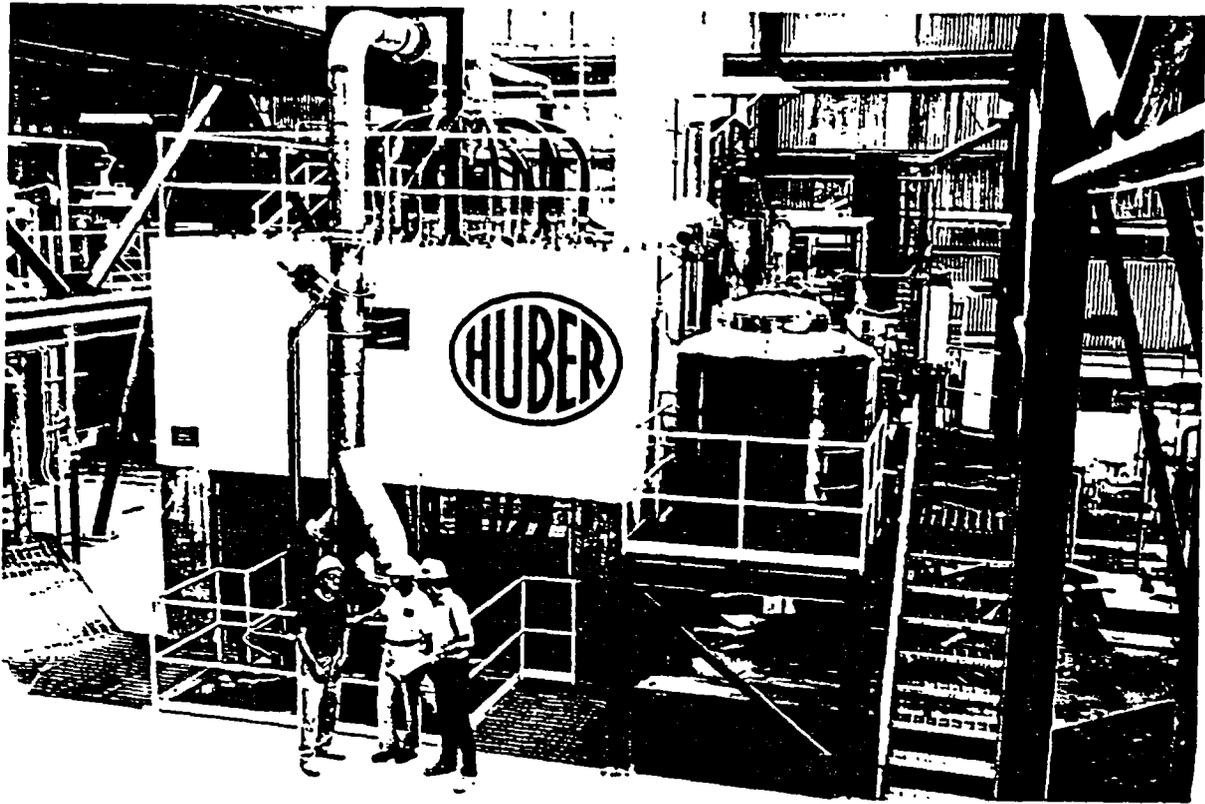


Figure 17 : Séparateur Magnétique Haut Gradient à bobine supraconductrice
 1) Discontinu - ERIEZ
 2) Continu à tambour - HUMBOLDT

b) OGMS (Open Gradient Magnetic Separation) ou VGMS (Volume Gradient Magnetic Separation).

Le champ et le gradient ne dépendent que de la configuration du bobinage. Ceci a été testé en voie humide et en voie sèche. La séparation se fait de façon continue sans accrochage des particules. Dans ces deux cas, H et VH peuvent être multipliés par un facteur de 3 à 5 par rapport aux aimants classiques. Les forces sont donc 9 à 25 fois plus grandes.

IV.1.4 Séparateur à haut gradient à aimant supraconducteur

Le principe de la séparation magnétique à haut gradient/haut champ consiste à produire au moyen d'éléments ferromagnétiques fins, de fortes hétérogénéités dans un magnétique extérieur, à l'origine homogène. Il en résulte des centres de forces de faibles portées, sur lesquels seront piégés les produits paramagnétiques.

La méthode est basée sur l'utilisation de la force d'attraction magnétique qui retient, sur les éléments de matrice aimantés, les particules paramagnétiques contenus dans une suspension solide-eau.

L'utilisation de matrice d'extraction de type métal déployé, laine ou mousse de fer dans les séparateurs haut gradient, sont parfaitement adaptés aux problèmes complexes rencontrés lors des opérations d'épurations ou de récupérations de produits ultrafins.

Le système haut gradient utilisé est constitué d'une bobine supraconductrice (Nb-Ti) de diamètre interne 20 mm. La description de l'appareillage et des caractéristiques de la bobine est donnée en annexe.

Le volume interne de la bobine est équipé d'un canister (boîte d'extraction) rempli d'une matrice d'extraction. Ce dernier comporte des tuyauteries pour la circulation de la suspension et de l'eau de lavage ainsi que pour la récupération des produits de séparation.

Les éléments de la matrice, sous effet, d'un champ magnétique, développent des valeurs élevées de gradient de champ, au voisinage immédiat des fibres. Quand le champ magnétique est appliqué, la pulpe est alimentée au travers la matrice, les particules dont la susceptibilité

est suffisamment élevée sont attirées sur les fibres, et les particules non magnétiques quittent le système.

Lorsque la capacité de rétention de la matrice est atteinte, l'alimentation est arrêtée, un lavage à l'eau est effectué sous champ pour nettoyer la matrice (mixte ou particules piégées mécaniquement) et le champ magnétique est ramené au voisinage de zéro, afin d'expulser, par de l'eau sous pression, les particules magnétiques. L'alimentation peut alors reprendre. Ces différentes opérations représentent le cycle de fonctionnement du séparateur.

IV-2 Séparation à haut gradient-haut champ et exemple de traitement

IV.2.1 Séparation magnétique à haut gradient/haut champ

L'élément fondamental dans le procédé d'extraction de particules dans une matrice, est l'interaction entre une fibre aimantée (élément de la matrice) et une particule de petite dimension, dans un champ magnétique uniforme donné.

Le modèle de séparation magnétique de haut gradient est représenté par une fibre ferromagnétique de rayon a , placée suivant l'axe z , dans un fluide diamagnétique. Un champ magnétique H_0 , suffisamment élevé pour saturer la fibre, est appliqué suivant la direction x . Une particule sphérique paramagnétique de rayon R ($R \ll a$), de volume V_p ($4/3\pi R^3$), de densité ρ_p et de susceptibilité magnétique χ_p est portée par un fluide de viscosité η et de susceptibilité χ_f qui circule avec une vitesse uniforme V_0 suivant l'axe des x (direction négative). La circulation du fluide autour de la fibre est traitée dans une approximation hydrodynamique où le fluide est considéré sans frottement.

L'étude du mouvement des particules dans un tel système est complexe mais peut être simplifié, en ne considérant dans une première approximation, que l'interaction d'une particule sur un élément isolé de matrice comme représenté à la figure 18.

Pour calculer la trajectoire d'une particule paramagnétique circulant dans un fluide au voisinage d'une fibre collectrice aimantée, on considère qu'elle est soumise à une force magnétique F_m , à une force hydrodynamique d'écoulement F_v et à une force de gravité F_g dans la

direction de l'accélération de la pesanteur g suivant la configuration générale représentée ci-après (figure 18).

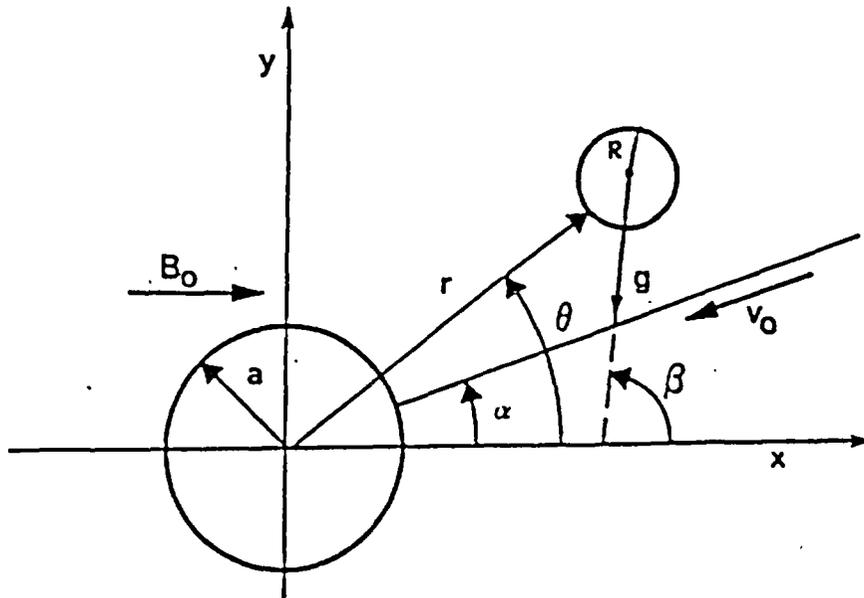


Figure 18 : représentation du modèle de capture

Les équations décrivant le mouvement de la particule peuvent être décrites en termes de coordonnées polaires en fonction de r et θ ; celles-ci étant en relation avec x et y par :

$$x/a = r_a \cos\theta \text{ et } y/a = r_a \sin\theta$$

Le comportement dynamique d'une particule dans un séparateur magnétique peut être représenté par une équation de la forme :

$$\vec{m}a_p = \vec{F}_v + \vec{F}_m + \vec{F}_g$$

ou

$$\vec{F}_m = -\frac{1}{2} \mu_0 V_p \chi \nabla (H^2) \text{ avec } \chi = \chi_p - \chi_f$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$$

$$\vec{F}_v = 6\pi \eta R (V_{(r)} - \frac{dv}{dt})$$

$$\vec{F}_g = -\frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_p - \rho_f) \vec{g}$$

$$\vec{m}a_p = -\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_p \vec{a}$$

Les trajectoires des particules peuvent alors être décrites par une équation de forme générale :

$$\frac{1}{r_a} \cdot \frac{dr_a}{d\theta} = f\left(\frac{V_m}{V_0}, \frac{M_s}{2 H_0}, r_a, \theta\right) \text{ ou } V_m = \frac{2\mu_0 \chi M_s H_0 R^2}{9\eta a}$$

La résolution des équations de mouvement par une solution du quatrième ordre de type Runge-Kutta permet de définir la trajectoire critique et le rayon de capture R_{ca} (R_c/a).

Les trajectoires peuvent être divisées en deux catégories selon qu'il y ait capture ou non. Le cas limite de capture définit la trajectoire limite ou critique et donne la valeur du rayon de capture.

Le modèle défini, ainsi que le programme de calcul, permet, grâce à des solutions approchées, de prévoir par rapport aux propriétés des minéraux à traiter (granulométrie ρ , χ) des paramètres qui définissent la séparation (H_0 , V_0 , η) et des propriétés des éléments de matrice (M_s , a) la trajectoire et le rayon de capture d'une particule. Il sera donc possible, à partir de la connaissance de la matière à traiter, d'optimiser les paramètres de fonctionnement pour la séparation, par l'étude du comportement des particules.

Les matrices utilisées en séparation haut gradient sont constituées d'empilage de grille en métal déployé, de grillage, de laine ou mousse de fer composées de filaments fins ou de billes.

Vu le faible volume disponible pour la séparation et la

granulométrie des produits à traiter, et afin de diminuer au maximum les effets de paroi et les risques de colmatage mécanique, notre choix s'est porté sur deux types de matrice, pour les tests de séparation haut gradient :

- Matrice de type "tricot métallique" ou "matelas tricoté"

C'est une matrice constituée de fils d'acier inoxydable magnétique, torsadés et tissés de 200 à 600 μm de diamètre. Cette dernière d'une porosité d'environ 95 % représente la matrice grossière.

- Matrices de type mousse d'acier et laine de fer, représentant les matrices moyennes et fines, dont le diamètre des éléments collecteurs varie de 180 à 150 μm ont une porosité d'environ 98 %.

A partir des études de capture des particules par des fils isolés, l'on peut trouver une relation qui définit le pouvoir de rétention d'une matrice dans laquelle le rayon de capture intervient ainsi que le rapport (λ) entre le diamètre du fil et celui de la particule. Les éléments de matrice doivent également être adaptés à la granulométrie de l'alimentation car la force d'adhérence magnétique f_H en fonction du rapport λ (*) passe par un maximum.

Les études théoriques d'optimisation des matrices, déduites des modèles de capture, montrent que le rapport $\lambda = D/d$ doit être approximativement égal à 3. Ceci veut dire que les fils composant la matrice doivent avoir un diamètre trois fois supérieur à ceux des particules. On se heurte alors à des problèmes de réalisation et de résistance des matrices, quand les particules à traiter sont de quelques microns.

En fait, le phénomène de filtration mécanique doit être au maximum évité dans les opérations industrielles et pour cela, il est nécessaire d'avoir un rapport $\lambda \gg 10$, et en réalité, un grand nombre de résultats expérimentaux montrent que l'efficacité d'une opération et les performances métallurgiques ne sont pas dégradées pour des valeurs de λ variant entre 100 et 200.

(*) $\lambda = D/d$: rapport entre le diamètre des éléments et la matrice à celui des particules.

La matrice doit également offrir la plus grande perméabilité possible à la pulpe, un maximum d'efficacité de collection et une bonne facilité de nettoyage.

Elle sera caractérisée par son facteur de remplissage :

$$F = \frac{\text{Volume matrice}}{\text{Volume canister}}$$

qui dépendra de la forme et du diamètre des éléments collecteurs et qui devra être le plus faible possible afin de diminuer les risques de piégeage mécanique.

La hauteur de la matrice est également un paramètre important dans le sens où elle déterminera le temps de rétention des particules dans le champ, donc la probabilité de capture. Une hauteur trop importante risque de diminuer l'efficacité de lavage et augmenter les possibilités de piégeage mécanique.

Elle augmente également la puissance électrique consommée, l'importance du bobinage et allourdit le séparateur.

Suivant le type d'opération, la hauteur industrielle des matrices varie de 100 à 600 mm.

L'efficacité d'extraction va également dépendre de la matière qu'elle peut retenir sans voir apparaître de dégradation de résultats. Ceci est exprimé par le taux de chargement qui peut être représenté par le rapport poids de solide de l'alimentation (ou poids de produits magnétiques) sur le volume ou la surface de matrice. Ce paramètre est important car il définit la capacité du séparateur, la vitesse de rotation des carrousels ou la durée de cycle du fonctionnement des appareils discontinus.

Enfin, il ne faut pas négliger les caractéristiques mécanique et magnétique des matrices :

* Matériaux magnétiques de bonne qualité-aimantation maximum mais rémanence minimum ;

* Bonnes propriétés mécaniques de rigidité et de résistance à la corrosion.

IV.2.2. Exemples de traitement

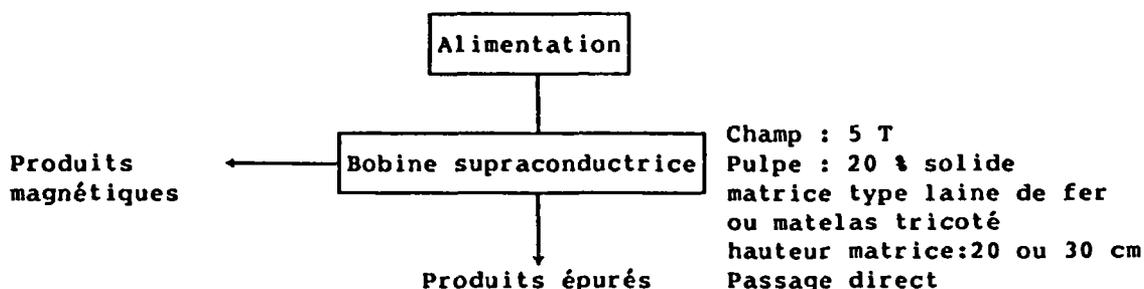
Quelques essais ont été réalisés sur la bobine supraconductrice, dans différents domaines d'épuration ou de concentration.

Les essais d'orientation n'ont pu être conduits que sur la bobine de diamètre interne 20 mm et n'ont pas pu permettre l'optimisation des conditions de fonctionnement (hydrodynamisme notamment), mais ont pu mettre en évidence l'intérêt de la technique pour la séparation d'ultrafines dans le domaine:

- des minéraux industriels
- de la récupération des métaux

A) Epuration de minéraux industriels

Les essais ont essentiellement porté sur des produits tels que : Kaolin, talc, phonolite, Feldspaths et sables afin d'obtenir un produit épuré de qualité supérieure à ceux obtenus en traitement classique (flottation et/ou séparation magnétique haute intensité). Les kaolins et talc ont été passés sur une matrice fine ou moyenne, alors que les autres produits ont été passés sur matrice grossière (matelas tricoté). Un seul passage à 5 T a été effectué suivant le schéma et les conditions suivantes :



Les résultats de ces essais sont consignés au tableau 8.

Dans tous les cas de traitement, sur ces produits fins, les produits sont mieux épurés qu'en traitement classique, même en considérant que la pulpe n'a pas été traitée au dispersant et que le faible volume disponible pour la séparation ne permet pas de traiter dans des conditions optimales :

- Effet de paroi du canister
- Mauvaise adaptation de la matrice entraînant une baisse de porosité de cette dernière
- Risque de piégeage mécanique
- Taux de chargement de la matrice trop élevé.

Malgré tout, on peut constater que le taux d'épuration est assez élevé, puisqu'en un seul passage, on arrive à retenir plus de 90 % du fer ou du titane contenu. Pour les Feldspaths, par exemple, l'essai a pu montrer que le produit épuré était de même qualité, qu'après trois passages sur séparatrice "Jones" haute intensité.

Si l'on rapproche ces résultats, de ceux définis dans certains articles spécialisés, ou de ceux obtenus précédemment sur une bobine supraconductrice de diamètre 120 mm (action concerté 81 D 1104), l'on peut affirmer que ce mode de traitement est tout à fait adapté au traitement des minéraux industriels ultrafins. Une installation industrielle de ce type fonctionne désormais aux Etats-Unis pour le traitement des Kaolins, et a pu montrer tous les avantages qu'un système supraconducteur pouvait amener vis-à-vis des traitements classiques quant à l'amélioration de la qualité et de l'économie du procédé.

A titre d'exemple, pour montrer l'efficacité de rétention, nous donnons au tableau ci-dessous, les résultats de séparation sur l'over flow cyclone d'un deschlammage de minerais de fer.

