

Les champs magnétiques intenses à Grenoble



1953 Crédit R. Morel



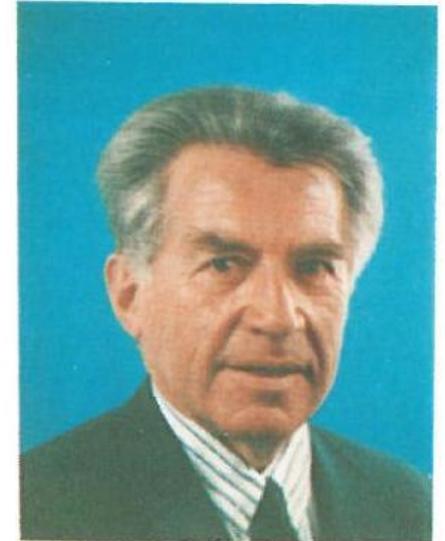
1970

Louis NEEL 1904-2000

René PAUTHENET 1925 - 1987



IEG 1953 avec M.Fallot



1925 - 1987



Les champs magnétiques intenses à Grenoble

à Grenoble, rôles de Louis Néel et René Pauthenet



Le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI)

Un grand équipement du CNRS

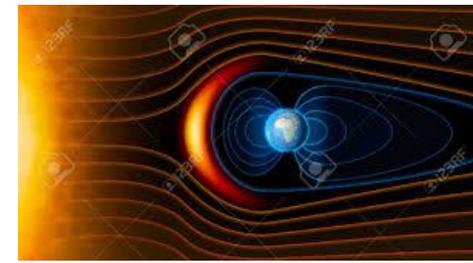
pour accéder aux propriétés des matériaux qui ne se manifestent que dans des conditions extrêmes de champ magnétique de très basses températures ou de pressions élevées inaccessibles autrement.

Depuis 2009, le LNCMI regroupe le laboratoire de champs magnétiques pulsés de Toulouse, et le **laboratoire de champs magnétiques continus de Grenoble**

Depuis 2014, fonctionne avec les laboratoires de Nimègue et de Dresde : **European Magnetic Field Laboratory Facility : EMFL**

Historique, magnétisme, champs magnétiques

Le magnétisme terrestre



Aristote attribue les premières discussions scientifiques sur le magnétisme à Thalès de Millet (600 ans av. JC)

Une hématite (Fe_2O_3) taillée aurait pu servir de boussole au peuple Olmèque pour orienter ses temples

Les Chinois travaillent la magnétite (Fe_3O_4) et fabriquent des boussoles à des fins divinatoires ou comme boussoles pour la navigation

Cf. Michel Soutif

En 1269 Pierre de Maricourt écrit le premier traité sur le magnétisme

Cf. Louis Néel

Les explorateurs européens utilisent la boussole pour naviguer (XV^{ème} siècle)

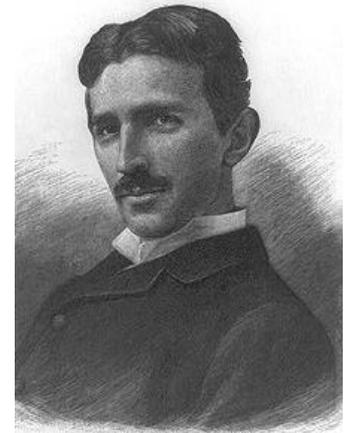
Le magnétisme des laves de part et d'autre des fosses océaniques confirme la dérive des continents (théorie d'Alfred Wegener en 1912-1930) et ses inversions. Ce magnétisme est étudié et analysé par Louis Néel (1940-1962)

La pyrrhotine (Fe_7S_8) étudiée par P. Weiss (1898) puis René Pauthenet (1952) est en fait un ferrimagnétique.

Ordre de grandeur des intensités de champ magnétique B

Champ magnétique mesuré à la surface du cerveau humain	$B = 10^{-15} \text{ T}$
Champ magnétique terrestre (à Grenoble)	B environ $40 \times 10^{-6} \text{ T}$
Entrefer d'un circuit magnétique (moteur, générateur) et proche d'un aimant permanent SmCo_5 , NdFeB ... Electro-aimant Aimé Cotton (1928)	B de 0,1 à 1T et jusqu'à 1.5T 4,6 T dans entrefer de 2 cm
Aimant supraconducteur pour IRM, LHC, RMN commerciale, record en supra	B de 3 à 8T, 22T, 25T, 32T (Tallahassee)
Bobinage de Cuivre, Bobinages hybrides : Supra-cuivre	< 38T, < = 45T
Champ magnétique pulsé : bobine de cuivre, boucle de cuivre	100 T, 300T, max 1500T
Etoile à neutrons : Magnétar	10^{10} T

Nikola Tesla
(1856-1943)
> 700 brevets



Quantum de flux magnétique dans un supraconducteur

$F_0 = 10^{-15} \text{ Wb}$

Les bases de l'électrodynamique

Alessandro Volta (1747 – 1827) invente la pile Zn-Cu en 1800

Gaston Planté (1834-1889) invente l'accumulateur au Pb en 1859

André-Marie Ampère
(1775-1836)

**Champ magnétique, bobine,
forces de Laplace**



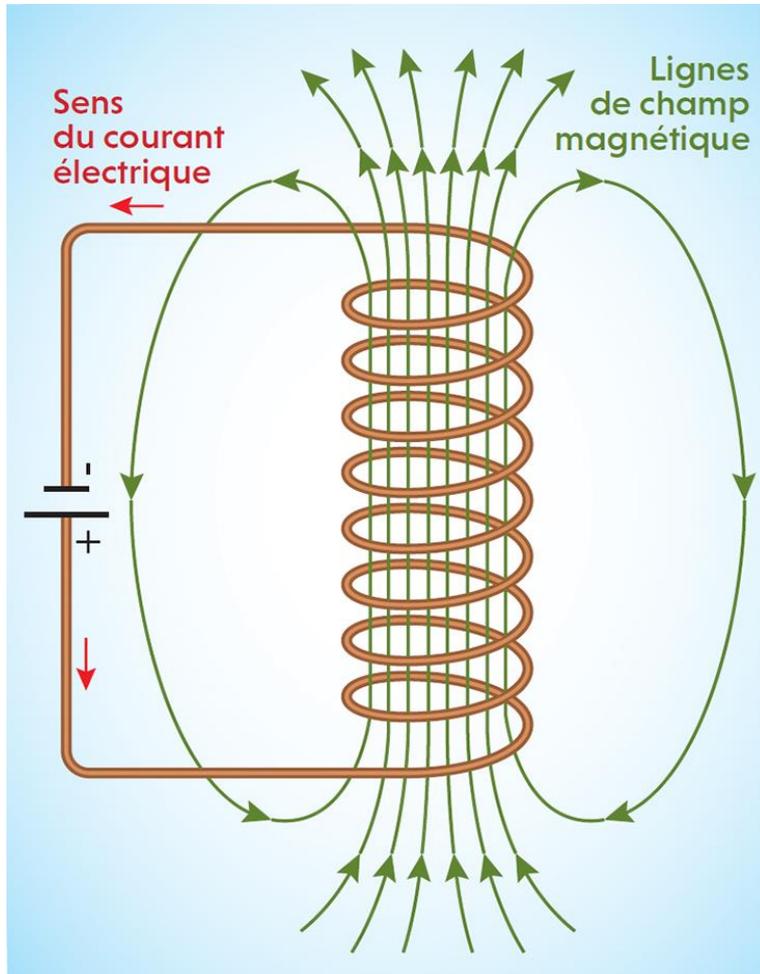
Michael Faraday
(1791 – 1867)
bases de
l'électromagnétisme



James Clerk Maxwell
(1831-1879)
Equations de
l'électromagnétisme



Comment créer un champ magnétique B



Principe : $B = \mu_0 n I$

n = nombre de spires par m, I courant en A, $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$, B en tesla T

Conséquences et difficultés

Effet Joule : $P = R \times I^2$

La puissance nécessaire P varie avec R et avec le carré du courant donc le carré du champ magnétique à obtenir !