Produit	% Poids	% Fe	φ Fe	Condition
P M	67,90	68,12	99,66	Champ magnétique : 1 T Matrice matelas tricoté (20 cm) Pulpe 20 % solide Granulométrie < 10 μm 1 passage direct
N M	32,10	0,49	0,34	
Reconstitué	<u>100,00</u>	<u>46,39</u>	<u>100,00</u>	

Produits	% Poids	% Fe ₂ O ₃	% TiO ₂	ρ Fe ₂ O ₃	ρ TiO ₂	Alimentation
P M	6,25	9,28	1,33	74,7	68,9	Kaolin Granulométrie < 5 μm Matrice : mousse de fer (30 cm)
N M	93,75	0,21	0,04	25,3	31,1	
T V	100,00	0,78	0,12	100,0	100,0	
P M	2,44	3,22		8,8		Talc Granulométrie < 15 μm Matrice : laine de fer (30 cm)
N M	97,56	0,83		91,2		
T V	100,00	0,89		100,0		
P M	5,6	16,58	1,67	33,64	8,93	Feldspaths Granulométrie < 20 μm Matrice : matelas tricoté (20 cm)
N M	94,4	1,94	1,01	66,36	91,07	
T V	100,0	2,76	1,47	100,0	100,00	
P M	21,44	10,47	1,05	92,0	90,4	Phonolite Granulométrie < 40 μm Matrice : matelas tricoté (20 cm)
N M	78,56	0,25	0,03	8,0	9,6	
T V	100,00	2,44	0,25	100,0	100,0	
P M	4,60	2,08	1,99	87,0	82,6	Sable Granulométrie < 40 μm Matrice : matelas tricoté (20 cm)
N M	95,40	0,015	0,02	13,0	17,4	
T V	100,00	0,11	0,11	100,0	100,0	
P M	3,2	7,77		92,1		Silice Granulométrie < 40 μm Matrice : matelas tricoté (20 cm)
N M	96,8	0,022		7,9		
T V	100,0	0,27		100,0		

TABLEAU 8 : RESULTATS DES TESTS D'EPURATION SUR DIVERS MINERAUX INDUSTRIELS.

B) Essais de récupération à partir de déchets métalliques

Des essais ont également été menés sur :

- des scories provenant de la métallurgie
- des catalyseurs de déshydrogénation brûlés
- des catalyseurs d'hydrodésulfuration de produits pétroliers usagés (Co - Mo)
- des catalyseurs Vanadium
- des boues d'épuration de l'industrie Galvanique
- des scories de fusion de Vanadium

a) Essais sur catalyseurs et déchet d'industrie de surface

Les industries chimique et hydrométallurgique sont génératrice d'un certain nombre de déchets qui peuvent être dans certains cas considérées comme économique.

L'industrie chimique et pétrochimique par exemple utilise une grande variété de catalyseurs :

- Catalyseur de métaux précieux : Platine et Paladium
- Catalyseur de nickel : procédés d'hydrogénation
(Ni \approx 10-15 %, Terres diatomées \approx 35 à 45 %
Graisses \approx 45 à 55 %)
- Catalyseur de vanadium : procédés de fabrication de l'acide sulfurique ($V_2O_5 \approx 6,0$ % - $Fe_2O_3 \approx 4,0$ % - $SiO_2 \approx 56$ %).
- Catalyseur de Co - Mo : hydrodésulfuration de produits pétroliers
(CoO \approx 3 % - $Mo_2O_3 \approx 12$ %)

L'hydrométallurgie, les industries de traitement de surface et galvanique génèrent également un certain nombre de déchets contenant des éléments métalliques qui peuvent être économiquement récupérable : Co, Ni, Cu, Cr, Zn.

L'organisme INASMET (ESPAGNE - Pays Basques) nous a fourni des déchets de catalyseurs usagés (Co - Mo) caractérisés et référencés 605 et 602.

Ces produits sont en fait très homogènes physiquement et des pré-concentrations des phases métalliques n'auraient pu se réaliser :

- . Qu'après un broyage très intense
- . Que selon une séparation magnétique très performante sur les fines particules.

Un broyage de déchets de catalyseurs en broyeur à bol pendant 2 heures a produit les échantillons sous les granulométries décrites à la figure 19.

La séparation magnétique en voie humide a été menée dans une bobine supra-conductrice équipée d'un canister comportant une matrice de type paille de fer.

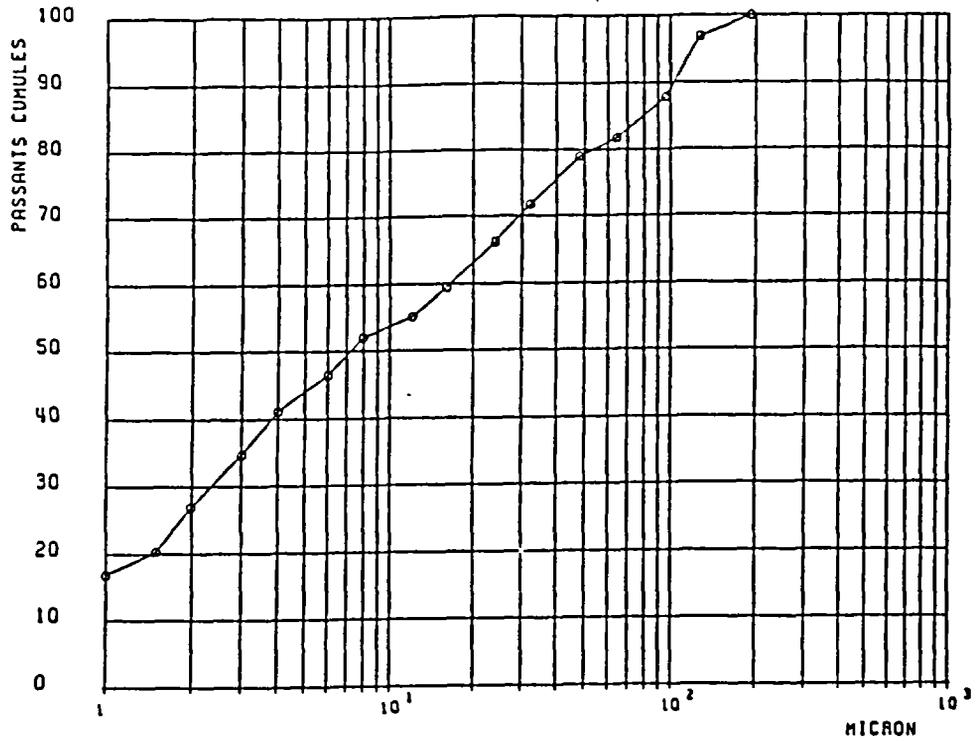
Pour l'échantillon 605, un premier test a été conduit sous un champ de 1 Tesla mais n'a pas permis de fixer de produits paramagnétiques.

Ce n'est qu'à 5 Tesla qu'un tel produit a été récupéré. L'échantillon 502 a directement été traité à 5 Tesla. Les résultats exposés aux tableaux 9 et 10 ne mettant pas en évidence d'enrichissements économiques intéressants, les produits étant restés trop homogènes sous les granularités considérées.

	Répartition masse %	Mo		Ni		Co	
		teneur %	Répartition %	teneur	Répartition	Teneur	Répartition %
Concentré non magnétique	98,5	6,00	99,6	0,07	97,5	1,92	99,8
Concentré magnétique	1,5	1,56	0,4	0,12	2,5	0,33	0,2
Tout venant	100,0	5,93	100,0	0,07	100,0	1,89	100,0

TABLEAU 9 : BILAN DE TEST DE CONCENTRATION MAGNETIQUE D'UN ECHANTILLON DE CATALYSEUR (REFERENCE 502, 5 TESLAS).

BOBINE SUPRACONDUCTRICE ECH. 502
BROYAGE FRITSCH 120 MIN

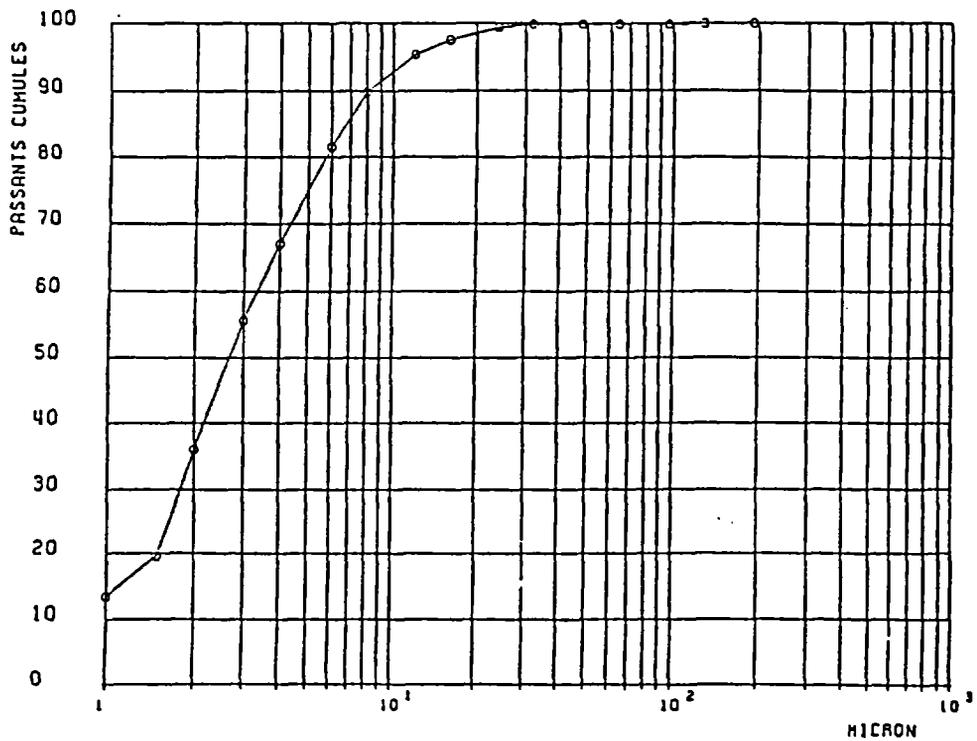


—○ 502

logiciel BRGM

Distribution granulométrique d'un déchet de catalyseur (référence 502) après broyage

BOBINE SUPRACONDUCTRICE ECH. 605
BROYAGE FRITSCH 120 MIN



—○ 605

logiciel BRGM

Distribution granulométrique d'un déchet de catalyseur (référence 605) après broyage

	Répartition masse	Mo		Ni		Co	
		teneur %	répartition %	teneur %	répartition %	teneur %	répartition %
Concentré non magnétique	96,1	7,58	97,7	5,57	96,8	0,66	99,8
Concentré magnétique	3,9	4,47	2,3	4,58	3,2	0,30	0,2
Tout venant	100,0	7,46	100,0	5,53	100,0	0,62	100,0

TABLEAU 10 : BILAN DE TEST DE CONCENTRATION MAGNETIQUE D'UN ECHANTILLON DE CATALYSEUR (REFERENCE 605, 5 TESLAS).

Les résultats obtenus sur les catalyseurs vanadium, les catalyseurs de déshydrogénation (Ni) brûlés et les boues d'épuration de l'industrie Galvanique sont donnés dans les tableaux suivants (11-12). Ces produits sont broyés dans des broyeurs à bol pour donner une granulométrie inférieure à 50 μm .

Des analyses en diffraction X ont pu mettre en évidence un pourcentage important de SiO_2 pour les catalyseurs vanadium et la présence CaCO_3 et $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ dans les boues galvaniques (figures 20 et 21).

Produits	V	Al	Mg	Ti	Mn	Nb	Fe		
Catalyseurs Vanadium	3,30	0,65	0,03	0,35	0,02	0,84	2,84		
Boues	Ba	Al	Mg	Ti	Mn	Ca	Fe	Cr	Zn
Galvaniques	0,04	0,37	0,15	1,45	0,08	8,00	9,76	0,05	0,49

TABLEAU 11 : ANALYSES CHIMIQUES DE CATALYSEURS VANADIUM USAGES ET DE BOUE DE L'INDUSTRIE GALVANIQUE.

Produits	% Poids	Analyses %			Répartition %			Catalyseurs de déshydrogénation brûlés
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ni	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ni	
P M (2 T)	77,5	44,0	2,15	30,80	76,4	70,0	91,7	Dispersant : HMP 2 passages à 2 et 7 Teslas Pulpe à 15 % solide Matrice : matelas tricoté hauteur : 30 cm
P M (7 T)	11,8	53,10	2,50	14,7	14,1	12,3	6,7	
N M	10,7	40,0	3,95	4,0	9,5	17,7	1,6	
Reconstitué	100,0	44,65	2,83	26,03	100,0	100,0	100,0	

Produits	% Poids	Analyses %							Répartition %	Catalyseurs vanadium
		V	Al	Mg	Ti	Mn	Nb	Fe	V	
P M	29,6	3,9	0,86	0,08	0,05	0,01	0,8	2,52	33,9	Dispersant : Na ₂ SiO ₃ 1 passage à 5 T Pulpe à 15 % solide Matrice : 30 cm de matelas tricoté
N M	70,4	3,20	0,9	0,06	0,04	0,015	0,66	3,20	66,1	
Reconstitué	100,0	3,41	0,89	0,07	0,04	0,015	0,70	2,99	100,0	

Produits	% Poids	Analyses %								Boues industrie Galvanique	
		Al	Ti	Mg	Cr	Mn	Zn	Fe	Ba		Ca
P M	22,2	0,5	1,35	0,22	0,05	0,095	0,48	11,8	0,07	8,25	Dispersant Na ₂ SiO ₃ 1 passage à 5 T Pulpe à 15 % solide Matrice : 30 cm de matelas tricoté
N M	77,8	0,44	1,45	0,14	0,05	0,08	0,45	9,90	0,045	7,60	
Reconstitué	100,0	0,45	1,43	0,16	0,05	0,08	0,46	10,32	0,05	7,74	

TABLEAU 12 : RESULTATS DE SEPARATION SUR CATALYSEURS ET BOUES GALVANIQUE

Mis à part le catalyseur de déshydrogénation, où près de 98 % du Ni est récupéré, les résultats des autres essais ne sont pas significatifs du fait de la parfaite homogénéité des produits même après broyage à 50 µm.

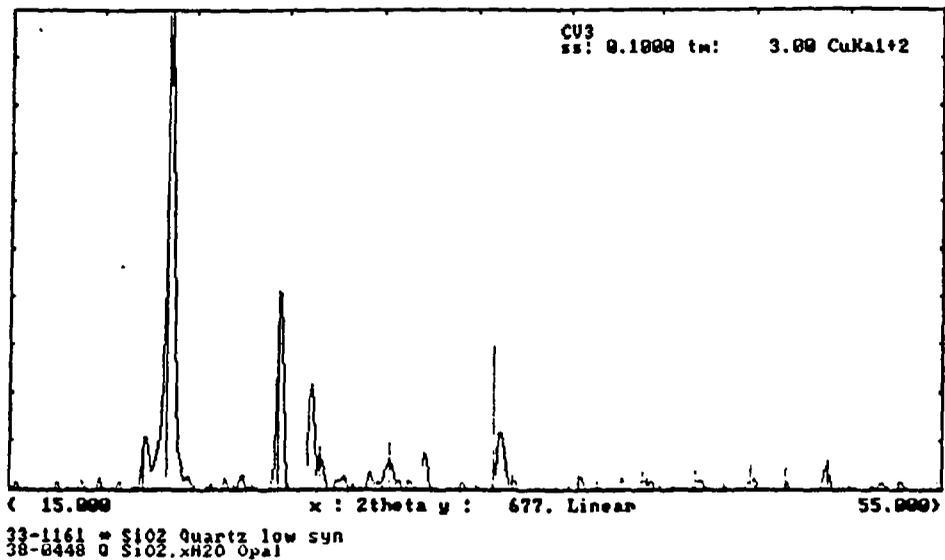
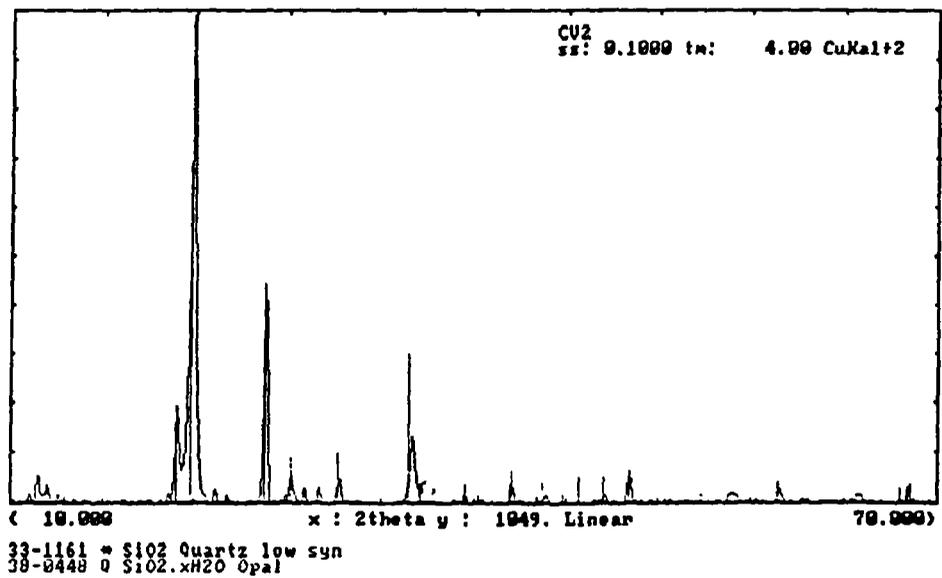
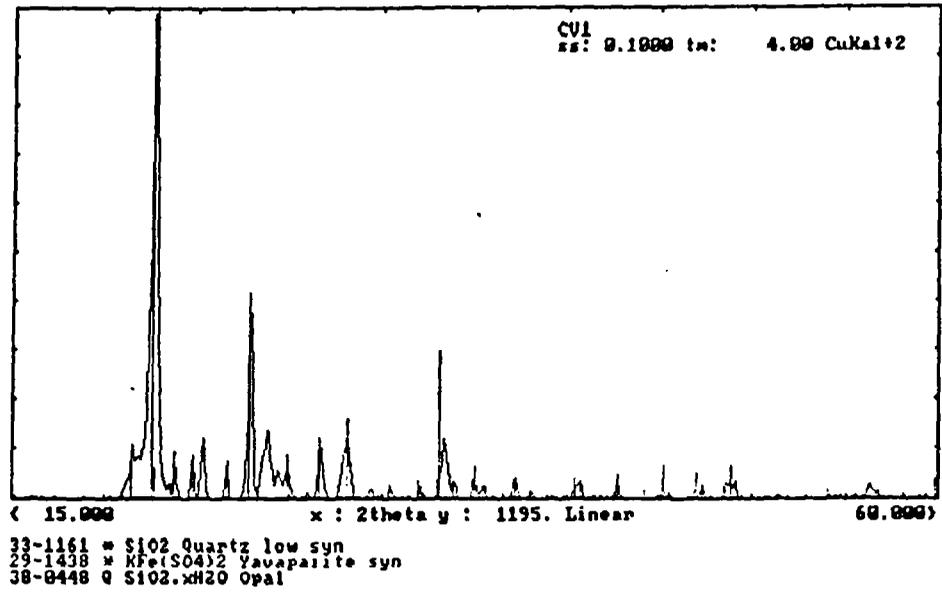


Figure 20 : Diffractogramme d'un catalyseur vanadium

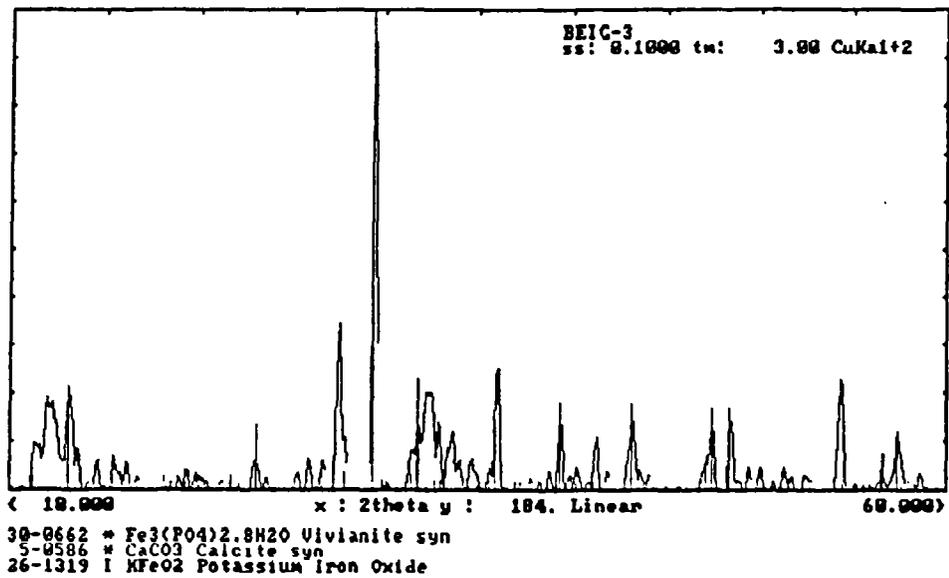
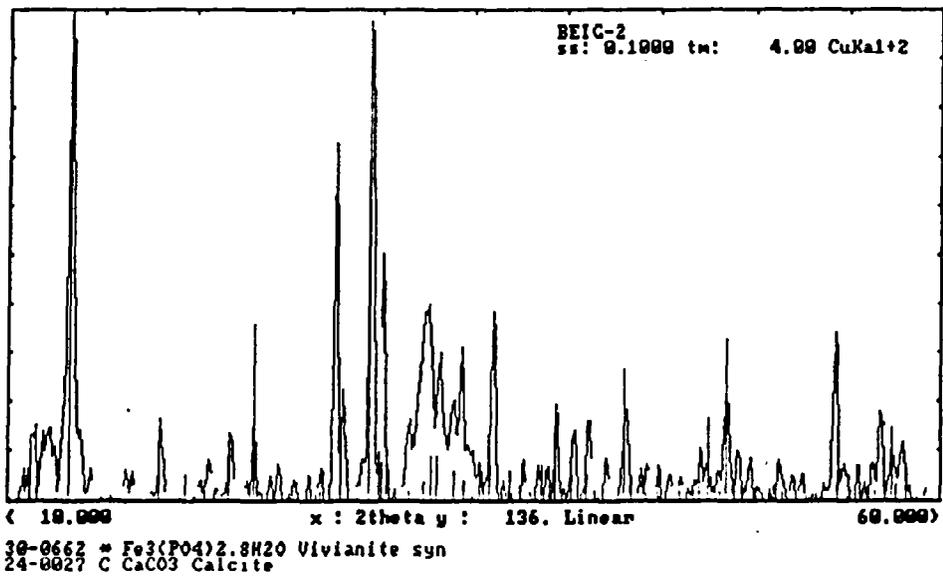
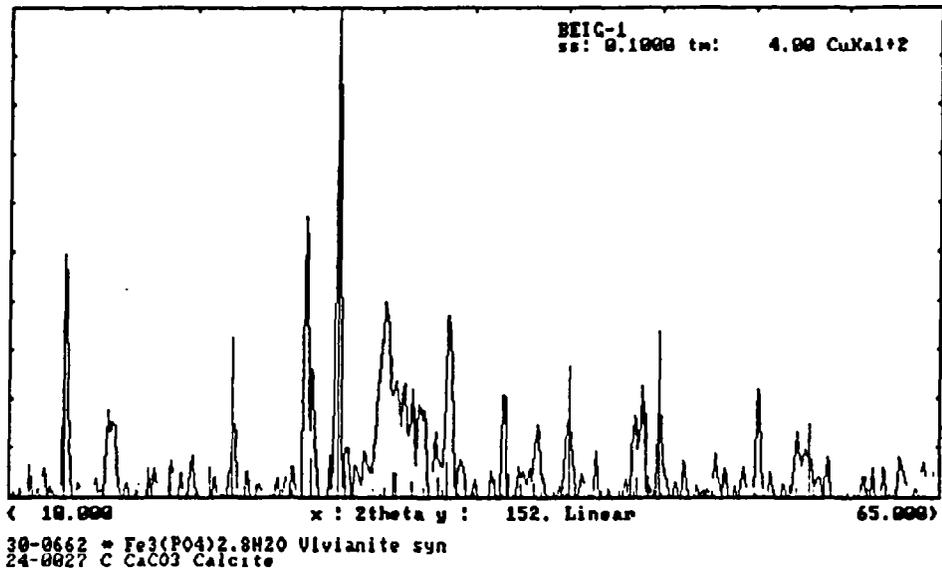
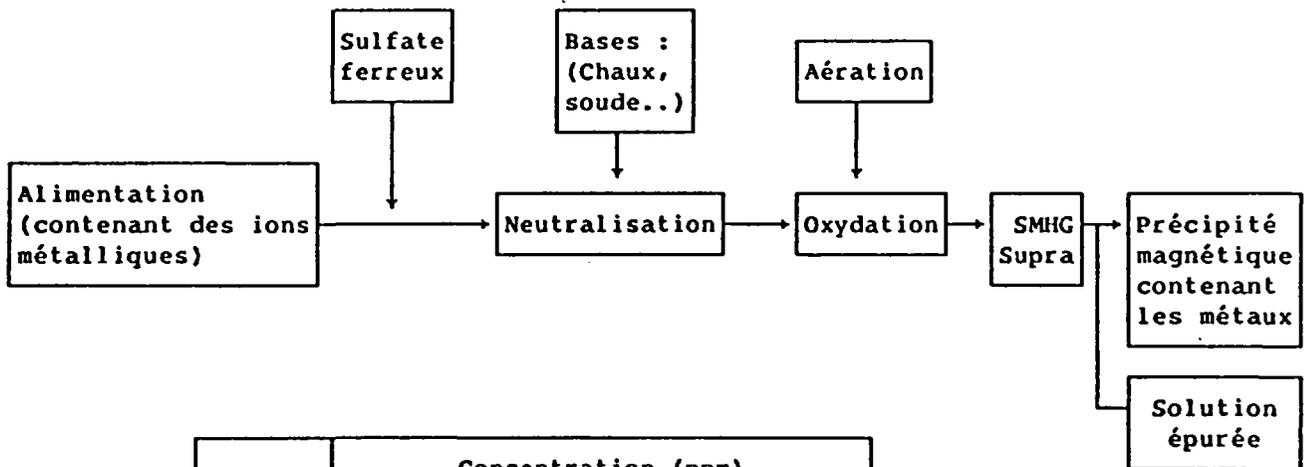


Figure 21 : Diffractogramme d'une boue galvanique

Sur des tels produits, il est nécessaire d'effectuer des analyses plus poussées pour mieux connaître les phases métalliques continues et voir s'il est possible ou non, avec un broyage plus poussé, de libérer ces dites phases.

Il est également possible d'effectuer un traitement chimique de dissolution pour faciliter la récupération. L'effluent contenant les phases métalliques est alors passé en séparation magnétique haut gradient suivant le schéma ci-dessous (figure 22).



Métaux	Concentration (ppm)	
	Alimentation	Effluent
Hg	7.4	0.001
Cd	240	0.008
Cu	10	0.01
Zn	18	0.016
Cr	10	< 0.01
Ni	1 000	0.2
Mn	12	0.007
Fe	600	0.06
Bi	240	0.1
Pb	475	0.01

Figure 22 : Schéma d'épuration d'un fluide contenant des métaux lourds et résultats

Dans une solution aqueuse, où il y a des ions divalents ferrifères, l'addition d'une base, suivie d'une oxydation forment des ferrites de type $M_x Fe_{3-x} O_4$ avec d'autres ions métalliques non ferreux.

Les métaux lourds absorbés sur les floccs d'hydroxydes ferriques, après floculation magnétique (à base de magnétite fine) sont facilement

extraits par séparation magnétique.

Ce type de schéma, de mise en oeuvre facile, devrait apporter des solutions intéressantes aux problèmes de recyclage et d'environnement.

b) Essais sur scories de la métallurgie des non ferreux

Deux essais ont été menés sur des scories de la métallurgie de non ferreux. Le premier provient de la société Europe Métal et contient essentiellement du Cuivre et du Zinc. Les résultats de séparation sont consignés au tableau 13.

Produits	Analyse %					% Répartition				Conditions
	Poids	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	
P M	25,9	20,07	34,16	5,75	0,88	52,4	22,2	74,1	29,6	Granulométrie naturelle < 100 µm Champ : 2 T Pulpe : 20 % solide Matrice : 20 cm de matelas tricoté
N M	74,1	6,37	41,85	0,70	0,73	47,6	77,8	25,9	70,4	
Reconstitué	100,0	9,92	39,86	2,01	0,77	100,0	100,0	100,0	100,0	

TABLEAU 13 : RESULTAT ET CONDITIONS D'ESSAIS DE SEPARATION D'UNE SCORIE

L'examen du tableau montre qu'il est possible de récupérer plus de 50 % du Cu contenu. Un broyage de ce produit devrait améliorer les résultats.

La deuxième série provient provient d'une halde de scorie de décrotage de la fusion du vanadium.

Sur ce produit, différents essais de séparation magnétique ont été effectués avec les appareils suivants :

- Séparateur haut champ à aimant permanent (PERMROLL)
granulométrie \approx 1 mm

- Séparateur haute intensité à sec à rotor induit (TV et TV rebroyé à - 500 et - 250 μm).

- Séparateur haute intensité humide de type "Jones" (TV et TV rebroyé à - 100 μm).

- Séparateur haut gradient supraconducteur (- 100 μm).

Cette première campagne d'essais a pu montrer que :

* L'analyse granulométrique du produit montre qu'il est possible de récupérer environ 43 % du vanadium métal contenu (teneur à 62,8 V) par tamisage à 500 μm ; la partie inférieure pouvant alors être valorisée par séparation magnétique haute intensité/haut gradient.

* Le séparateur PERMROLL ne permet pas d'obtenir un stérile franc (38,5 % Poids, à 15,3 % de V et 47 % de répartition, avec le schéma et les réglages adoptés (dégrossissage sur bande moyenne épaisseur, épuisage sur bande fine).

* La séparation magnétique haute intensité voie sèche montre bien l'influence de la granulométrie sur le traitement. La libération du vanadium est effective à partir de 250 μm et pour un champ d'environ 2 T (4 passages à intensités différentes).

La séparation magnétique haute intensité voie humide est plus sélective. Lors du traitement du tout venant rebroyé à 100 microns, 85 % du vanadium contenu peut être récupéré en deux passages (teneur moyenne de 20 % en V) et les stériles semblent correctement épurés. Pour des granulométries inférieures à 100 μm , les matrices de types laines de fer offrant des forces d'attraction plus élevées semblent plus appropriées pour ces éléments de faibles susceptibilités.

La séparation haut gradient, haut champ sur bobine supraconductrice permet d'obtenir un concentré à 18 % de teneur V avec 94 % de récupération, et un stérile parfaitement épuré. La teneur relativement faible de ce concentré, vis à vis de la SMHI classique, peut s'expliquer par le fait d'un piégeage mécanique dû à une surface de passage restreinte (diamètre intérieur de bobine 2 cm) qui entraîne un taux de chargement de la matrice trop important. Les résultats de ses premiers

essais sur bobine supraconductrice sont consignés au tableau 14, suivant le schéma de la figure 23.

Produits	Teneur en éléments chimiques en %						
	% Poids	% V	% Pb	% Cu	% Cr	% Mn	% Ni
M 1T	58,4	18,0	0,08	0,175	0,132	0,272	0,017
M 3T	8,3	2,0	0,257	0,276	0,085	0,214	0,020
M 5T	4,4	3,8	0,151	0,342	0,045	0,570	0,016
N M	28,9	1,3	0,142	0,395	0,023	0,082	0,017
Alimentat.	100,00	11,22	0,115	0,254	0,093	0,225	0,017

Produits	Répartition métal %					
	q V	q Pb	q Cu	q Cr	q Mn	q Ni
M 1T	93,7	40,4	40,2	83,1	70,5	57,7
M 3T	1,5	18,4	9,0	7,6	7,9	9,6
M 5T	1,5	5,7	5,9	2,1	11,1	4,1
N M	3,3	35,5	44,9	7,2	10,5	28,6
Alimentat.	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

TABLEAU 14 : RESULTATS DE LA SEPARATION A HAUT GRADIENT ET HAUT CHAMP.

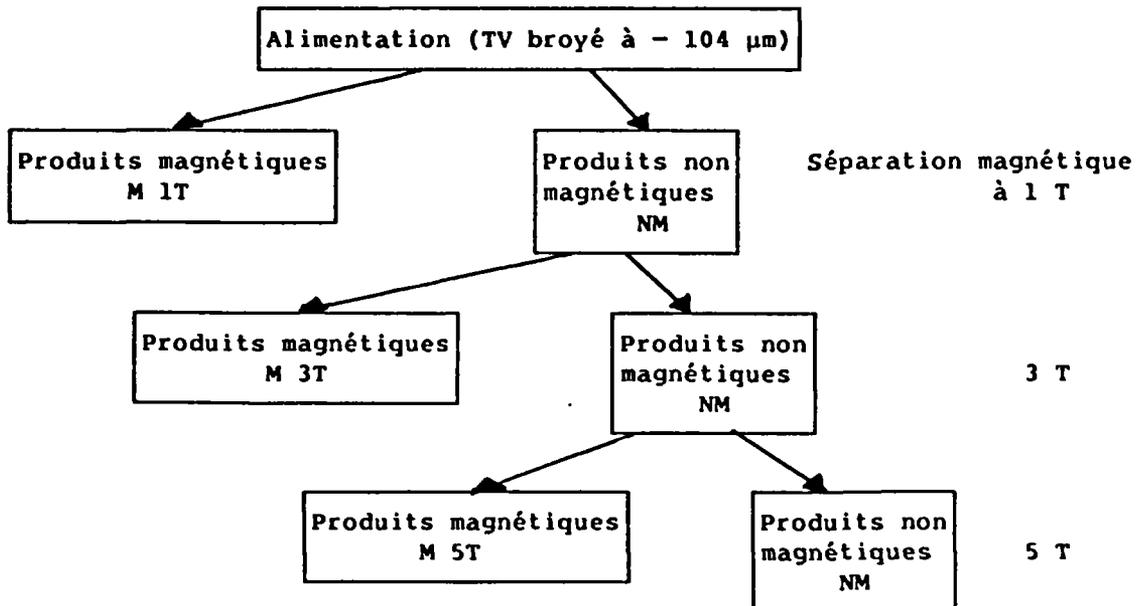
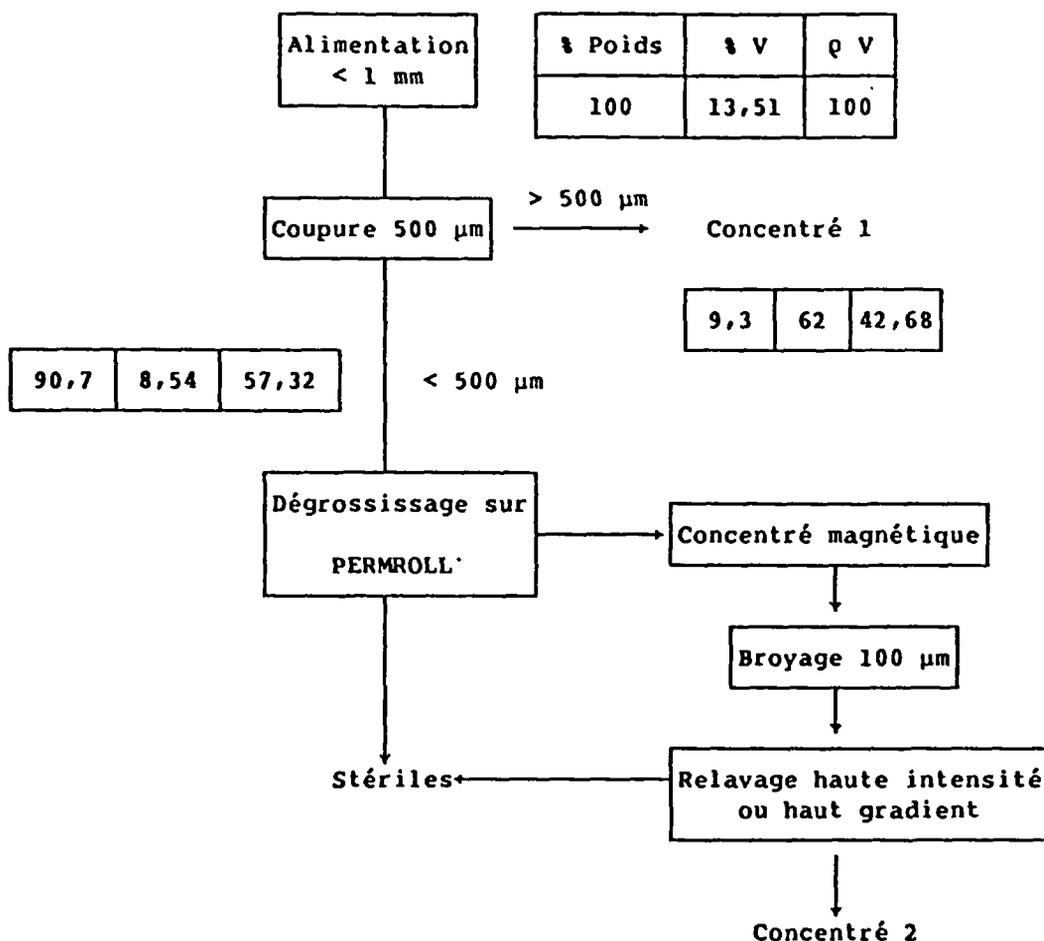


Figure 23 : flowsheet du traitement sur bobine supraconductrice

Au vue des premiers résultats obtenus, l'étude a été reprise suivant le schéma défini ci-après.