Les forces de Laplace (ou Lorentz)

F proportionnelle à $B \times I$ soit aussi $\sim I^2$

Il faut des matériaux de faible résistivité électrique et de grande résistance mécanique

**Pour des champs inférieurs à 1-2 teslas on peut
bénéficier de la forte
aimantation d'un circuit ferromagnétique
(Fer, Co, Ni ...)
ou d'aimants permanents (NdFeB).**

Avec faible entrefer :

moteurs

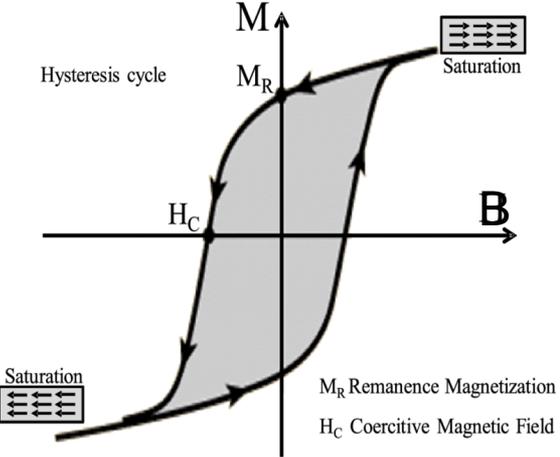
génératrices

dynamos ou magnétos

transformateurs

électro-aimants (recherche, force, ...)
on utilise le champ magnétique de l'entrefer

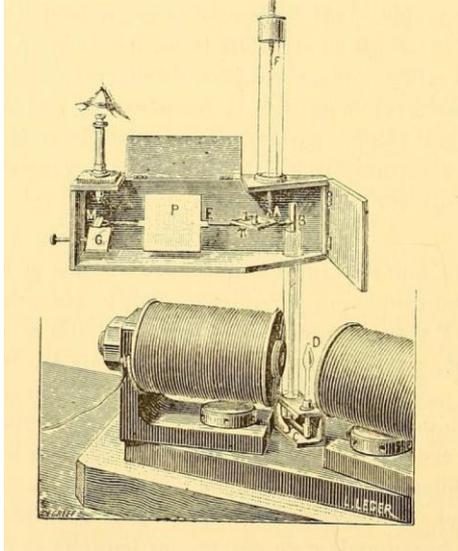
Comparaison énergies : magnétique, thermique

<p>Energie magnétique d'un moment μ_B dans un champ B</p>	<p>$\vec{\mu}_B \cdot \vec{B}$ (B en teslas) avec $1 \mu_B$, 1T ~ 0,7K</p>
<p>Energie d'agitation thermique</p>	<p>$k_B T$ (température absolue en Kelvin)</p>
<p>Energie magnétique liée à un cycle d'hysteresis = surface de M versus B</p> <p>Pour un aimant permanent, mémoire : Ferromagnétiques durs , cycle large</p> <p>Pour les hautes fréquence, filtre, transformateurs : ferromagnétiques doux il faut un cycle réversible + isolant électrique</p>	 <p>The diagram illustrates a magnetic hysteresis cycle on a graph of Magnetization (M) versus Magnetic Field (B). The cycle is a closed loop shaded in gray, with arrows indicating the direction of magnetization. Key points on the cycle are labeled: M_R (Remanence Magnetization) on the positive M-axis, H_C (Coercitive Magnetic Field) on the negative B-axis, and Saturation at the top and bottom of the loop. A legend at the bottom right defines M_R as Remanence Magnetization and H_C as Coercitive Magnetic Field. Small diagrams of magnetic domains are shown at the saturation points.</p>

Réalisation d'électro-aimants

Pierre Curie (1859-1906)

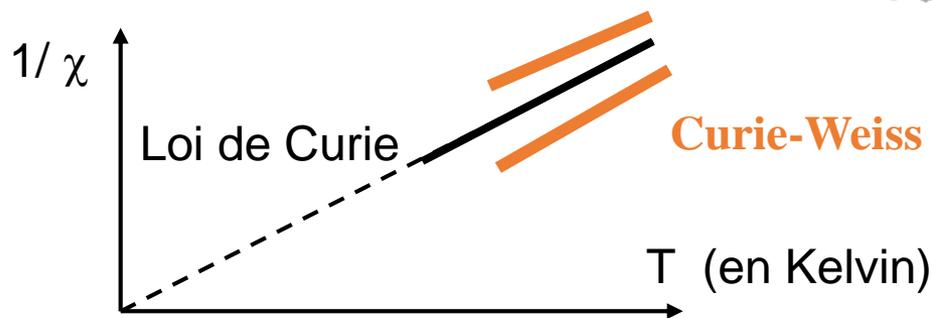
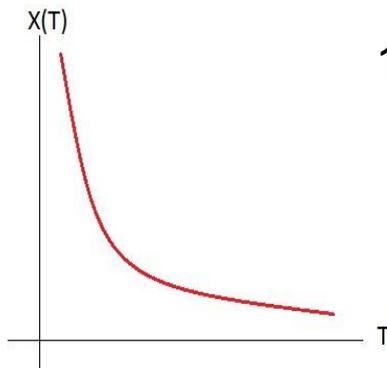
- effet piezo-électrique (avec Jacques)
- **magnétisme**
- radioactivité (avec Henri Becquerel et Marie Curie) Nobel 1903



Thèse Pierre Curie 1896

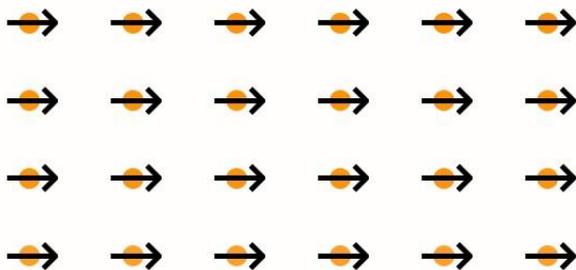
Paramagnétisme (spins indépendants) :

$$\chi = \lim_{B \rightarrow 0} \frac{dM}{dH} \quad \chi_m = \frac{C}{T}$$

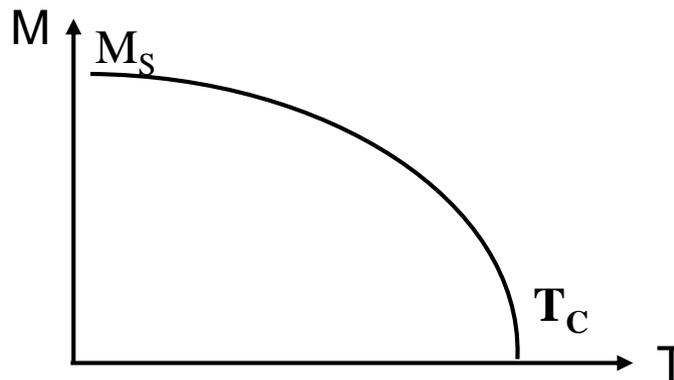


$$\chi = \frac{C}{(T - \theta)}$$

Ferromagnétisme ex. Co, Fe α, Ni



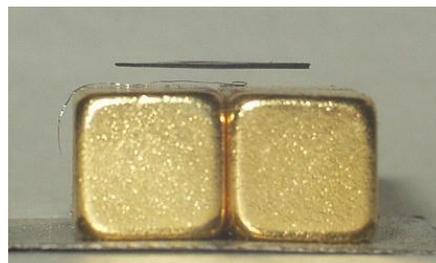
B →



Matériaux	T° de Curie	
	K	°C
Co	1 388	1 115
Fe α, aciers ferritiques et martensitiques	1 043	770
MnBi	630	357
Ni	627	354
MnSb	587	314
CrO ₂	386	113
MnAs	318	45
Gd	292	19
Dy	88	-185
EuO	69	-204