L'analyse granulométrique a effectivement montré que 42 % du Vanadium (teneur 62 % V) se trouvait dans les éléments supérieurs à 500 µm. De ce fait, seule la tranche inférieure à 500 µm sera traitée en séparation magnétique.

L'observation binoculaire du produit + 500 µm, a montré également que celui-ci était constitué de petites billes ou granulés métalliques riches en vanadium.

La séparation sur PERMROLL est très sensible au coefficient de forme et suivant la manière dont se présentent les particules dans la zone active de champs, celles-ci suivant leurs formes peuvent très bien ne pas être retenues.

De plus, l'efficacité de séparation sur les produits fins, est plus

faible que sur les autres types de séparateurs. Ces deux points peuvent expliquer le fait que le stérile des premiers essais sur PERMROLL, contenait encore 46 % de Vanadium (à une teneur de 15 %).

Les essais suivants de dégrossissage ont été conduits suivant deux réglages différents (tableau 15) et montrent que dans ce cas, les stériles sont relativement bien épurés.

Les résultats de séparation sont consignés au tableau 15, et nous ont permis de définir le schéma général de traitement, mentionné ci-dessus.

TABLEAU 15 : RESULTATS DE SEPARATION SUR PERMROLL

Produits	% Poids	% V	q V	
I Mag 1 + 2	75,1	9,23	51,32	Vitesse rotor 150 tr/mn Alimentation 100 kg/h
N M	15,6	5,20	6,00	Position volet 4
TV reconstitué	90,7	8,537	57,32	2 passages sur bandes fines retraitement des N M
II Mag 1 + 2	80,4	9,18	54,62	Vitesse rotor 100 tr/mn Alimentation 100 kg/h
N M	10,3	3,56	2,70	Position en volet 4
TV reconstitué	90,7	8,54	57,32	Deux passages sur bande fine

Les produits magnétiques issus du séparateur PERMROLL sont ensuite rebroyés à 100 μ m afin de parfaire la libération avant d'être relavés en séparation haute intensité ou haut gradient.

Les mêmes conditions d'essais ont été conservés, sauf pour les passages sur bobines supra ; dans ce cas une simulation d'augmentation de la surface de collection est réalisée afin de diminuer au maximum les effets de chargement de la matrice ; donc les piégeages mécaniques (surface doublée ou triplée).

Les résultats sont consignés aux tableaux 16 et 17. Dans les deux cas de retraitement Haute Intensité ou Haut Gradient, on remarque que les conditions de dégrossissage sur PERMROLL affectent peu la teneur du concentré final. Le schéma II permet d'augmenter la récupération du vanadium de 6 points. La séparation Haut Gradient donne également de

meilleurs résultats : augmentation de la teneur et de la récupération, stériles mieux épurés. Dans les deux cas, ceci est dû à une meilleure récupération dans les produits fins.

TABLEAU 16 : RESULTAT DE LA SMHI

Produits		% Poids	% V	ρ V	Conditions-remarques
I	Mag	25,4	21,07	39,61	SMHI sur Jones Entrefer = 1 mm Champ = 1,9 T Matrice : plaques dentées Pulpe : 20 % Vitesse alimenta- tion : 9 l/mn Eau lavage : 3 l/mn
	N M	49,7	3,18	11,71	
	Alimentation	<u>75,1</u>	<u>9,23</u>	<u>51,32</u>	
II	Mag	22,8	21,48	45,79	
	N M	51,6	2,31	8,83	
	Alimentation	<u>80,4</u>	<u>9,17</u>	<u>54,62</u>	
I	+ 500 μm	9,3	62,0	42,68	Bilans généraux des schémas I et II Dégrossissage PERMROLL Relavage magnétique sur séparateur Jones
	Mag	25,4	21,07	39,61	
	N M	65,3	3,66	17,71	
	Alimentation	<u>100,00</u>	<u>13,58</u>	<u>100,00</u>	
		34,7	32,5	82,29	
II	+ 500 μm	9,3	62,0	42,68	
	Mag	28,8	21,48	45,79	
	N M	61,9	2,52	11,53	
	Alimentation	<u>100,00</u>	<u>13,58</u>	<u>100,00</u>	
		38,1	31,37	88,47	

TABLEAU 17 : RESULTAT DE SEPARATION SUR BOBINE SUPRACONDUCTRICE

Produits		% Poids	% V	ρ V	Conditions-remarques
I	Mag	27,9	23,36	48,25	- Bobine supraconductrice ϕ 20 mm - Champ : 5 T - Matrice:matelas tricoté - hauteur matrice 20 cm - pulpe : 15 % - augmentation surface x 2
	N M	47,2	0,88	3,07	
	Alimentation	<u>75,1</u>	<u>9,23</u>	<u>51,32</u>	
II	Mag	30,2	23,59	52,72	
	N M	50,2	0,51	1,90	
	Alimentation	<u>80,4</u>	<u>9,19</u>	<u>54,62</u>	
I	+ 500 μ m	9,3	62,00	42,68	- Bilan général des schémas I et II - Dégrossissage PERMROLL avec Relavage magnétique sur bobine supraconductrice
	Mag	27,9	23,36	48,25	
	N M	62,8	1,95	9,07	
	Alimentation	<u>100,0</u>	<u>13,58</u>	<u>100,00</u>	
II	+ 500 μ m	9,3	62,00	42,68	
	Mag	30,2	23,59	52,72	
	N M	60,5	1,03	4,60	
	Alimentation	<u>100,0</u>	<u>13,51</u>	<u>100,00</u>	

Les essais ont été également repris, en séparation magnétique Haut Gradient, sur le produit brut rebroyé à 100 et 50 μ m afin de confirmer les premiers résultats obtenus.

Une augmentation de la surface de collection, montre effectivement, que la dégradation des résultats obtenus précédemment était due à un taux de chargement trop élevé, entraînant un piégeage mécanique important.

Les résultats consignés au tableau 18, montrent une légère amélioration à 50 μ m et qu'un seul passage à 3 T (100 μ m) suffit à obtenir un concentré de qualité équivalente à ceux obtenus avec un schéma plus complexe I ou II (PERMROLL + Haut Gradient ou Haute Intensité).

Produits	% Poids	% V	ρ V	Condition
Mag	35,4	36,49	95,61	Granulométrie: - 50 μm Champ : 5 T Pulpe : 15 % solide Matrice: laine de fer Hauteur : 30 cm Surface x 3
N M	64,6	0,92	4,39	
Alimentation	<u>100,0</u>	<u>13,15₂</u>	<u>100,0</u>	
Mag 1T	32,2	35,12	83,71	Granulométrie: -100 μm Champ : 1-3-5 T (retraitement des non magnétiques) Pulpe : 15 % solide Matrice : matelas tricoté Hauteur : 20 cm Surface x 3
Mag 3T + 5T	7,6	21,19	11,92	
N M	60,2	0,98	4,37	
Alimentation	<u>100,0</u>	<u>13,50₉</u>	<u>100,00</u>	
Mag 3T	37,5	34,19	94,90	Granulométrie: -100 μm Champ : 3 T Pulpe : 15 % solide Matrice : matelas tricoté Hauteur : 20 cm Surface x 4
N M	62,5	1,10	5,10	
Alimentation	<u>100,0</u>	<u>13,51</u>	<u>100,00</u>	

TABLEAU 18 : RESULTAT DE CONCENTRATION SUR BOBINE SUPRACONDUCTRICE

IV - CONCLUSIONS GENERALES

On peut dire que désormais la cryoélectricité s'impose dans le domaine à courant continu de grande taille ou à champ magnétique élevé. Cette technologie a atteint un stade commercial avec certaines applications et les obstacles à sa généralisation s'estompent avec la diminution des contraintes d'exploitations cryogéniques. Dans le même temps, son champ d'application s'étend vers le matériel à courant alternatif auquel elle confère des avantages de légèreté, compacité, rendement, silence et temps de réponse très courts. Il paraît donc raisonnable d'estimer que les activités considérées plus haut ne peuvent aller sans retombées industrielles et que dans la décennie à venir, pourrait s'ouvrir à la supraconductivité à la fois un marché d'application de nouvelles technologies et un marché de renouvellement de matériels existants.

L'électrotechnique de demain sera "supraconductrice" affirment en substance les spécialistes d'Alstom. la cryoélectricité, ainsi baptisée

par les chercheurs, révolutionnera la technologie des "appareils électriques" du XXIème siècle.

Dans l'état actuel de nos possibilités technologiques et de nos connaissances fondamentales de la physique, la supraconductivité n'a pas dit son dernier mot. Depuis quelques années, en effet, les progrès scientifiques dans ce domaine laissent entrevoir la possibilité d'obtenir des matériaux complètement dépourvus de résistance électrique à la température ordinaire. La figure 15 montre l'évolution rapide dans la découverte de nouveaux matériaux. Depuis 1972, on détenait le record avec des matériaux de type Nb_3Ge Al dont la température critique était aux environs de $23^{\circ} K$ ($-250^{\circ} C$) et que seul l'hélium liquide permettait alors d'atteindre. La découverte récente d'une nouvelles classe de matériaux comme oxydes métalliques complexes ou céramiques à base d'yttrium, de baryum et de cuivre ayant des propriétés supraconductrices à $98^{\circ} K$ pourrait révolutionner les domaines de l'électrotechnique dans les années à venir.

Les supraconducteurs actuels sont des matériaux dotés d'un réseau cristallin simple et la conduction de l'électricité est assurée par des électrons qui circulent dans les trois dimensions. La structure chimique des nouveaux matériaux supraconducteurs est très différente. Nous ne sommes plus en présence de réseaux simples mais de cristaux faits de couches d'atomes superposées, (une couche d'atome de cuivre entourée des deux côtés d'atomes de baryum et d'une terre rare, Lanthane ou yttrium), des atomes d'oxygène assurant la cohésion de l'ensemble. Mais si la structure des matériaux est différente, la supraconductivité dans ces corps a la même origine : la façon de se déplacer des électrons qui n'est pas la même que dans les conducteurs ordinaires.

Toutes ces applications devraient pouvoir fonctionner à la température de l'azote liquide ($77^{\circ} K$) qui est très facile à obtenir industriellement. Ceci aurait pour effet un développement rapide des applications déjà étudiées sur les supraconducteurs classiques mais qui n'ont pas encore débouché industriellement pour des raisons économiques et de commodités (température trop basse exigeant l'emploi d'hélium liquide).

Nous avons vu qu'un matériau supraconducteur peut se qualifier par quatre caractéristiques précises (T_c , H_c , J_c et énergie de création des

paires) auxquelles il convient dans la pratique d'ajouter deux qualités supplémentaires :

- Résistance mécanique très importante si l'on veut utiliser le matériau sous de grands courants et avec de grands champs, ce qui fait apparaître des forces internes considérables.

- Stabilité chimique. Le supraconducteur ne doit pas se détériorer dans le temps ni être trop sensible aux agents extérieurs.

Les possibilités d'application de ces nouveaux matériaux vont donc dépendre de l'ensemble de ces qualités. Or, en ce qui concerne ces composés, certains de ces paramètres sont encore inconnus. Ce n'est que quand ils auront été mesurés que l'on pourra affirmer si telle ou telle application est envisageable. Ces études peuvent donc durer assez longtemps car leurs structures ne sont pas simples et leurs caractéristiques dépendent énormément des conditions dans lesquelles ils ont été formés. Il s'agira ensuite de les mettre en forme, d'en faire des fils ou des couches minces, d'apprendre à s'en servir et à améliorer leurs propriétés mécaniques et électriques par divers traitements, principalement thermiques et également, et surtout à les fabriquer au moindre coût, et à les contrôler. Déjà des industriels se lancent dans le développement, et toute une industrie est en train de naître, mais il ne faut pas espérer leurs débouchés avant au moins 10 ans. Mais si des supraconducteurs à la température ordinaire sont possibles, les perspectives deviennent énormes. Les applications précédentes existent toujours mais elles se généralisent. Les recherches fondamentales et appliquées devraient découvrir de nouveaux composés plus performants. Actuellement, les électrons conducteurs sont fournis par des atomes de cuivre. A priori, tout autre métal à valence multiple pourrait convenir, et on peut donc songer au manganèse, fer, nickel.... Les nouveaux matériaux supraconducteurs sont fortement anisotropes du fait de la répartition dans un plan des atomes métalliques qui fournissent les électrons. Cette propriété n'est pas exploitée car, pour l'instant du moins, les microcristaux qui forment les céramiques supraconductrices ne sont pas orientés. La fabrication de texture orientée permettrait d'exploiter de nouvelles propriétés dont on ignore totalement les conséquences. En fait, la révolution est si profonde que personne ne peut en mesurer l'ampleur ni les caractéristiques. De nombreuses applications inattendues surgiront quand les possibilités techniques existeront.

L'adaptation de circuit cryoélectrique dans les domaines de la séparation magnétique des ultrafines devient désormais possible. Il est indéniable que le fait de travailler avec des champs élevés permet d'obtenir avec un flow-sheet moins complexe des rendements d'opération maximum au moindre coût (vis à vis d'autres traitements).

Une première investigation des possibilités d'utilisation de cette nouvelle génération de séparateur fait ressortir les différents domaines potentiels ou son application pourrait apporter des solutions avantageuses:

- Epuration de minéraux à indice de blancheur élevée (grande valeur ajoutée)
- Epuration des sulfures dans les charbons
- Epuration de fluides (eaux urbaines ou industrielles, effluents des industries chimiques, pétrolières, de traitement de surface, hydrométallurgiques,....)
- Epuration de gaz ou de fumée
- Domaine de l'environnement et du recyclage.....

Maintenant qu'il a été démontré qu'il était possible d'introduire dans les milieux de production des systèmes cryomagnétiques fiables et d'utilisation aisée, il faudrait de la part des constructeurs (et des utilisateurs potentiels) la volonté de construire un pilote de démonstration afin de mieux cerner les caractéristiques exactes d'exploitation et de faire un bilan économique.

Car l'évolution dans ce domaine est rapide et de nouveaux secteurs d'activité peuvent s'ouvrir à cette méthode et il ne faut surtout pas perdre de vue que d'ici quelques années tout un parc de matériel sera à renouveler dans le secteur traditionnel minier, et il serait dommage que l'industrie Française bien placée en cryoélectrique et matériel minier ne soit pas sur ce marché.

VI - ANNEXESDESCRIPTION ET CARACTERISTIQUES DES
MONTAGES EXPERIMENTAUX SUPRACONDUCTEURS

- ϕ interne 20 mm

- ϕ interne 120 mm

CONSEIL TECHNIQUE SUR
L'UTILISATION DE BOBINES SUPRACONDUCTRICES POUR LE
TRI MAGNETIQUE

Cette étude a été réalisée pour l'Université de Géologie de Nancy. Le Cahier des Charges en était le suivant :

- Diamètre utile : 120 mm
- Champ de 5 Tesla minimum sur 20 cm de hauteur sur l'axe et autour du centre
- Temps de montée à 5 T : environ 100 secondes
- Intensité maximum : 220 A (ce sont les caractéristiques de l'alimentation disponible à l'Université de Nancy)
- Accessoires adaptables également sur la bobine mise à disposition par ALSTHOM

Notre étude se décompose en deux parties :

- Accessoires
- Bobine de 5 T et son cryostat

I. ACCESSOIRES

Dans un premier temps, pour mettre en service notre bobine (diamètre utile 20 mm). mise à votre disposition, de manière à ce qu'il y ait également compatibilité avec la seconde bobine (diamètre utile 120 mm), nous vous conseillons le matériel ci-après :

1) Canne de transfert hélium composée de :

- $\frac{1}{2}$ siphon de transfert avec branche verticale
longueur : 1 250 mm - diamètre : 12 mm et flexible L : 500 mm avec
johnston mâle.

- $\frac{1}{2}$ siphon de transfert avec branche verticale
L : 1 000 mm - diamètre : 12 mm extérieur avec vanne de réglage de débit - longueur flexible : 500 mm avec johnston femelle
- 2) 1 manodétendeur pour hélium gaz
- 3) Jauges de niveau hélium :
 - jauge ponctuelle à résistance. Convierdrait pour sonder le niveau du dewar d'hélium
 - jauge à lecture continue constituée :
 - A) d'un jonc longueur 1 200 mm 500 mm de lecture
 - B) un coffret de lecture
 Cette jauge convierdrait pour connaître le niveau d'hélium dans le cryostat.

II. BOBINE ET CRYOSTAT

Après avoir pris connaissance du Cahier des Charges ainsi que des plans que vous nous avez fait parvenir, nous sommes en mesure de définir une bobine et son cryostat, présentant les caractéristiques suivantes :

A) BOBINE

- Diamètre sous fil : 156 mm
- Diamètre sur fil : 183,5 mm
- Hauteur : 350 mm
- Nombre de couches : 20
- Nombre de spires par couches : 448
- Nombre total de spires : 8 960
- Inductance : 5 H
- Intensité nominale: 194 A
- Inductance au centre : 5,6 T
- Temps de charge : 100 secondes environ

Brin utilisé pour le bobinage :

- Type C 66
- Diamètre du brin : 0,7 mm
- Rapport cuivre/supra : 1,8
- Longueur nécessaire : 5 000 m

Mandrin de la bobine en matière isolante, la protection de la bobine étant assurée par une résistance de décharge.

- Courbe $B = f(Z)$ pour $r = 0$ (joint en annexe 1)
- Courbe $B = f(Z)$ pour $r = 50$ m (joint en annexe 2)

B) CRYOSTAT

Le cryostat a les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : 1 428 mm
- Diamètre extérieur : 340 mm
- Diamètre intérieur utile : 120 mm

L'isolation est assurée par une enceinte à vide ainsi que par plusieurs couches de superisolant.

Il est équipé :

- D'une soupape de sécurité 1,3 bar
- D'un manomètre -1/+1,5 bar
- D'un presse étoupe pour canne de transfert \varnothing 12 mm
- D'un connecteur 9 broches GEIGER (pour mesure de température)
- De 2 sorties de courant pour l'alimentation de la bobine

ainsi que de tout le matériel permettant de faire les rinçages lors de la mise en froid.

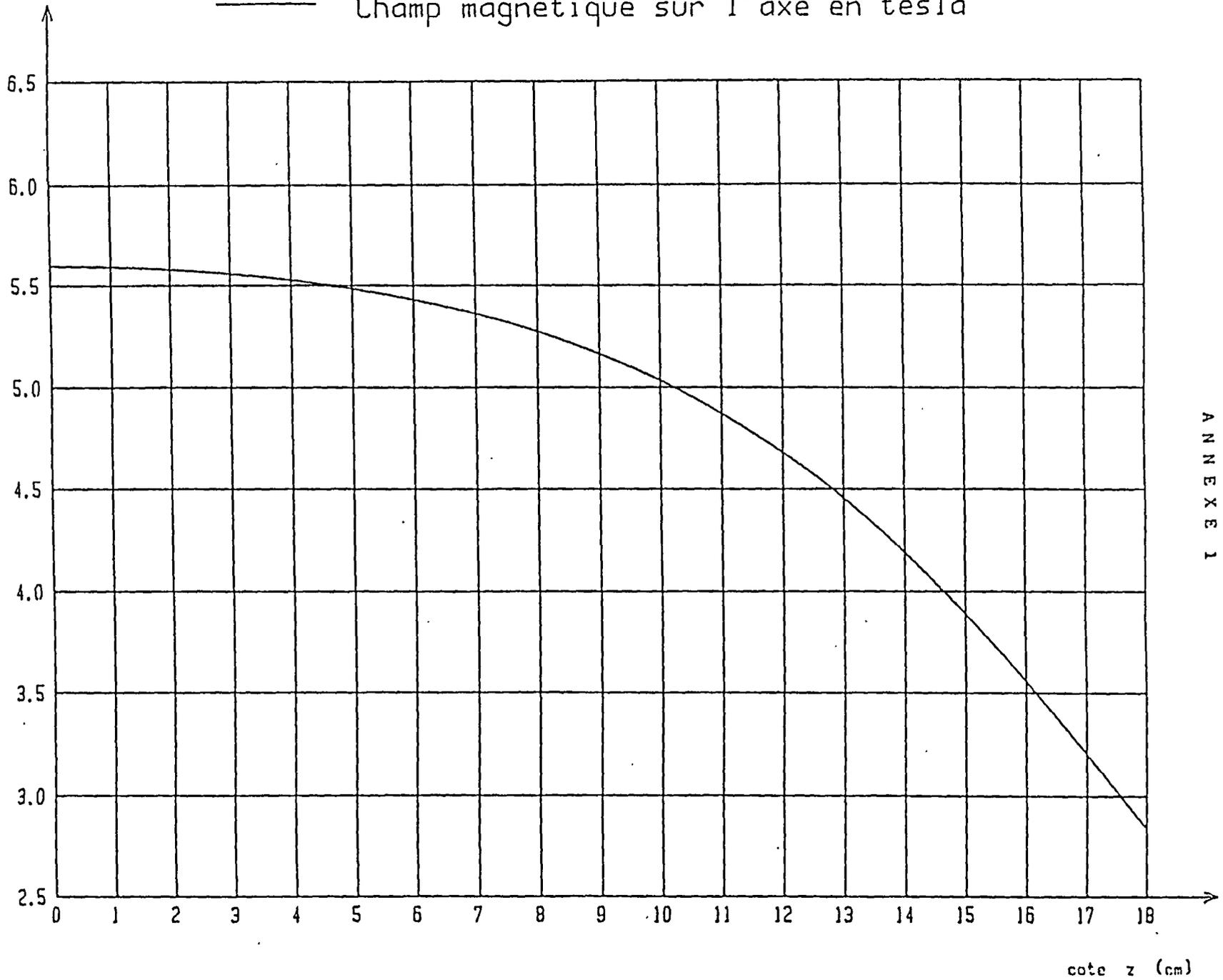
Plan de l'ensemble joint en annexe 3 .

Plan de la bride supérieure joint en annexe 4.

Nous conseillons pour l'ensemble un montage métallique.

ALSTHOM	
BOBINE DE TRI MAGNETIQUE 5 T	
BFA/E/DEA-T	23/03/89

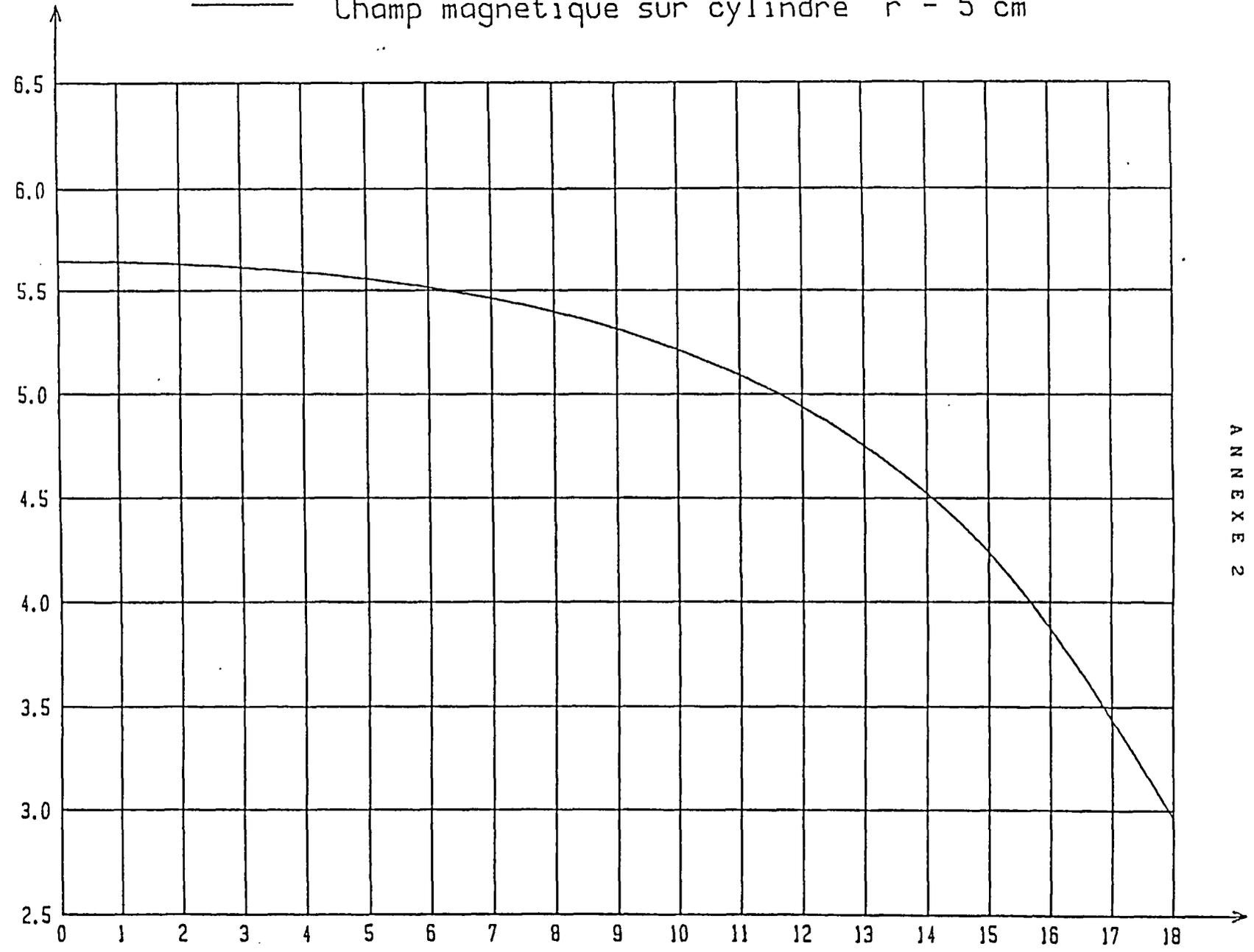
— Champ magnétique sur l'axe en tesla



ANNEXE 1

ALSTHOM	
BOBINE DE TRI MAGNETIQUE S I	
BFA/E/DEA-T	23/03/89

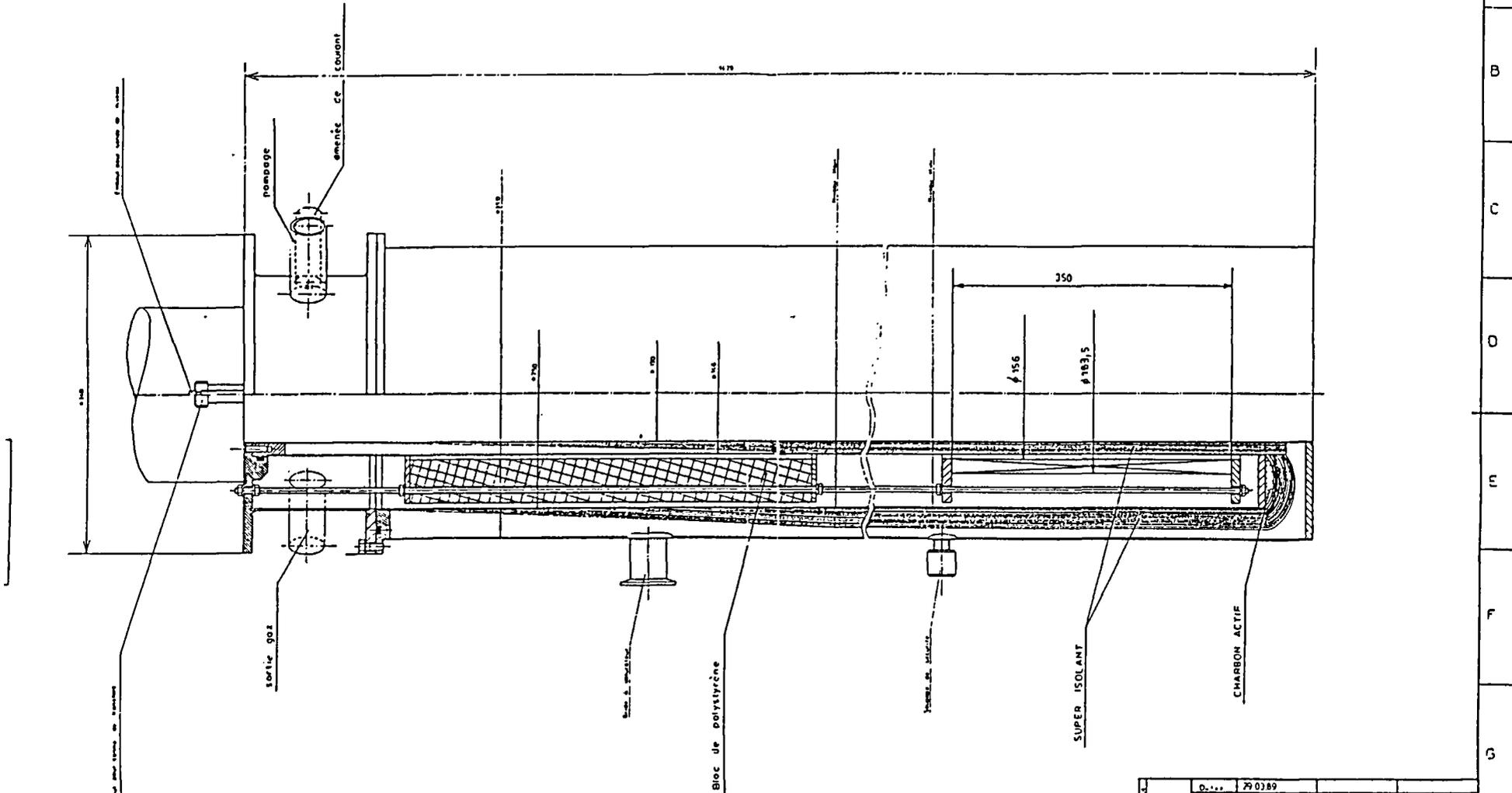
— Champ magnétique sur cylindre $r = 5$ cm



ANNEXE 2

cote z (cm)

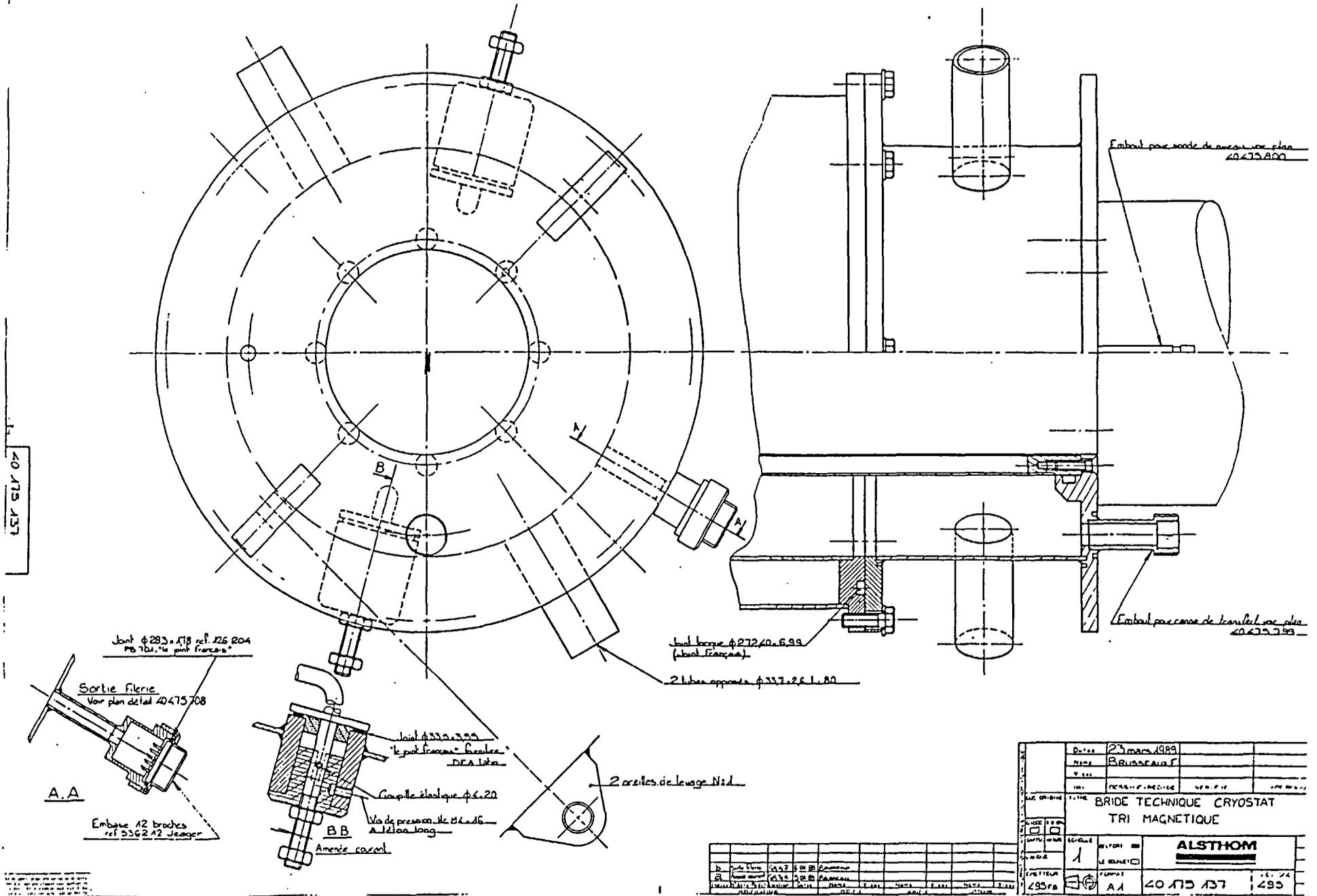
ANNEXE 3



D. n°	79 0389		
NOM	GIRARD M		
N. n°	272		
DE	ÉCOLE DE GÉOLOGIE	VERTEP. DE	APP. MÉCAN.
Projet de cryostat Iri magnétique $\phi 120$ mm			
ÉCOLE DE GÉOLOGIE DE NANCY			
DATE	27/8	REV. N°	1/2
ÉCH. N°	F	PROJET	ALSTHOM
N. n°	408	PROJET	40 125 048

101 1007 4 55-1
 101 1007 4 55-1
 101 1007 4 55-1

ANNEXE 4



DATE	23 mars 1989		
DESIGNER	BRUSSEAU F		
VERIF			
REV	DESIGNER / MODIFIE		
OBJET: BRIDE TECHNIQUE CRYOSTAT TRI MAGNETIQUE			
ALSTHOM			
PROJET	40475 137	REV	24
DESIGNER	A1	VERIF	495

ALSTHOM	Code Emetteur	N°	Date	Nom de l'émetteur	Page	Classement Emetteur	Classement Destinataire
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	89 LC 002	16/02/89	JP BARRE	1		

Diffusion :

Nature de la Note : NOTE TECHNIQUE

Objet : NOTICE D'UTILISATION BOBINE SUPRACONDUCTRICE D'ESSAIS
POUR TRI MAGNETIQUE
DISPOSITIF D'ESSAI schéma 40-375 495

1 - DESCRIPTION DE L'ENSEMBLE

Ensemble comprenant une bobine supraconductrice dans un cryostat à bain d'hélium.

1.1 Caractéristiques de la bobine à 4,2 K

Champ magnétique en fonction du courant

I (A)	B (tesla)
10,124	1
20,248	2
30,372	3
40,497	4
50,621	5
60,745	6
70,870	7

Tension aux bornes de la bobine en montée en courant :
2 à 3 volts.

Résistance de la bobine et de sa résistance de protection :
à 300 K : $R = 7\Omega$; à 77 K $R = 4,8\Omega$

Self théorique : 6 H

1.2 Caractéristiques du cryostat

Encombrement : \emptyset extérieur 220 mm
hauteur 915 mm
tube central passage \emptyset 20 mm

Vase hélium : \emptyset intérieur : 36 mm
 \emptyset extérieur : 157 mm
hauteur : 870 mm

Volume d'hélium liquide : 11 l

Autonomie : 2 h max. à 7 tesla.

Contrôle des niveaux haut et bas par sonde carbone

Sonde haute R	512 Ω	666 Ω	11,81 k Ω
Sonde basse R	510 Ω	679 Ω	12,73 k Ω
Température T	300 K	77 K	4,2 K

<u>ALSTHOM</u>	Code Emetteur	N°	Date	Nom de l'émetteur	Page	Classement Emetteur	Classement Destinaire
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	89 I.C OC2	16/02/89	JP BARRE	2		

Observations

2 - UTILISATION PRATIQUE : Mise en froid et remplissage de l'hélium liquide.