Diamagnétisme

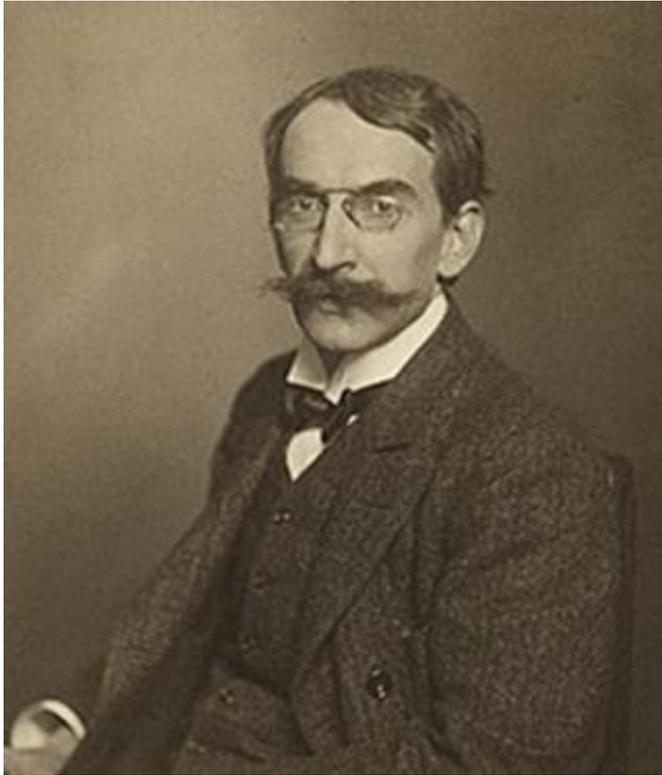
Ex. graphite, eau ...
Supraconducteurs
(découverts en 1911)



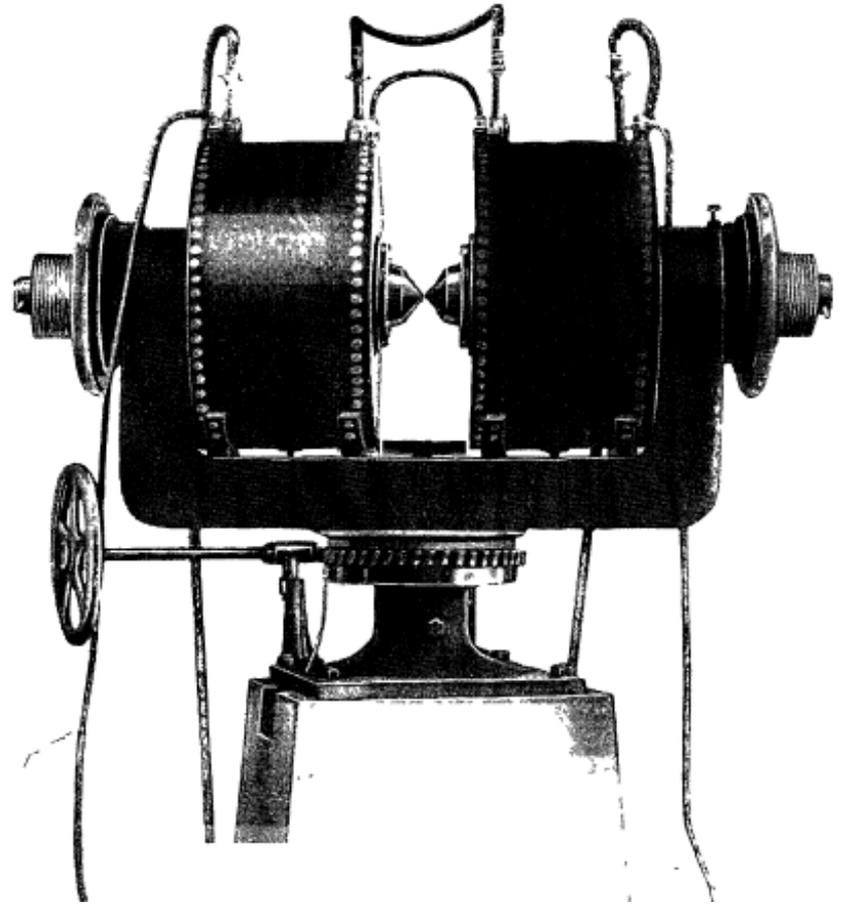
Lévitacion du graphite

Aimants Nd Fe B
(découverts en 1983)

Réalisation d'électro-aimants (champ continu) Pierre Weiss (1865-1940)



Pierre Weiss 1907



1914 : thèse de René Fortrat sur l'effet Zeeman (paraboles de Fortrat, arrivé à Grenoble en 1919)

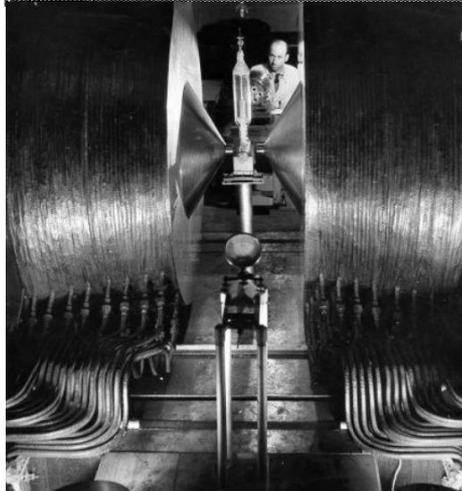
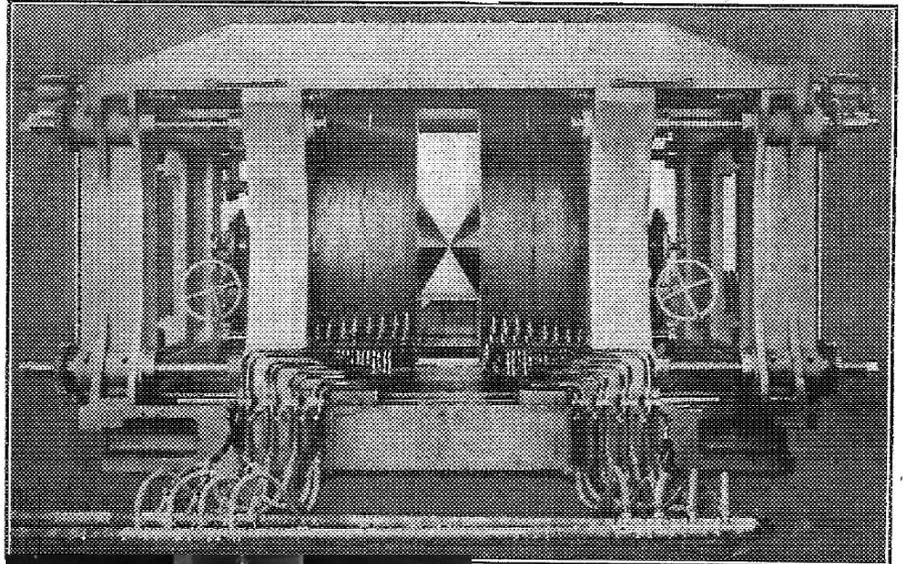
1914 : 2 Projets de champs magnétiques intenses : Bobine : H. Deslandres et A. Pérot

Electro-aimant géant : P. Weiss et A. Cotton

Aimé Cotton

Construction du grand électro-aimant (120 tonnes!)
de l'Académie des Sciences (1914-1928) à Meudon-Bellevue

100 kW, 7T dans entrefer de 3 mm !, **4,6T dans 2 cm**



l'aimant de l'Académie des Sciences.

.....	0,98	mètre
.....	1,21	mètre
.....	0,75	mètre
.....	0,65	mètre
.....	7	tonnes
.....	2,5	tonnes
.....	50	tonnes
.....	30	tonnes
.....	6	tonnes
.....	1,90	mètre
.....	8,6	tonnes
.....	1250	tours
.....	1,55	cm
.....	0,80	cm
.....	400	ampères

Le magnétisme avant 1940 (résumé)

- Pierre Curie (1859-1906), lois pour le ferromagnétisme, le paramagnétisme et diamagnétisme
- Pierre Weiss (1865-1940), Lois de Curie-Weiss et notion de Champ moléculaire moyen. Construction d'électroaimants
- Aimé Cotton (1869-1951), magnéto-optique, Electro-aimant de Bellevue (à Meudon) de 7 teslas (dans 3 mm!).
- Paul Langevin (1872-1946). Courbes d'aimantation de Paul Langevin,

La PHYSIQUE QUANTIQUE

- Werner Heisenberg (1901-1975). Interaction magnétique d'échange à courte distance, d'origine électronique (1928).
- Louis Néel (1904-2000). **Notion de champ moléculaire local par Louis Néel et d'interaction d'échange négative, thèse de 1928 à 1932.**
- Louis Weil (1914-1968), 1938 Début de thèse à Strasbourg : alliages dilués, soutenue en 1941 à Clermont-Ferrand.
- **1939 Congrès de Magnétisme de Strasbourg : 20 exposés (pas d'archives!)**