2.1 Prérefroidissement à l'azote liquide

Pour limiter la consommation d'hélium liquide, on fait un prérefroidissement en utilisant de l'azote liquide. Cette opération se fait par siphonnage depuis un tank d'azote au moyen d'un tube en U plongeant dans le tank et dans le vase hélium. On pressurise le réservoir pour faire circuler l'azote du tank vers le cryostat.

Pour éviter les chocs thermiques, on fera en sorte que le prérefroidissement se fasse en 1 heure minimum. Pour se faire, on limite la pression dans le tank d'azote liquide à 100 mbar relatif.

On arrête le remplissage d'azote lorsque la sonde niveau basse sera noyée. Sa résistance sera de 679 Ω .

2.2 Mise en froid à 4,2 K et remplissage du bain d'hélium

" Pour poursuivre la mise en froid, il faut vidanger le cryostat de l'azote liquide qu'il contient et ensuite le rincer à l'hélium gaz.

2.2.1 Vidange de l'azote liquide

Vérifier que le tube de siphonnage descende bien jusqu'au fond du vase hélium avant de vidanger.

Obturer le cryostat à 100 mbar relatif avec de l'hélium gaz. L'azote liquide s'échappe par le tube de siphonnage.

Lorsqu'il n'y a plus de liquide, la pression chute dans le cryostat.

2.2.2 Dépollution du vase hélium

Retirer le tube de siphonnage d'azote. Mettre à sa place la 1/2 canne de siphonnage hélium.

Purger le cryostat de façon soignée en le rinçant plusieurs fois à l'hélium gaz.

Pomper par l'orifice de sortie gaz.

2.2.3 Remplissage d'hélium liquide

Après rinçage, on peut alors faire le plein d'hélium liquide en siphonnant d'abord lentement pour refroidir jusqu'à 4,2 K, puis un peu plus vite pour remplir de liquide.

On suit la montée du niveau d'hélium liquide en mesurant la résistance des 2 sondes carbone. Le niveau basse

<u>LSTHOM</u>	Code Emetteur	N°	Date	Nom de l'émetteur	Page	Classement Emetteur	Classement Destinaire
D.E.M. ELFORT	BFA/E DEA/L	89 LC 002	16/02/89	JP BARRE	3		

Observations

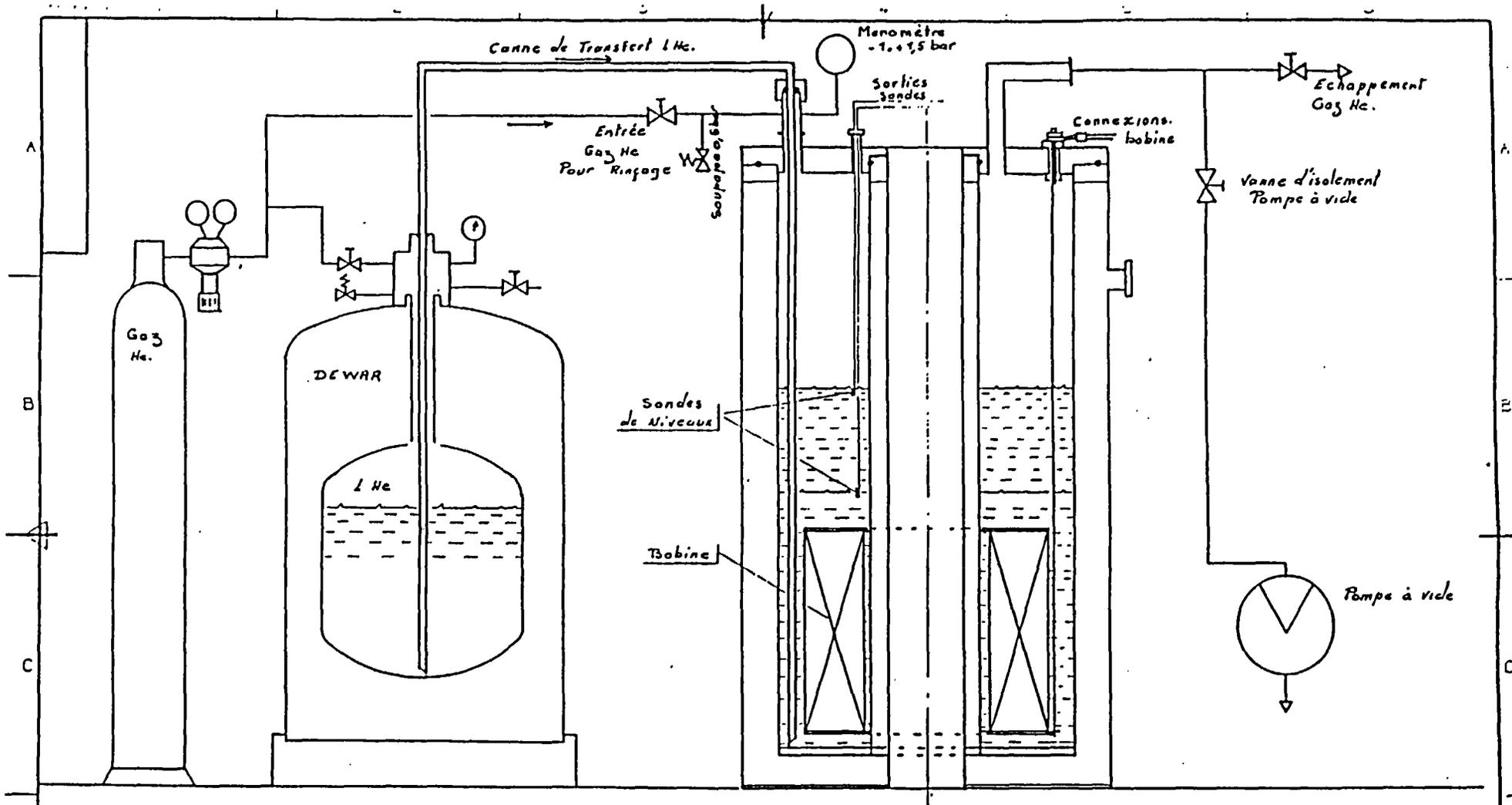
est atteint lorsque la résistance de la sonde basse est de 12,73 k Ω

Lorsque la résistance de la sonde haute est de 11,81 k Ω , le cryostat est plein. On arrête le siphonnage. Il y a deux heures d'autonomie.

2.2.4 Complément en cours d'essais

Lorsque la résistance de la sonde basse redescend en-dessous de 11,8 k Ω , il faut refaire un complément d'hélium liquide pour poursuivre les essais. Avant de faire ce complément, il est préférable de remettre la bobine à zéro afin d'éviter une transition en cours de remplissage.

Après un arrêt de 15 h, tant que la sonde basse a une résistance supérieure à 675 Ω , il est possible de refaire le remplissage d'hélium liquide sans prérefroidir à l'azote car le fond du vase d'hélium est encore à 77 K. Dans le cas contraire, il est préférable de refaire un prérefroidissement à l'azote.

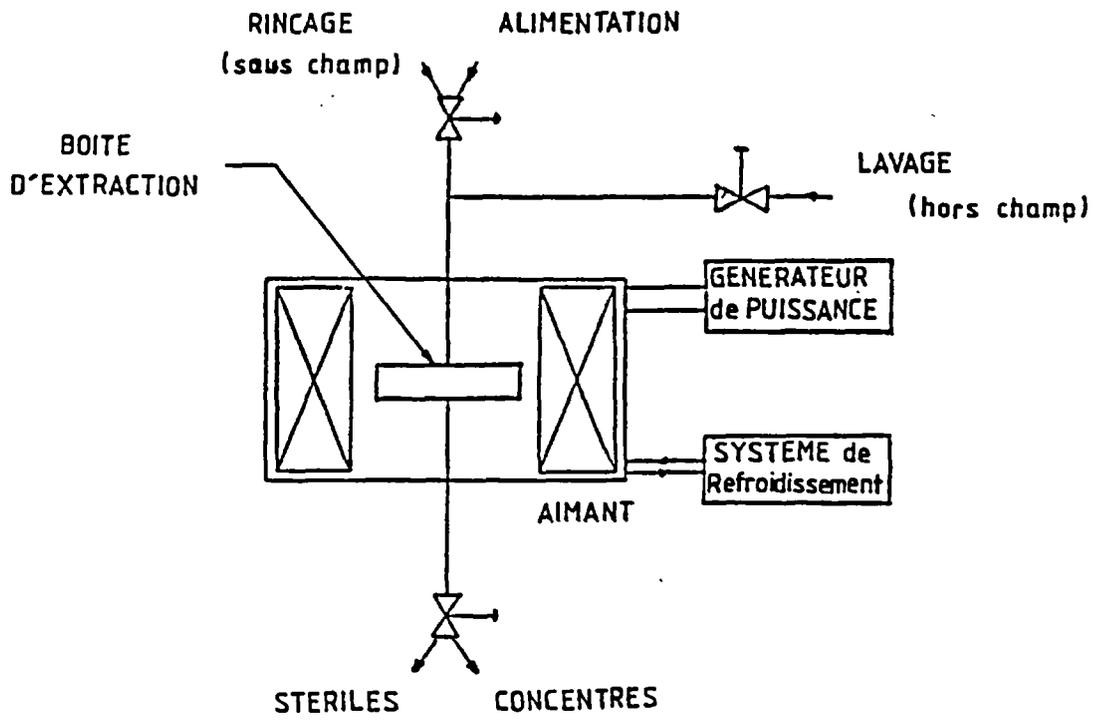


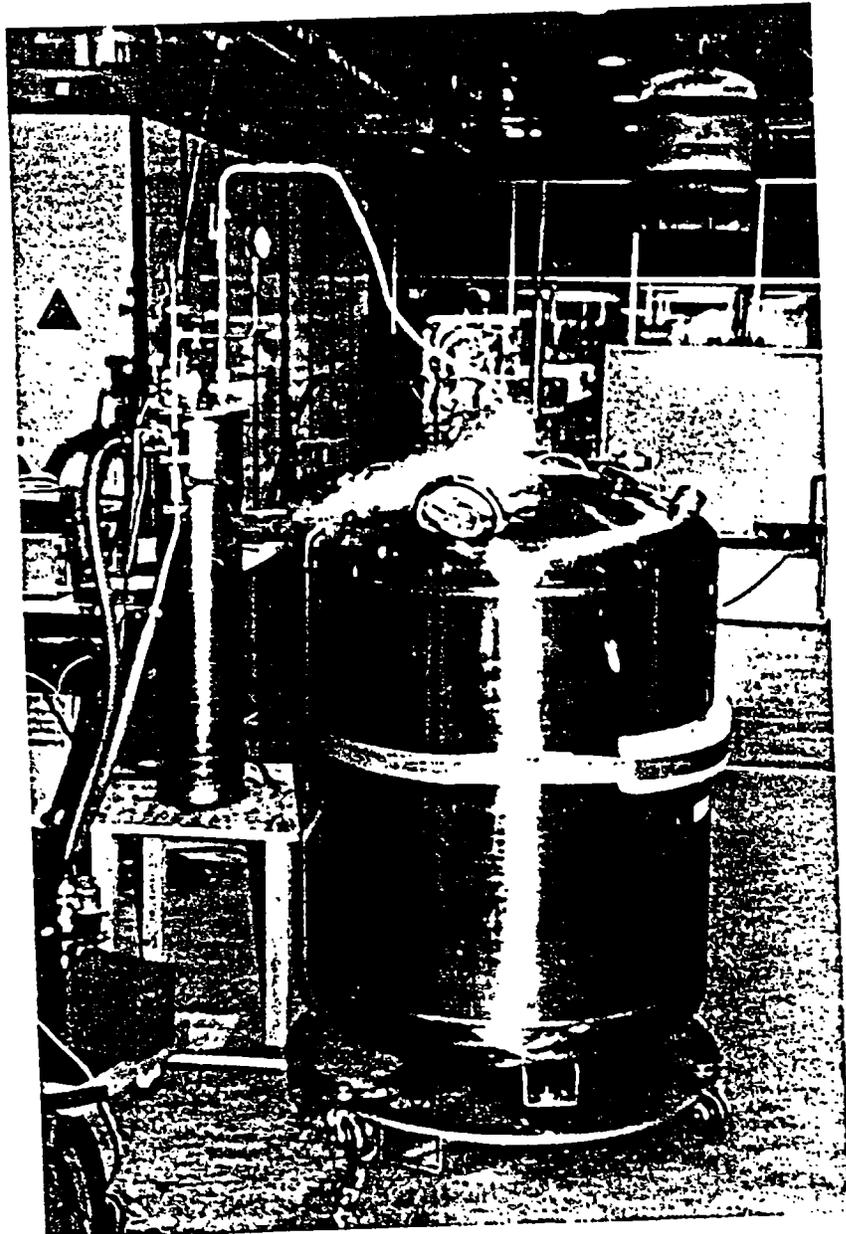
Cryostat
 VOLUME LHe : 41 l. dont 5,5 l de réserve
 Autonomie à 7T : 2 heures Max.
 Consommation 20l : Nûc en froid 77A 4,2K + Remplissage

Sondes Carbone de Niveau		
haut :	R = 512 Ω	666 Ω
Bas :	R = 510 Ω	672 Ω
	θ = 300 K	77 K

Indice	Nature/N°	Avant modif.	Date	Nom	Visas	Nom	Visas	Nom	Visas
MODIFICATIONS				MODIFIE			VERIFIE		
APPROUVE				TITRE					
VERIFIE				INSTALLATION CRYOGNIQUE					
DES AED				TRI MAGNETIQUE					
DATE				NOM			VISAS		
16.2.83				BARRE IR					
DATE				NOM			VISAS		
				GIDOC			DELFORT		
				0 0.00A			LE ROBERT		
				L'ANGLE			ALSTHOM		
				ED-ELLE			PERMAT		
				DIFFUS			A3		
				EMETTEUR			40.375		
				DEAL			SCT.002		

Le document, propriété exclusive de notre Société est strictement confidentiel et ne peut être communiqué, copié ou reproduit sans son autorisation écrite.





Vue de l'installation expérimentale de bobine cryomagnétique
(refroidissement à l'hélium)

ALSTHOM

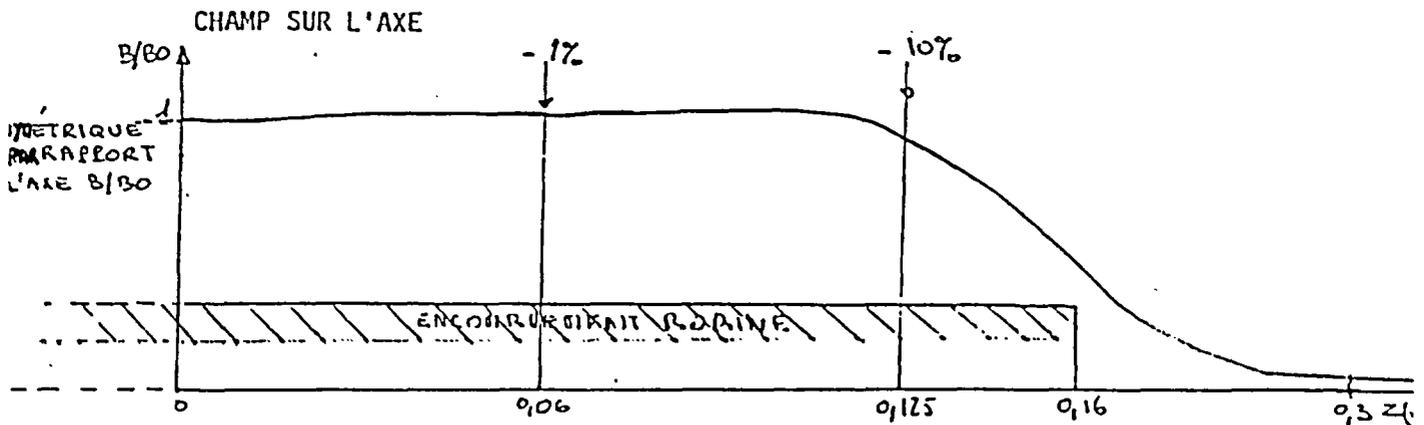


Division Electromécanique
Electrotechnique Avancée

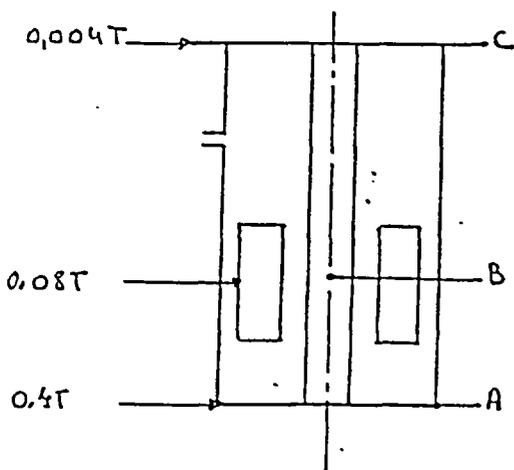
BOBINE DE TRI MAGNETIQUE

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Type	: Solénoïde
Supra conducteur	: Nb Ti
Induction magnétique garantie	: > 7 T sur 200 mm de hauteur
Courant de fonctionnement	: 70 ± 5 A
Self théorique	: < 6 H
Temps de montée à 7 T	: 2 minutes
Diamètre libre (trou central à température ambiante)	: 20 mm

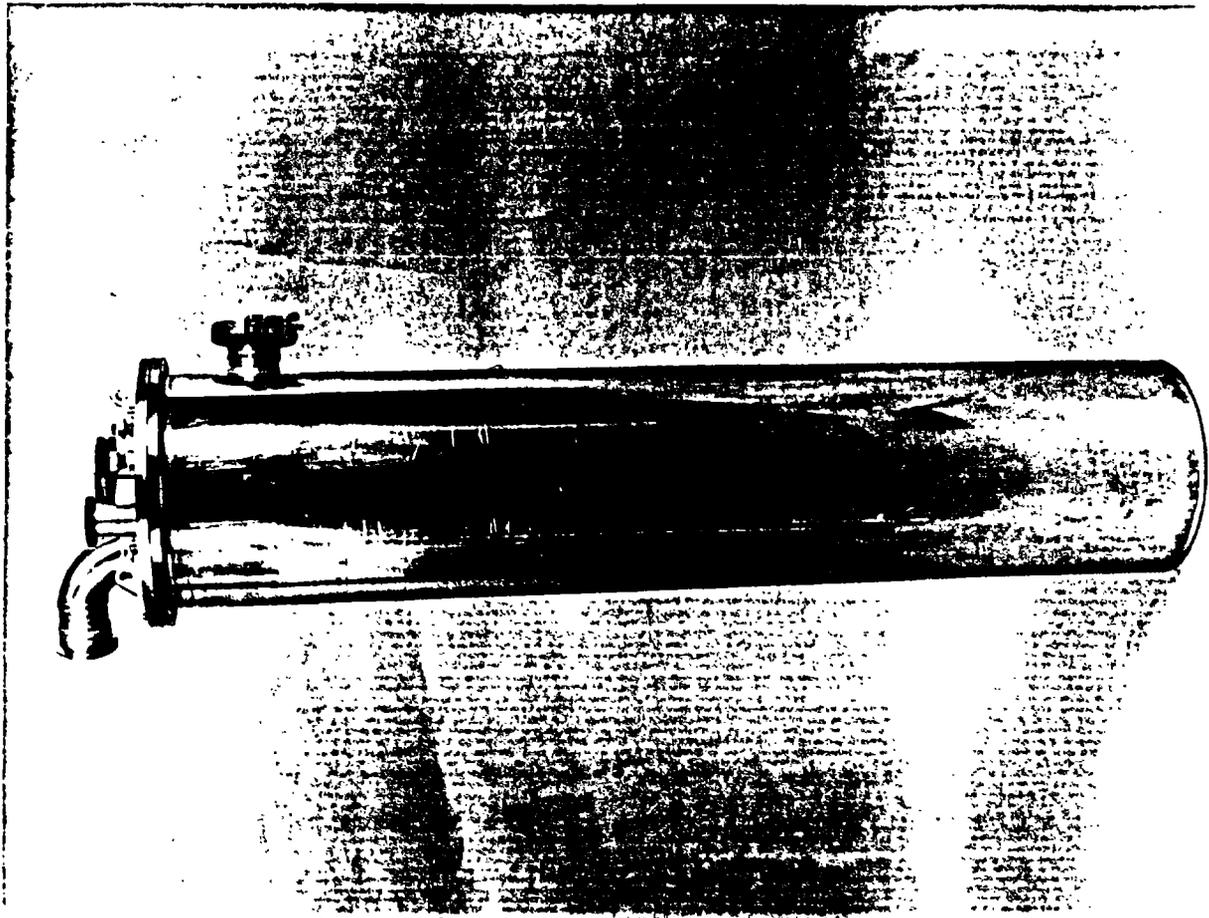
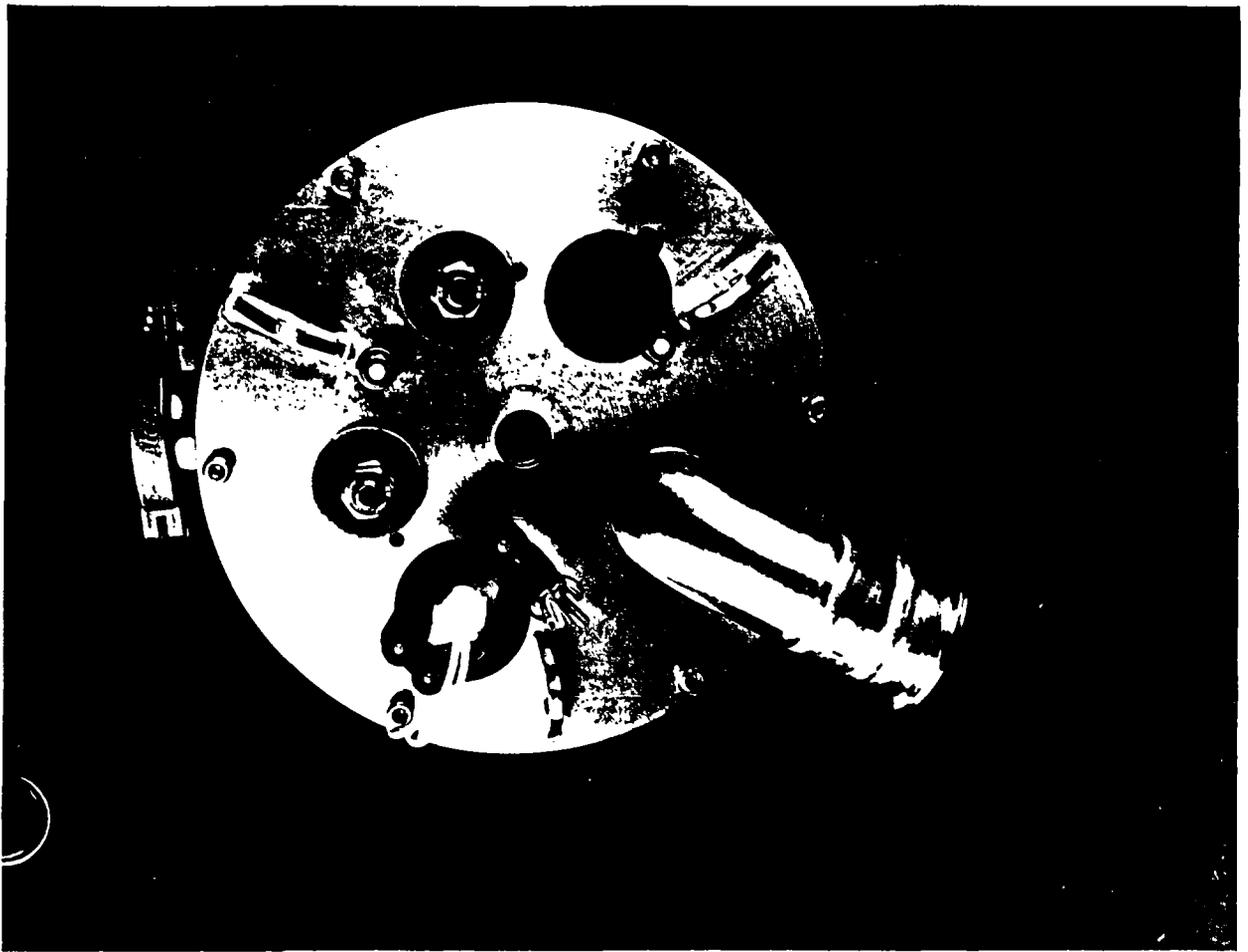


DIMENSIONS ET CHAMPS DU CRYOSTAT



Hauteur centre magnétique A-B = 220mm
Hauteur A-C = 910mm
Diamètre extérieur = 200mm
Diamètre intérieur libre (temp. ambiante) = 20mm

Alimentation nécessaire : 80 A - 5 V



ALSTHOM	Emetteur			l'emetteur		A ←	→ R	Emetteur	Destina
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	90 LC 05	22/02/90	JP BARRE	1	R 81 612		Tri magnétique	
Diffusion :			Nature de la Note	COMPTE-RENDU D'ESSAI FINAL					
DEA/T			Objet :						
M. A. BOURQUARD M. BEKHALED			ESSAI RECEPTION : BOBINE TRI MAGNETIQUE Ø 120 FEVRIER 1990, labo DEA						
DEA/L			1 - BUT						
M. BONNET KIBLAIRE BENCHARAB			Ces essais ont pour but de vérifier le bon fonctionnement de la bobine ainsi que l'autonomie du cryostat.						
Dossier			Plan d'ensemble : voir annexe n° 40-325-215.						
DEA/V			2 - PROGRAMME D'ESSAIS (note du 26/01/90 A. BOURQUARD)						
M. KOHLER			2.1 Mise en froid + remplissage LHe pour thermalisation (mesure de niveau et du débit gaz)						
+ 1 ex ENSG NANCY			2.2 2e remplissage pour mesure de consommation sur 24 h						
			2.3 Essai de la bobine						
			- Montée à 200 A (I nominal)						
			- Maintien 2 h sous 200 A						
			- Vérification du champ sous 200 A						
			- Suivi de la consommation						
			2.4 Essai de la bobine en simulation de tri magnétique						
			Montée à 5 T en 100 s. Maintien 10 mn à 5 T et descente à 0 en 100 s.						
			Mesure de la consommation sur 2 h, soit 6 cycles.						
			3 - INSTRUMENTATION D'ESSAI						
			3.1 Alimentations électriques						
			Pour essai de montée à 200 A et maintien de 2 h à 200 A. Alimentation ATNE 250 A. Pour "cyclages" en simulation de tri magnétique. Alimentation DRUSCH 1000 A.						
			3.2 Mesure de champ: GAUSMETRE BELL 620						
			3.3 Contrôle de niveau LHe : jauge supra à lecture continue DLG 200 - L 150. Enregistreur PHILIPS : PM 8252 (2 V = 1r						
			3.4 Mesure de débit de gaz						
			Compteur (totalisateur) volumétrique Gallus G4						
			Débit minimal 25 dm³/h						
			Débit maximal 6 m³/h						
			3.5 Contrôle de température lors de la mise en froid : sonde platine PT 100						

ALSTHOM	CODC Emetteur	N°	Date	NOM DE l'émetteur	Page		Classement Emetteur	Classement Destinataire
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	90 LC 05	22/02/90	JP BARRE	2	R 81 612		

Observations

3.6 Indication de niveau hélium - maximal et minimal :

Régulateur RN24 + 2 sondes carbone 500 Ω (300 K).
 Remarque : lorsque la bobine est sous champ, les valeurs résistance des sondes carbone sont erronées. Le voyant du niveau s'éteint lorsque le niveau atteint 785 mm au lieu 800 mm espérés. Ces sondes ne peuvent servir de témoin pour faire de la régulation de niveau mini lorsque la bobine est sous champ (risque de bobine partiellement découverte avant reprise de transfert). La régulation automatique n'est donc fiable qu'à champ magnétique nul.

4 - DEROULEMENT DES ESSAIS

Mardi 6 février

4.1 Mise en froid de l'installation (fiche d'essai page 1)

Prérefroidissement à l'azote liquide
 Remplissage LN₂ (bobine noyée)
 Début de transfert : 8 h
 Fond du cryostat à 77 K : 8 h 40 (PT 100 = 21,3 Ω)
 Bobine noyée : 9 h
 Maintien 4 h à 77 K

Rinçages à l'hélium gaz avant remplissage hélium liquide
 Soutirage LN₂ + 4 rinçages. Température du fond après rinçage : 80 K. (PT 100 = 21,5 Ω)

1er remplissage LHe
 - Temps de remplissage 30 mn.
 - Pression de transfert : 80 mbar
 - Consommation : 26 l dont 23,4 l dans le cryostat
 - Mesure de débit sur 2 h (fiche d'essai page 2)
 Variation de niveau de 800 à 640 mm.
 Débit de gaz moyen : 1500 l/h (TPN 20°C)
 - Suivi de la baisse de niveau (enregistrement I)

Mercredi 7 février

4.2 Mesure de consommation

4.2.1 Mesure de consommation sur 7 h (fiche d'essai page 3)

En 7 heures, le niveau varie de 8/3 à 528 mm. Le débit de gaz varie de 1000 l/h pour 8/3mm à 890 l/h (gaz TPN 20°C). Pour 523 mm au total il est passé 6,68 m³ de gaz dans le compteur, soit un débit moyen de 954 l/h TPN.

4.2.2 Mesure de consommation sur 16 h (1 nuit)

entre le mercredi 07/02 à 16 h et le jeudi 08/02 à 8 h (fiche d'essai page 3).
 Niveau variant de 815 à 150 mm.
 Comptage : 13,59 m³,
 soit un débit moyen de 850 l/h gaz TPN.

ALSTHOM	CODE Emetteur	N°	Date	NOM de l'émetteur	Page	Classement Emetteur	Classement Destinataire
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	90 LC 05	22/02/90	JP BARRE	3	R 81612	

Observations

4.3 Essai de la bobine

Après remplissage du cryostat au niveau 650 mm.

a) Essai de montée à 5 T.I = 200 A

- 5 essais de montée en courant avec déclenchement interpestif de l'alimentation sans transition de la bobine

3 montées sous 10 V . Déclenchement à 165 A

2 montées sous 5 V . Déclenchement à 193 A

1 montée sous 10 V . Déclenchement à 166 A.

- Montée sous 3 V jusqu'à 200 A 5 T

Cause possible du déclenchement de l'alimentation ATNE 250 A : la résistance de décharge chauffe le doublage supra sur l'amenée de courant. Le supra devi résistif et crée un "à-coup" détecté par l'alimentation

b) Essai de tenue à 5 T

- Durée de l'essai : 2 h 20 sans problème.

- Après 20 minutes d'essai, remplissage au niveau maximal pour mesurer la consommation sur 2 heures (fiche d'essai page 4).

- variation de niveau sur 2 heures : 820 à 720 mm

- débit gaz TPN 20°C moyen : 1,050 m³/h

- comptage : 2,4 m³

c) Contrôle du champ au centre du cryostat au moyen du gaussmètre pour I = 200 A

- champ maximal : 5,5 T à 1,220 m de la platine supérieure

- champ > 5 T entre 1,120 et 1,320 mm de la platine supérieure

Décharge de la bobine après 2 h 20 d'essai.

Lors de la décharge de la bobine sous 10 V, le débit de gaz passe de 1,05 à 2,4 m³/h durant 1 à 2 mn pour revenir à 0,890 m³/h.

d) Essais de cyclages avec alimentation DRUSCH 1000 A

Mesure de consommation (fiche d'essai page 5).

1 cycle = montée à 5 T en 100 s, maintien 10 à 20 mn à 5 T et décharge de la bobine en 100 s.

Durée de l'essai : 2 heures.

Nombre de cycles effectués : 6.

Variation de niveau : 620 à 483 mm.

Débit gaz (TPN 20°C) : 1,480 m³/h.

Comptage : 2,96 m³.

ALSTHOM	Emetteur	N°	Date	Nom de l'émetteur	Page		Classification Emetteur	Classification Destinataire
D.E.M. BELFORT	BFA/E DEA/L	90 LC 05	22/02/90	JP BARRE	4	R 81 612		

Observations

5 - BILAN

5.1 Consommation d'hélium liquide

Pour 3 jours d'essai : 80 l (60 h).

5.2 Evaluation des pertes

Volume du cryostat : 23,6 l dont 13 l de réserve.

Paramètres utilisés pour les calculs

1 l He liquide = 0,750 m³ He gaz (TPN 20°C)

1 watt évapore 1,377 l He liquide soit 1,032 m³/h gaz TPN

Calcul des pertes Q (watt) à partir du débit gazeux

V° (m³/h) au travers du compteur

$$Q = \frac{V^\circ \times 1,15}{1,032} = W$$

(le terme 1,15 tient compte du gaz occupant le volume de liquide évaporé).

	V° (m ³ /h)	niveau mm mesuré	m° l/h He	Q (W)	Autonomie
Cryostat seul	0,435 (sur 27 h)	+ 815 + 300	0,66	0,48	
Cryostat + bobine (I=0) + équipements	0,850 (sur 16 h)	+ 8 + 150	1,30	0,94	18 h entre 800 mm et (23,6 l)
En cours de cyclage (5T)	1,480 (sur 2 h)	+ 620 1,702 + 483	2,27	1,64	6 h entre 800 et 400 (13 l rése:

Les mesures de pertes du cryostat seul ont été réalisées chez le fabricant (TBT) lors de la réception de commande.

5.3 Conclusion

Fonctionnement satisfaisant.

AFFAIRE : TRI-MAGNETIQUE. $\phi 120$ mm.

Cde N° : R81612.

Operateur : J.P. BARRE

I PRÉREFROIDISSEMENT : L.N₂Le : 06/02/90Debut d'opération : 9 h.Fond à 77 k : 9 h 40 (P/100 = 20,3 Ω)Bobine noyée : 9 h.Consommation L.N₂ : 20 l.II RINCAGELe : 06/02/90Soutirage L.N₂ : 13 h 30Balayage He gaz Nbre. 4Température Fond après balayage 80 k (21,5 Ω)III REPLISSAGE L HeDewar type : RS500 n° D.C.N/AISA.Avant remplissage : niveau : 695 mm - volume : 480 litresCompteur Totalisateur : 0 m³

Transfert :

pression de transfert : 20 m.bar

Heure	Cryostat			Compteur		
	θ k	hauteur LHe mm	P mbar	totalisateur m ³	debit gaz l/h	θ k
14 h 30	50	—	20	0		
14 h 40	4.2	410	20	0		
14 h 50		810	20			

Dewar
Après remplissage : niveau 666 mm - volume 459 litresConsommation : 26 litres dont 23.6 litres dans le cryostat

DEA.LC

AFFAIRE : TRI-MAGNETIQUE

FICHE D'ESSAI CRYO

Cde. N°: R81.612

opérateur: J.P. BARRE

IV MESURE DE CONSOMMATION (sur 7h) - et 1 nuit (16h).

Le: 07/02/90 (dimanche).
Cryostat Thermolise.

Heure	Cryostat		Compteur			Observations
	hauteur l. He <small>in mm</small>	P.m.bar	totalisateur	débit gaz	θ°K	
7h30	< 10	15	16,42 m ³	2,5 1,5		Remplissage N2E
8h15	375	40	-	-		Fin de transfert
8h35	330	40	-	-		
8h45	273	40	mise à zero.	1,00 m ³ /h290		
9h04	799	40				
9h15	752	-		0,975	236	
9h50	766			0,950		
10h30	742			0,930		
11h00	712			0,930		
11h30	695			0,920		
13h30	617			0,920		
14h00	597			0,910		
14h30	575			0,900		
15h00	557			0,890		
15h30	535			0,890		
15h50	528	40	6,68 m ³	0,890	230	
15h55	Remplissage		compteur bypassé			Transfert 10mbar.
16h12	815	40	ouverture compteur			
16h20	803		30			
	Jeu de	8.02				
17h30	180	35				
8h00	150	35	20,27 m ³	0,71 m ³ /h.		

Ce document, propriété exclusive de notre Société, est strictement confidentiel. Il ne peut être communiqué, copié ou reproduit sans son autorisation écrite.

... pour remplissage N2E
Niveau: 600 mm 1530. Avant transfert.
620 mm 427 L. Après transfert
260

FICHE D'ESSAI CRYO

AFFAIRE : TRI. MAGNETIQUE

Cde. N°: R 81.612

opérateur : J.P. BARRE - H. KIDLAIRE

IV MESURE DE CONSOMMATION (Bobine alimentée I = 200A)

ESSAI de Tenue sur 2H.