Thèse de Louis Néel 1928-1932

Interaction magnétique en fonction de la distance

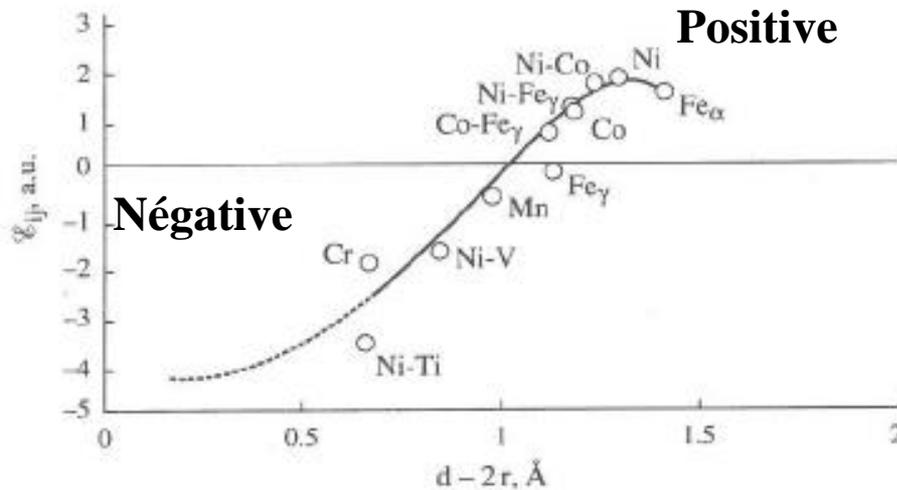
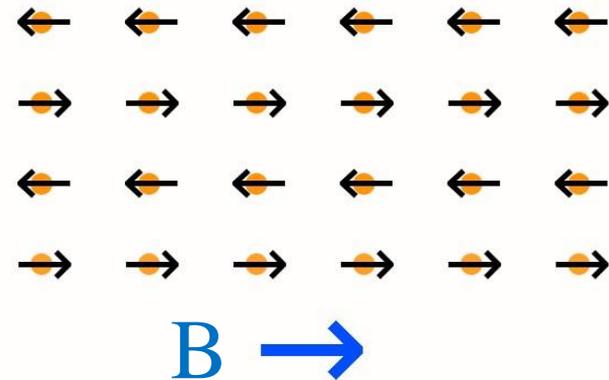


Figure 4.9 - Slater-Néel curve

Champ moléculaire local

$1/\chi$ (T) suit une loi hyperbolique

Antiferromagnétisme



- Observé dans MnO, par H.Bizette, C.F.Squire and B.Tsai CRAS 207 (1938) 449.
- Théorie F.Bitter Phys. Rev. 54 (1938) 79

- Vu par diffraction neutronique : C.G.Shull and J.S. Smart Phys. Rev. 76 (1949)

Strasbourg 21-23 mai 1939, Réunion internationale sur le magnétisme,

Autour de Pierre Weiss, Néel, Weil, Fortrat, Perrin, Cotton (Fr) Becker et Döring (Allemagne), Mott, Simon, Stoner et Sucksmith
(Angleterre), Gorter, Casimir et Kramers (Pays-bas), Barnett et van Vleck (USA)

Consécration de l'Antiferromagnétisme



3 septembre 1939, déclaration de guerre du Royaume-Uni et de la France à l'Allemagne

19 octobre 1939, création du CNRS

Repli de l'université de Strasbourg à Clermont-Ferrand.

L.Néel évacue les électro-aimants et équipements scientifiques de Strasbourg vers Bellevue-Meudon

L.Néel s'occupe de la neutralisation magnétique des navires de la Marine de janvier à août 1940

Après avoir travaillé à la neutralisation magnétique des navires de la marine de Janvier à août 1940 (en tant que capitaine de corvette au CRM de Toulon!) Louis Néel hésite entre Clermont Ferrand, Lyon et Grenoble qui lui semble la plus ouverte pour créer un grand laboratoire de physique

Le choix de Grenoble en 1940

Plutôt que Clermont-Ferrand, ou Lyon

Rappels sur Grenoble avant 1940

Une forte interaction entre enseignement, recherche et industries :

- **Première liaison électrique entre Vizille et Grenoble par Marcel DEPREZ en 1883**
- **Cours d'électrotechnique de Paul Janet en 1892-94 puis Joseph Pionchon**
- **Electricité et houille blanche (Aristide Bergés, Charles Keller) . Création de « Ecole d'ingénieurs électriciens 1900 ».**
- **Exposition internationale de la houille blanche et du tourisme en 1925. Hydraulique**
- **Chimie et Electrochimie (chimie du chlore, guerre de 14-18)**
- **Papeterie, ciments, bétons armés, aciéries ...**
- **Le soutien de l'université par les industriels (puis amis de l'université et ADR (1954))**

Faculté de sciences : Chimie, mathématiques, physique, géologie et géographie

et écoles d'ingénieurs (Electrotechnique, Hydraulique, Radioélectricité et Electrochimie-Electrométallurgie)

1919 : embauche de René Fortrat physicien, **1921** arrivée de René Gosse mathématicien

En 1927, René Gosse succède au doyen Emile Gau à la faculté de sciences

et en **1928-29** il succède à Louis Barbillon à la présidence de l'IEG

René Gosse réalise la construction de l'Institut Fourier de mathématique et physique (1931-34)

il termine les constructions de l'Institut d'Electrotechnique (1939)

En 1938, Félix Esclançon arrive à Grenoble directeur adjoint de René Gosse à l'IEG.

L'institut Fourier (1934) Physique et Mathématiques Place du Doyen Gosse



René Fortrat 1881-1966



F. Esclangon 1905-1956



René Gosse 1883-1943

Pendant la guerre

Louis Néel travaille sur le magnétisme en faibles champs :

- Le magnétisme du navire (Laboratoire de magnétisme du navire),
- le magnétisme des laves et le trainage de leur aimantation,
 il confirme les retournements du champ magnétique terrestre
- Etude de la forme des domaines magnétiques (spikes)
- Aimantation des grains fins



- 40 publications dans Comptes-rendus de l'Institut Fourier,
 et Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences (CRAS)
- Direction du Laboratoire d'Essais Mécaniques (LEM) en 1942.

Une époque clef pour Grenoble 1940- 1945

Octobre 1940 : Création d'une « équipe ferromagnétisme » à Grenoble autour de Louis Néel (avec Louis Weil et Robert Forrer).

1941 : arrivée de Noël Félici. 1942, embauche de Roger Morel pour construire des machines électrostatiques de puissance. **Ils créeront en 1946 la SAMES**

1943 : arrivée de Félix Bertaut. Construction du premier diffractomètre à rayons X par Jacques Mering (du LCP)

1945 : Louis Néel présente son projet à Strasbourg pour son retour. Devant le manque d'enthousiasme il décide de rester à Grenoble, avec son équipe que Maurice Fallot rejoint.