Le: 08/02/90 Jeudi

Heure	Cryostat		Compteur			Observations
	hauteur l. He	P. m. bar	totalisateur	débit gaz	θ°k	
9h45	177 mm	40	B. passé	m³/k.		Remplissage.
9h04	645 mm.		-			arrêt transfert
9h05	Entrée en champ.		5T ⇒ 200A sous 10V.			
	5 D. de l'axe		K. m. m. t. s.			
9h35	Montée sous 3V.		-I = 200A ⇒ B = 5T			
9h35	582					
9h45	Transfert Niveau		Haut.			P = 10 mbar
9h55	825 mm		annulation comp. Press. mise à 0 Totalisateur			I = 200A
10h00	825	40		1,520	289	..
10h15	805			1,080	-	
10h30	795			1,070	290	
10h45	785			1,070		* Niveau Haut. C. r. m. t.
11h00	773			1,070		
11h16	758			1,040		
11h30	748			1,040		
11h45	735			1,040		
12h00	725			1,000		
12h02	720		6,4 m³	2,4 m³/h.		Decharge Bobine 10V
13h50	642			0,900.		

Ce document, propriété exclusive de notre Société, est strictement confidentiel. Il ne peut être communiqué, copié ou reproduit sans son autorisation écrite.

Remplissage.
 Niveau 590mm et sous 10V sous 10V Transfert } consommation = 25%.
 Niveau volume 375 l après Transfert.

DEA.LC

AFFAIRE : TRI-MAGNETIQUE DRO.

FICHE D'ESSAI CRYO

Cde. N°: R 51612

operateurs: SP THARRE - T. KIBIRRE

IV MESURE DE CONSOMMATION *simulation d'opérations de Tri*

Le: 02/02/90 (jeudi)

hauteur ST en 100 s. finition 10 à 20 mm. Débit 100 s.
(6 cycles-).

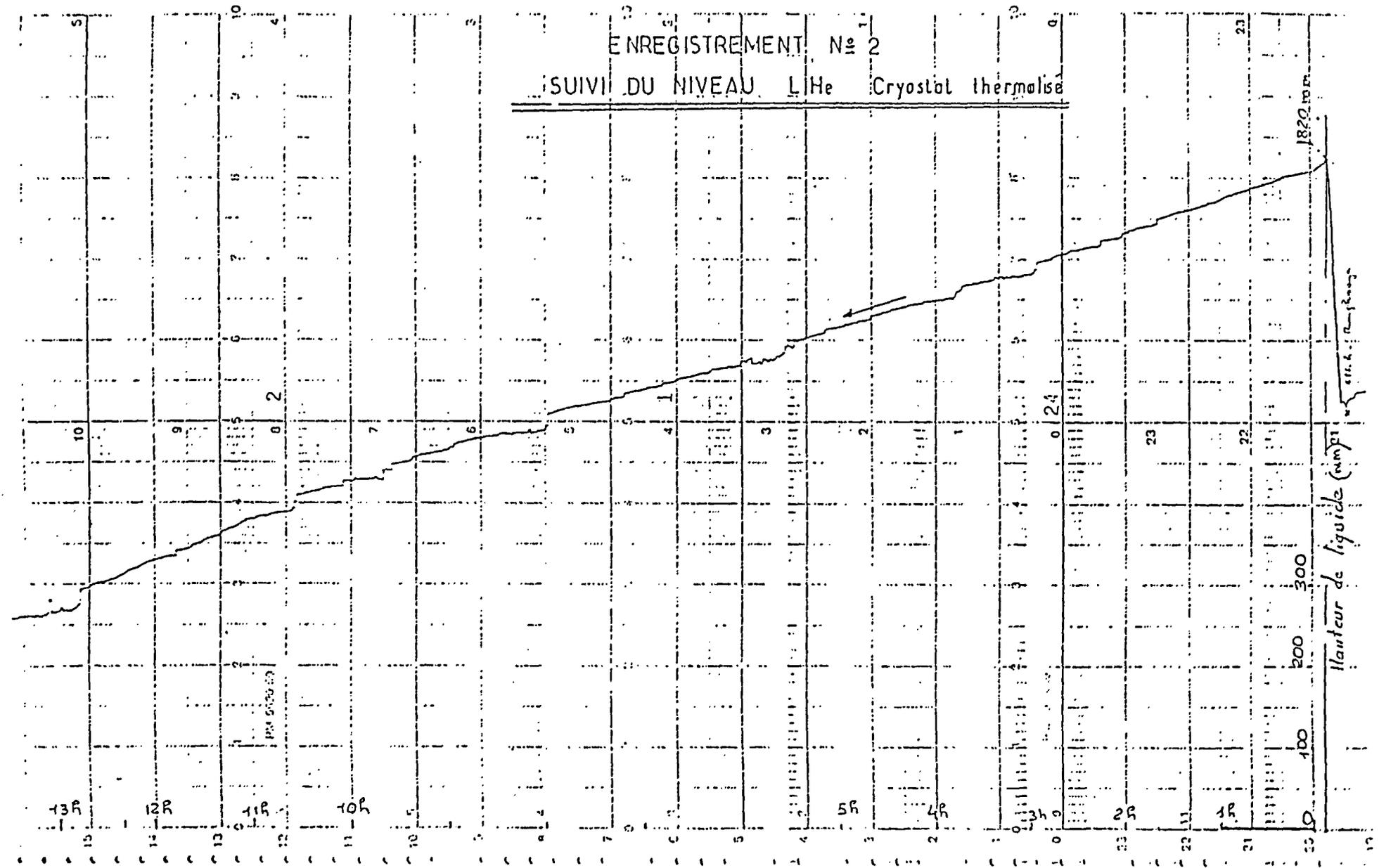
Heure	Cristal		Compteur			Observations
	hauteur l.He	P m.bar	totalisateur	débit gaz	θ°k	
14h30	600 mm	40	4,13 ^{ms}		290	ST
14h42	603		4,33			
14h53	596		5,16			0
14h56	595		5,27			ST
15h06	576		5,46			ST
15h11	576		5,61			ST
15h13	572		5,70			ST
15h23	563		5,83			ST
15h27	557		6,03			ST
15h29	556		6,10			ST
15h39	547		6,31			ST
15h43	543		6,43	2,4 m ³ /h	290	ST
15h45	542		6,52			ST
15h55	529		6,72			ST
15h58	528		6,83			ST
16h08	518		6,97			ST
16h10	517		7,07			ST
16h30	504		7,41			ST
16h35	483	110	7,56		290	0
			Arrêt cycles			
			Vendredi 9-02-90			
8h15	0	25	16,86		290	

Ce document, propriété exclusive de notre Société, est strictement confidentiel. Il ne peut être communiqué, copié ou reproduit sans son autorisation écrite.

consommation d'Helium pour 3 jours / essai
454 - 375 = 79 l.

ENREGISTREMENT N° 2

SUIVI DU NIVEAU LIHe Crystal thermoisé



Hauteur de liquide (cm)

0 100 200 300

1R

2R

3R

4R

5R

6R

7R

8R

9R

10R

11R

12R

13R

14R

15R

16R

17R

18R

19R

20R

21R

22R

23R

24R

25R

26R

27R

28R

29R

30R

31R

32R

33R

34R

35R

36R

37R

38R

39R

40R

41R

42R

43R

44R

45R

46R

47R

48R

49R

50R

51R

52R

53R

54R

55R

56R

57R

58R

59R

60R

61R

62R

63R

64R

65R

66R

67R

68R

69R

70R

71R

72R

73R

74R

75R

76R

77R

78R

79R

80R

81R

82R

83R

84R

85R

86R

87R

88R

89R

90R

91R

92R

93R

94R

95R

96R

97R

98R

99R

100R

101R

102R

103R

104R

105R

106R

107R

108R

109R

110R

111R

112R

113R

114R

115R

116R

117R

118R

119R

120R

121R

122R

123R

124R

125R

126R

127R

128R

129R

130R

131R

132R

133R

134R

135R

136R

137R

138R

139R

140R

141R

142R

143R

144R

145R

146R

147R

148R

149R

150R

151R

152R

153R

154R

155R

156R

157R

158R

159R

160R

161R

162R

163R

164R

165R

166R

167R

168R

169R

170R

171R

172R

173R

174R

175R

176R

177R

178R

179R

180R

181R

182R

183R

184R

185R

186R

187R

188R

189R

190R

191R

192R

193R

194R

195R

196R

197R

198R

199R

200R

201R

202R

203R

204R

205R

206R

207R

208R

209R

210R

211R

212R

213R

214R

215R

216R

217R

218R

219R

220R

221R

222R

223R

224R

225R

226R

227R

228R

229R

230R

231R

232R

233R

234R

235R

236R

237R

238R

239R

240R

241R

242R

243R

244R

245R

246R

247R

248R

249R

250R

251R

252R

253R

254R

255R

256R

257R

258R

259R

260R

261R

262R

263R

264R

265R

266R

267R

268R

269R

270R

271R

272R

273R

274R

275R

276R

277R

278R

279R

280R

281R

282R

283R

284R

285R

286R

287R

288R

289R

290R

291R

292R

293R

294R

295R

296R

297R

298R

299R

300R

301R

302R

303R

304R

305R

306R

307R

308R

309R

310R

311R

312R

313R

314R

315R

316R

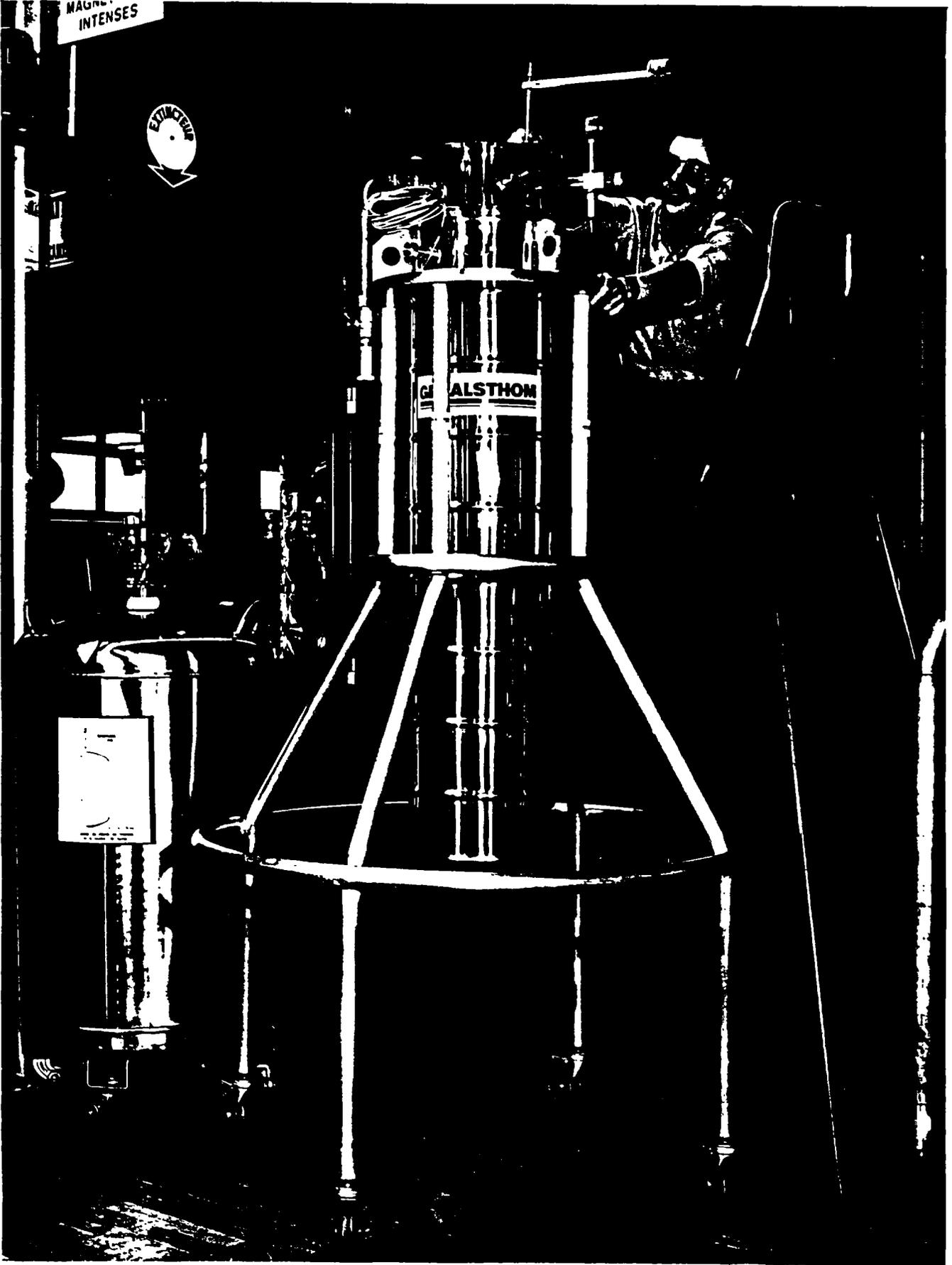
317R

318R

MAGNET
INTENSES

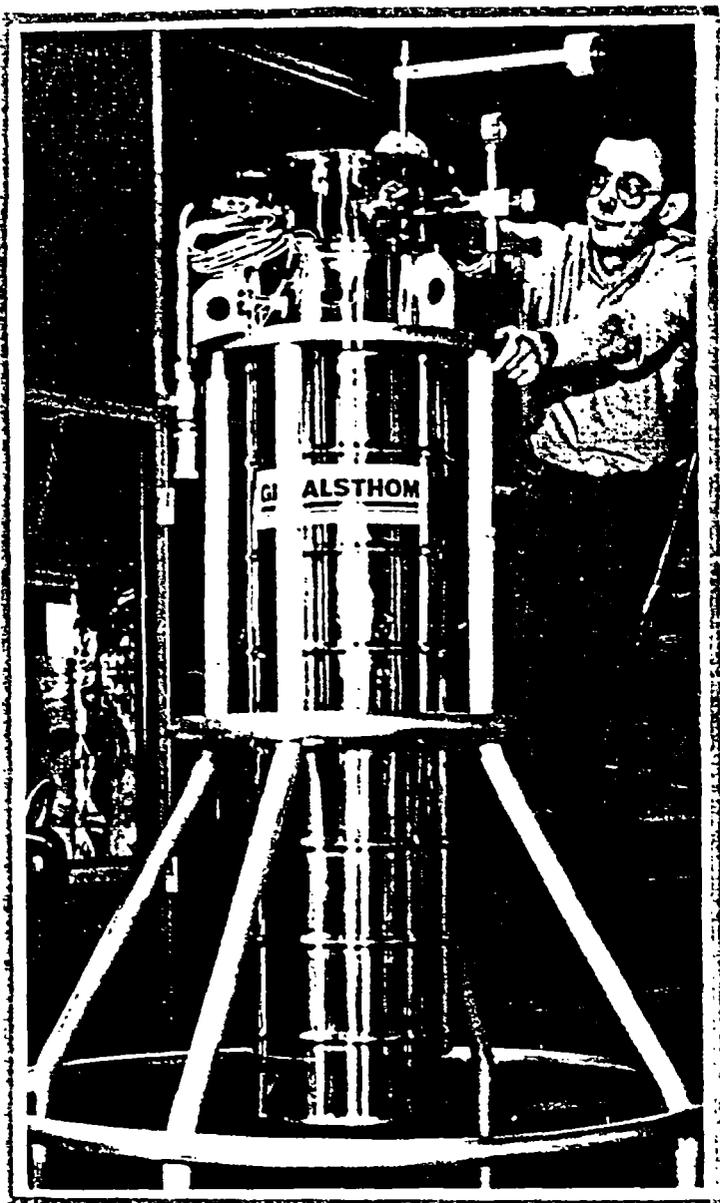


ALSTHOM



ELECTROMAGNETS FOR INDUSTRIAL USE

Some superconducting magnets are grouped together under this term ,
the main common characteristics of which are defined by :



- low cryogenic subjection
- useful cylindrical zone (\varnothing 20 to 120 mm)
in air at atmospheric pressure
- the value of the field up to 3 teslas in the
useful zone
- design of compact windings impregnated under
vacuum and carried out using insulated monolithic
multi-filamentary conductors from standard
industrial production
- automatic protection by resistance.

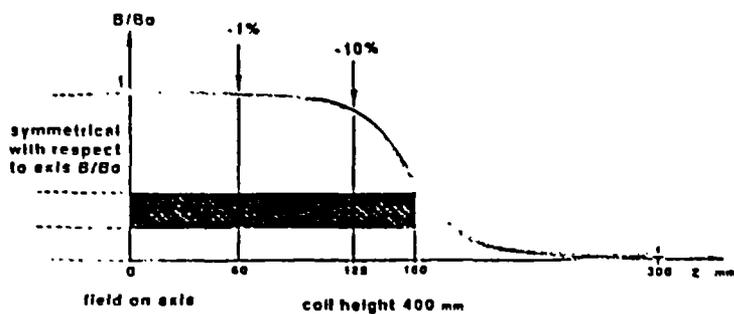
Possible options :

- plug-out current leads
- variable fields up to 50 Hz
- homogenous fields
- controlled gradient fields
- reduced leakage fields
- other geometries

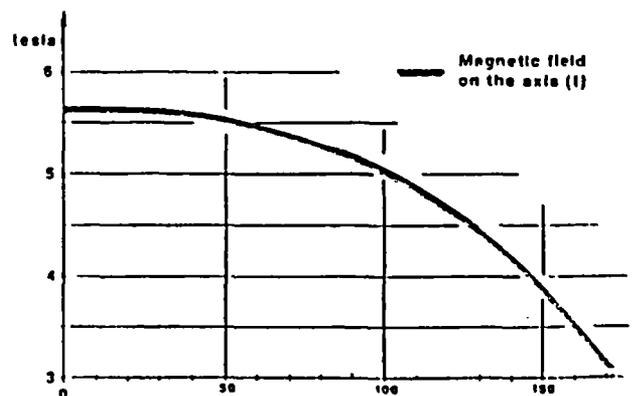
GECALSTHOM

	<u>EXEMPLE 1</u>	<u>EXEMPLE 2</u>
Type	: solenoid	: solenoid
Superconductor	: NbTi	: NbTi
Guaranteed magnetic flux density	: > 7 T on h = 200 mm	: 5 T on h = 200 mm
Rated current	: 70 A	: 194 A
Self-inductance	: = 6H	: = 5H
Time for field increase	: at 7 T : 120"	: at 5 T : 100"
Central hole diameter at ambient temperature	: 20 mm	: 120 mm
Necessary power supply	: 80 A 5 V	: 200 A 10 V
Cryostat height	: 910 mm	: 1 428 mm
Outside diameter	: 200 mm	: 340 mm
Helium volume	: 11 l	: 23.6 l
Helium consumption	: 2.5 l/h	: 2.25 l/h
Autonomy	: 2 h	: 6 h
Weight	: 15 kg	: 60 kg

curve
ex.1



curve
ex.2



GECALSTHOM

DEA

3, avenue des Trois Chênes
90018 BELFORT Cedex - FRANCE
Téléphone (33) 84 55 12 97 - Fax (33) 84 55 16 15 - Telex 360 965 F