Le choix de Grenoble en 1945

plutôt que Strasbourg

**Louis Néel obtient la création en 1946 du premier laboratoire
CNRS de province**

**le « Laboratoire d'Electrostatique et de Physique du Métal » : LEPM
Accompagné de création de postes universitaires et CNRS**

1947 : Louis Néel publie un premier rapport sur le ferrimagnétisme

**1947 : Louis Weil embauche Albert Lacaze (IEG) pour construire des liquéfacteurs
d'hydrogène (1951), puis d'hélium (1952-54). Création de TBT**

**1948 : Louis Néel embauche René Pauthenet (IEG) pour construire un électro-aimant
et travailler sur le magnétisme des ferrites, détermination des interactions magnétiques
(et recrutements de J.C.Barbier, P.Brissonneau, Louis Lyboutry...)**

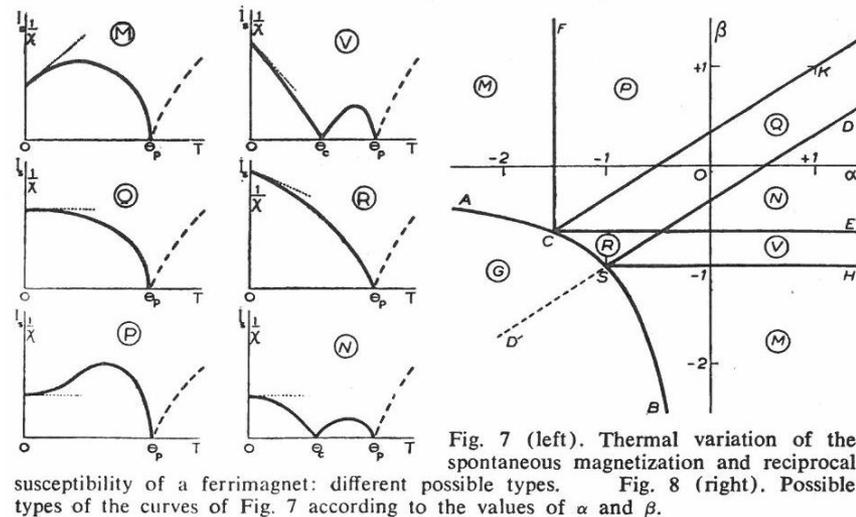
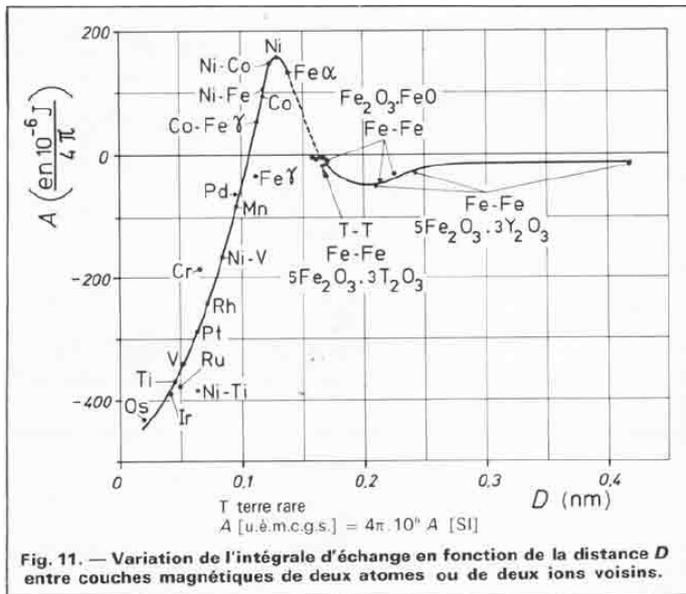
1951 Arrivée de Michel Soutif, avec son équipement de RMN (et ses collaborateurs plus tard)

1956 : Création d'une antenne CEA à Grenoble : le CENG.

**Construction de réacteurs de recherche et d'enseignement : diffraction
neutronique, génie physique.**

Implications de M.Soutif, L.Weil, F.Bertaut ... au CENG

Théorie du ferrimagnétisme, L.Néel, 1946-48 : interactions antiferromagnétiques entre ions de sites A et B, populations des sites A et B , fonction de la température



Démonstration de l'antiferromagnétisme par diffraction de neutrons à Oak Ridge par : C.G.Shull and S.J.Smart Phys. Rev. 76 (1949) 1256

Conférence de magnétisme à Grenoble 1950,
50 exposés

Conférence de Magnétisme, Grenoble 1950

ferromagnétisme, antiferromagnétisme et ferrimagnétisme



1948 -1951 Thèse d'ingénieur-docteur de René Pauthenet

Construction d'un électro-aimant 2 teslas, pour mesure d'aimantations depuis les hautes températures (1500K) jusqu'aux températures cryogéniques atteintes par Weil et Lacaze (77K ou 20K).

Première application de la théorie du ferrimagnétisme de L. Néel à l'aimantation de ferrites préparées au LEPM par L.Weil et L.Bochirol, dont la structure est déterminée par E.F.Bertaut, la susceptibilité mesurée par M.Fallot et P.Maroni.

- **Aimantation spontanée des ferrites « spinelles » : $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{MO}$ (M = Ni, Co, Fe, Mn) et ferrimagnétisme**
- **Les effets de traitements thermiques sur les propriétés des ferrite de Cu, de Mg ou de Ni-Zn s'expliquent par les variations des populations sur les différents sites.**

L'Electroaimant vertical 2T dans 15mm

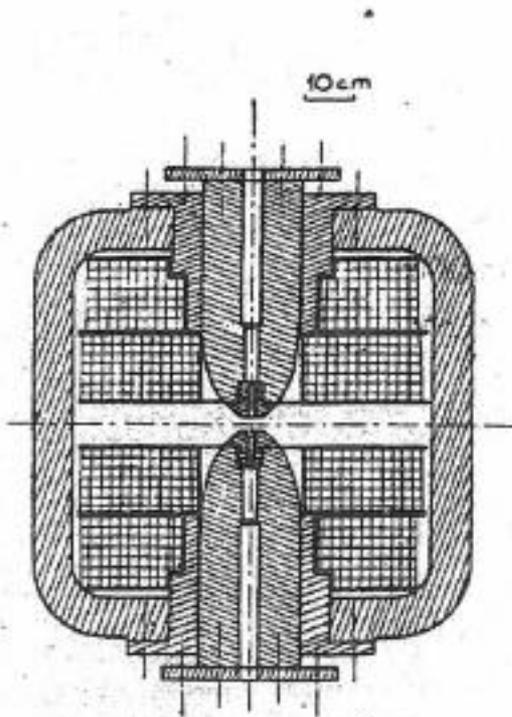


Fig. 1 - Coupe de l'électro-aimant.

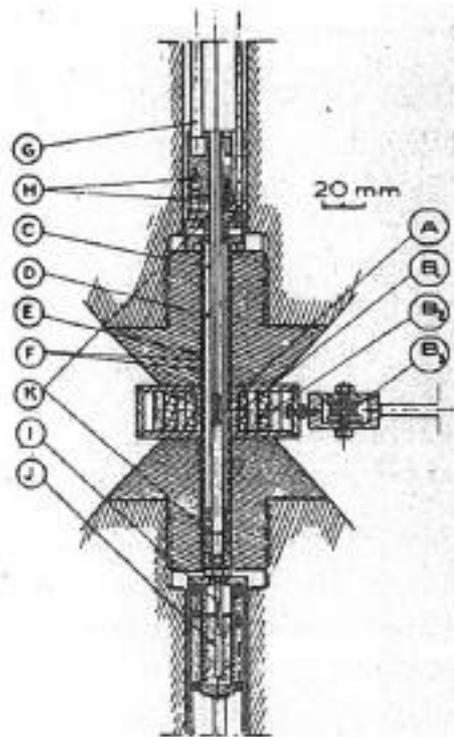
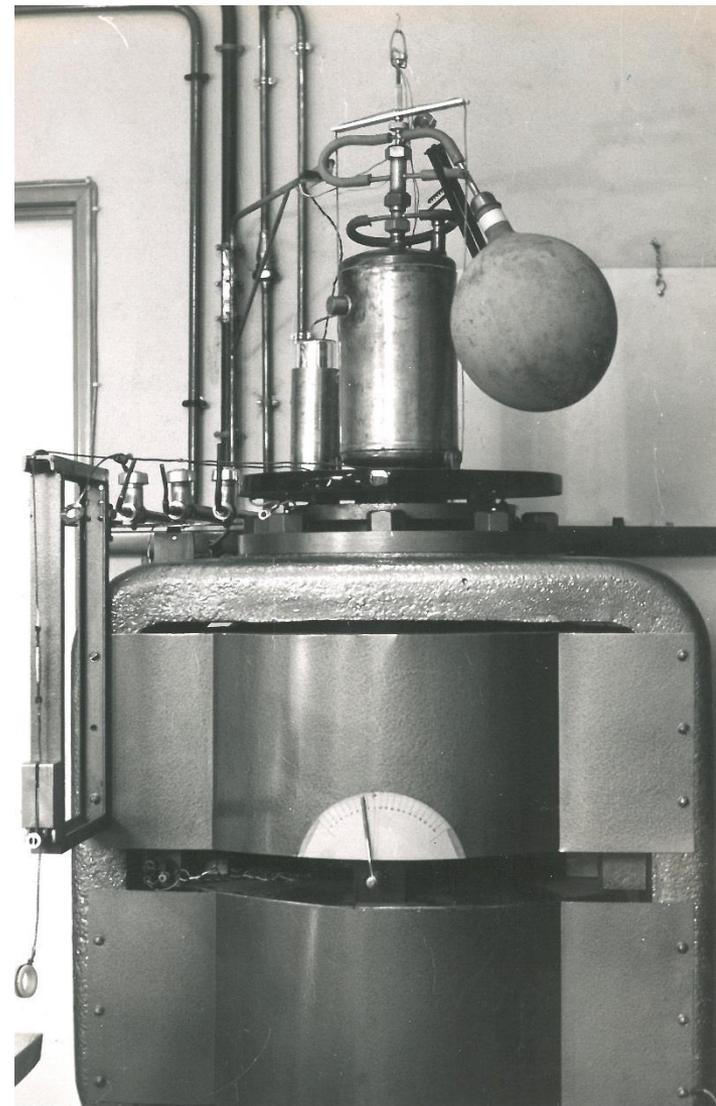


Fig. 4 - Bobines induites et four électrique.

Culasse coulée par les aciéries d'Ugine
Usinage et montage ENSEHG
2000 spires de cuivre (4,4-7mm) refroidies à l'eau
Batteries 80 V 35 A
H max : 2T dans $\Phi = 15$ mm



Electroaimant et cryostat

Les ferrites « grenat » de terres rares $\text{Fe}_5\text{M}_3\text{O}_{12}$

(découverte grenobloise)

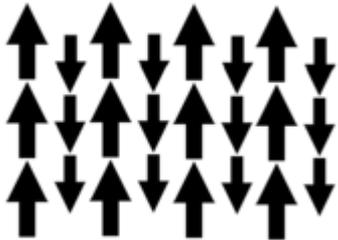
et thèse d'état de René Pauthenet

R. PAUTHENET commence par l'étude des propriétés magnétiques du ferrite d'Yttrium, de type grenat, avec R.Aléonard et J.C.Barbier, CRAS 242, N°21 (1956) p. 2531-2533.

Il étudie ensuite toute la série des ferrites grenat de terres rares, à 3 sous réseaux dont il calcule les 6 coefficients de champ moléculaire qu'il expose dans 2 papiers principaux :

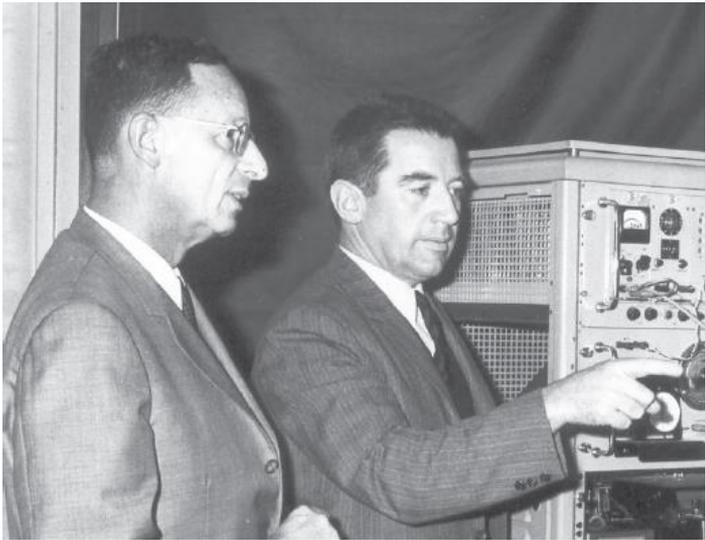
Propriétés magnétiques des ferrites de terres rares : $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$, avec $\text{M} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{ER}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$. Résultats expérimentaux. CRAS Volume 243, N°20 (1956) p 1499-1502

Interprétation des propriétés magnétiques des ferrites de terres rares : $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$, avec $\text{M} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{ER}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$. CRAS Volume 243, N°22 (1956) p1737-1740

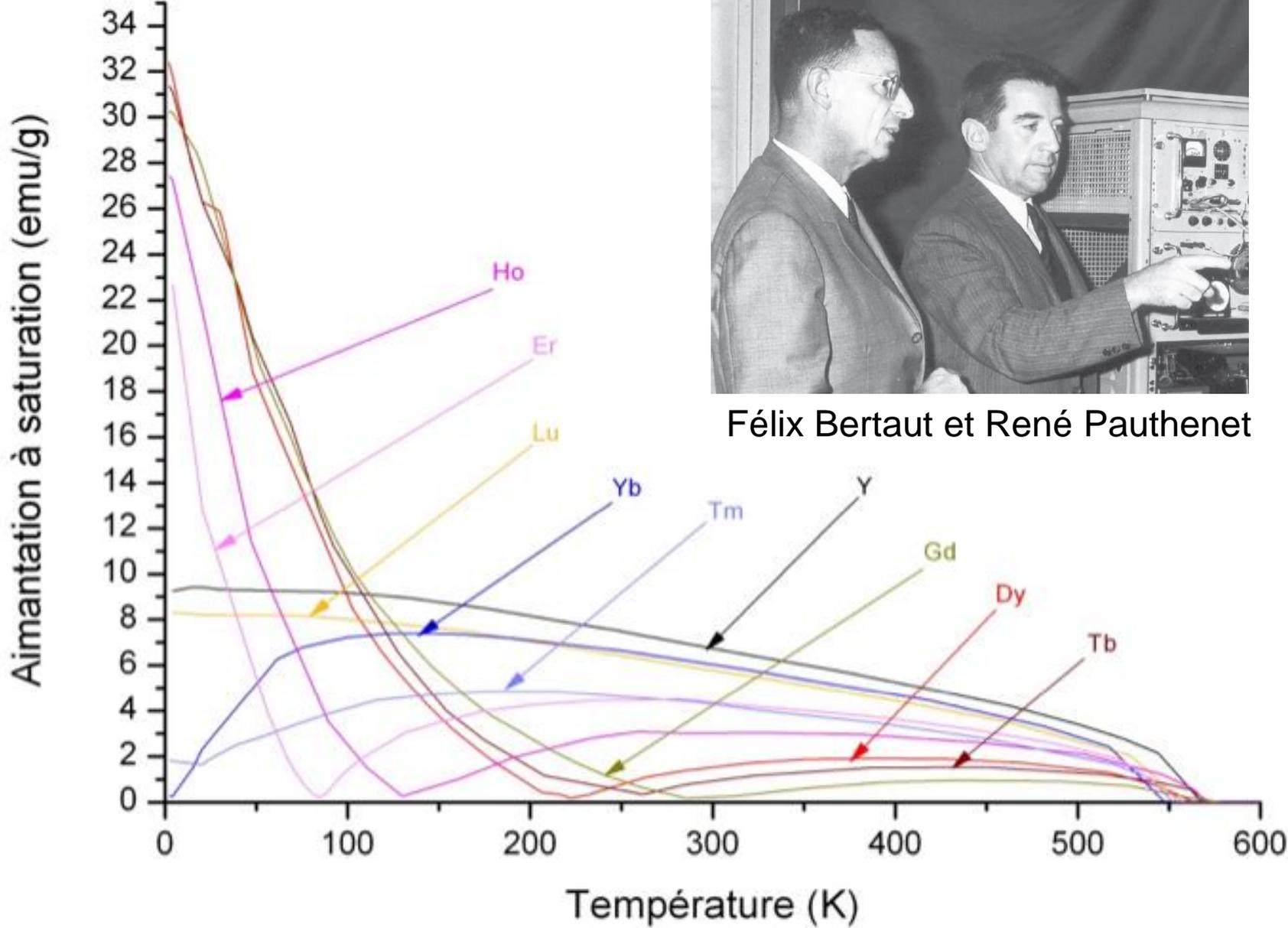


F. Bertaut et R.Pauthenet invités à la Convention sur les Ferrites de la conférence IEEE de Londres en 1956 ont ainsi détaillé l'ensemble des propriétés cristallographiques et ferrimagnétiques, publiées dans Roc. IEE (1957) 104B suppl. N°5,261-264.

Il faut noter le travail de Francis FORRAT et de Claudine MOETSCH pour l'élaboration et la caractérisation de ces nouvelles phases.



Félix Bertaut et René Pauthenet



Thèse d'état : 11 janvier 1957

René Pauthenet

Propriétés magnétiques des ferrites grenat d'Yttrium et de terres rares de
formule $5\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{M}_2\text{O}_3$

Jury : L.Néel, M.Fallot, L.Weil, Y.Ayant

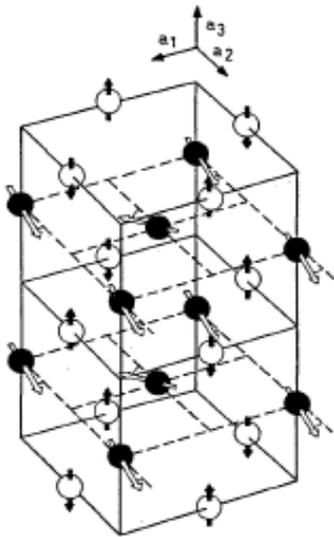


Fig. 3

Figure 3: Magnetic structure at low temperature : rare earth (full circle) : Fe,Cr (empty circle). 3) Phase Γ_2 HoFeO_3 ; HoCrO_3 ; the rare earth moment is in the plane a_1, a_2

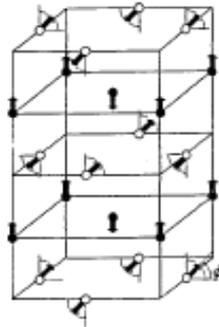


Fig. 4

Figure 4: Magnetic structure at low temperature: 3b) Phase $\Gamma_1 + \Gamma_4$ ErFeO_3 ; the rare earth moment is along a_3 .

**Conférence de Magnétisme
à Grenoble 1958 .**

78 exposés

(apparition de l'hélimagnétisme
Akio Yoshimori, Jacques Villain)

Vers des champs plus intenses

En 1959, des champs magnétiques pulsés de 240T permettent de découpler les réseaux d'un ferrimagnétique dans 240T à Grenoble
(par M. Guillot au fort du Murier)

1960 : aux USA débuts du Laboratoire de Champs Magnétiques Intenses « Francis Bitter National Magnet Laboratory » au M.I.T.

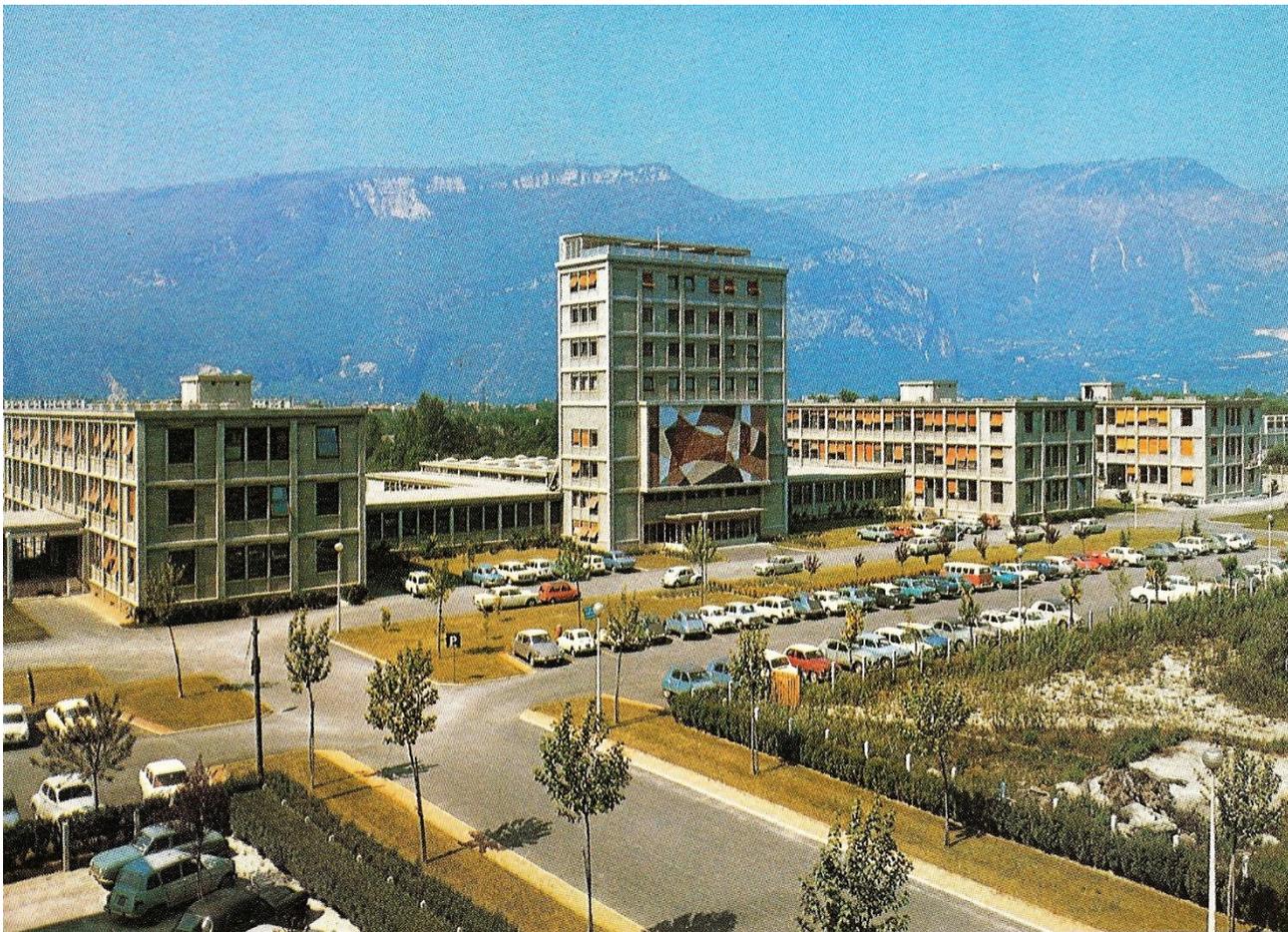
En 1961, Guy Rimet construit un électroaimant (22 tonnes) sous la direction de René Pauthenet pour l'étude de l'aimantation et l'anisotropie de cristaux ferromagnétiques, dont le Cobalt en phase hexagonale, produisant

3 T dans un entrefer de 54 mm

avec une puissance dissipée de 150 kW (300 V, 500 A).

En 1975, le CNRS crée le Service National des Champs Magnétiques Pulsés (SNCMP) sur le site de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) à Toulouse.

1962-63 de nouveaux locaux CNRS



**Cristallographie, Champs forts, Magnétisme, lames minces,
Electrostatique (Noël Félici), Très basses températures (Louis Weil),
Aujourd'hui ces laboratoires regroupés constituent « l'INSTITUT NEEL »
L'équipe de Michel Soutif reste à l'Institut Fourier avant de
rejoindre le campus de Saint Martin d'Hères (Spectrométrie Physique)**

Ces nouveaux locaux font l'objet d'un premier projet de « Service National de Champs Intenses » dit « Champs forts » en 1963

Pour produire des champs de 10 T ou plus, il faut une puissance d'alimentation élevée, soit plusieurs MW, sans circuit magnétique en fer afin de ménager le maximum de place aux bobinages, et évacuer l'énorme quantité d'énergie dissipée avec de l'eau circulant à grande vitesse.

Ayant trouvé les moyens financiers pour acquérir une génératrice de 1.7 MW, R. Pauthenet construit avec J.L.Féron et J.C.Picoche, plusieurs bobines sans fer et franchit la barre des 10 T :

**8T dans 51 mm de diamètre avec une bobine de Wood
11T dans 30 mm de diamètre avec une bobine de Bitter**

Le CRTBT (centre de recherches sur les très basses températures) est associé à ce travail pour l'obtention de températures de l'ordre de 50 mK par désaimantation adiabatique.

Les premières bobines supraconductrices

Le CRTBT développe de son côté des aimants supraconducteurs pouvant atteindre 8T ou même 10T dans un diamètre de 30 mm (L.Weil, J.C.Vallier).

1966 : NOUVEAU PROJET DE CHAMPS CONTINUS à GRENOBLE (Bât J)

**Le choix de thyristors plutôt qu'une génératrice
(Alsthom)**

Installation de 10 MW prévue et financée (en 2 étapes)

Juillet 1970 : ICM à Grenoble : 500 exposés

1970 : prix Nobel de Louis Néel

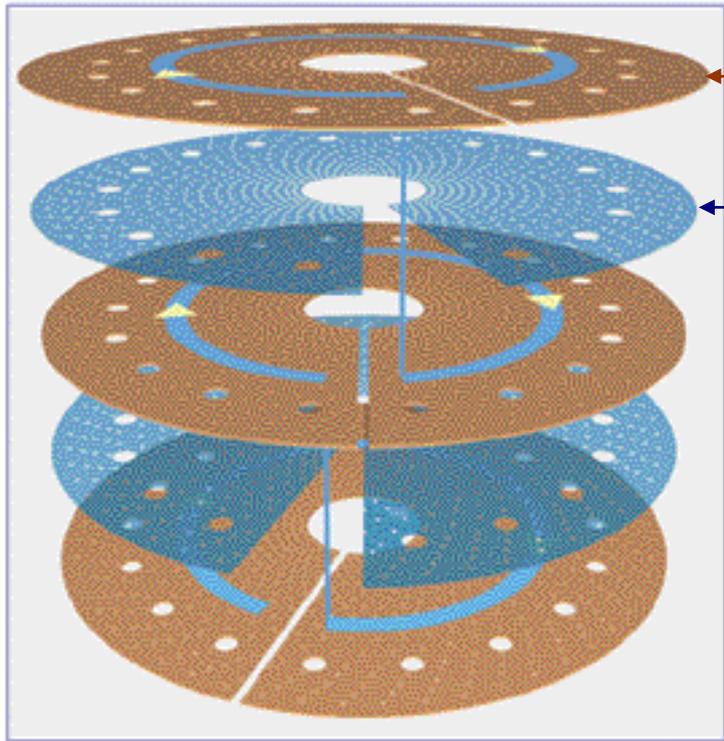
**1971 : René Pauthenet est nommé directeur du
Service National des Champs Intenses**

**Implication des laboratoires : CRTBT, Magnétisme,
Cristallographie, LSP**

**1972 – 2005 : 33 ans de collaboration avec le MPI Stuttgart
(Allemagne, grâce aux accords de l'Elysée 1963) :**
K. Dransfeld, M. v. Schickfus and S. Hunklinger

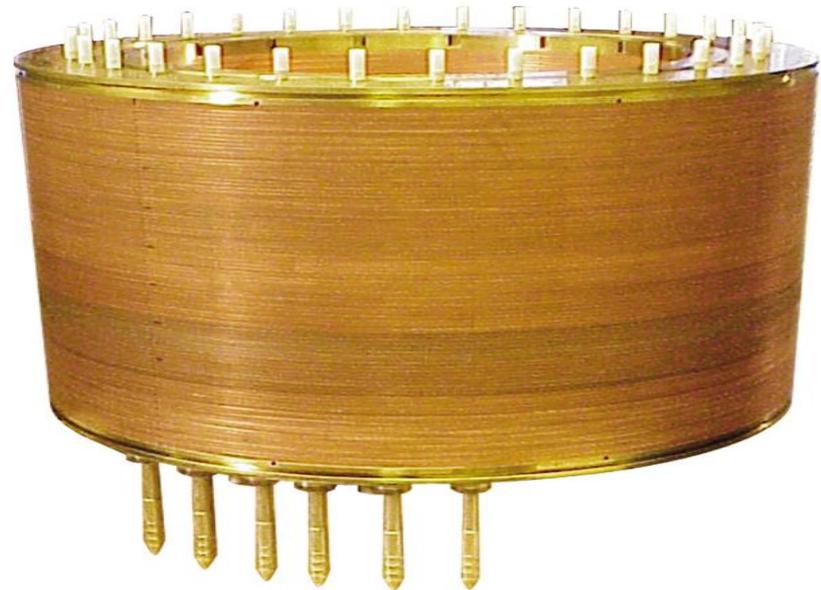


Construction d'aimants grâce à la technologie des disques de Bitter

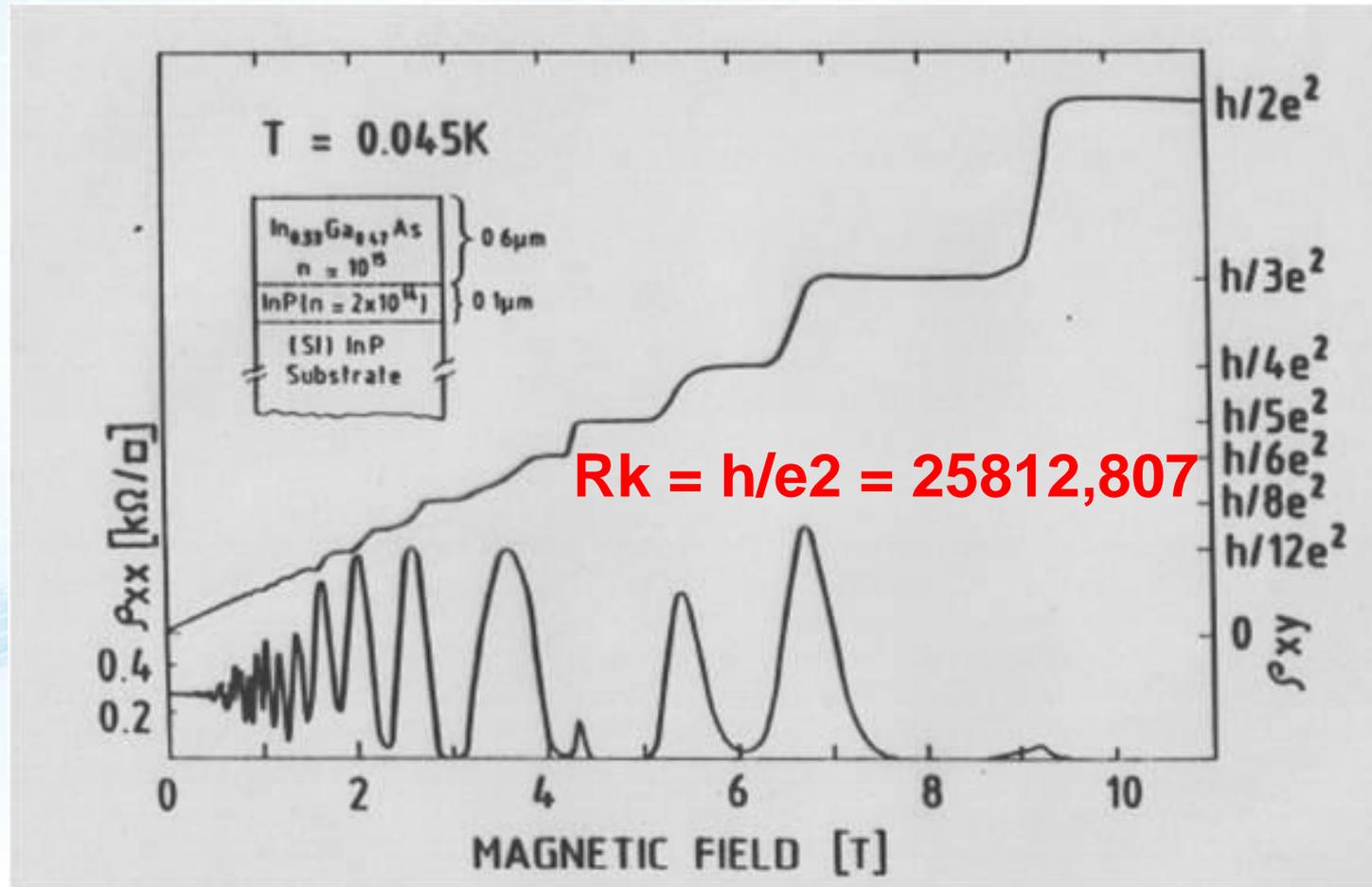


Disque de Bitter -
épaisseur 1 mm

Disque isolant en plastique -
épaisseur 0,1 mm



Découverte de l'effet Hall quantique le 4 février 1980 par Klaus von Klitzing , à Grenoble



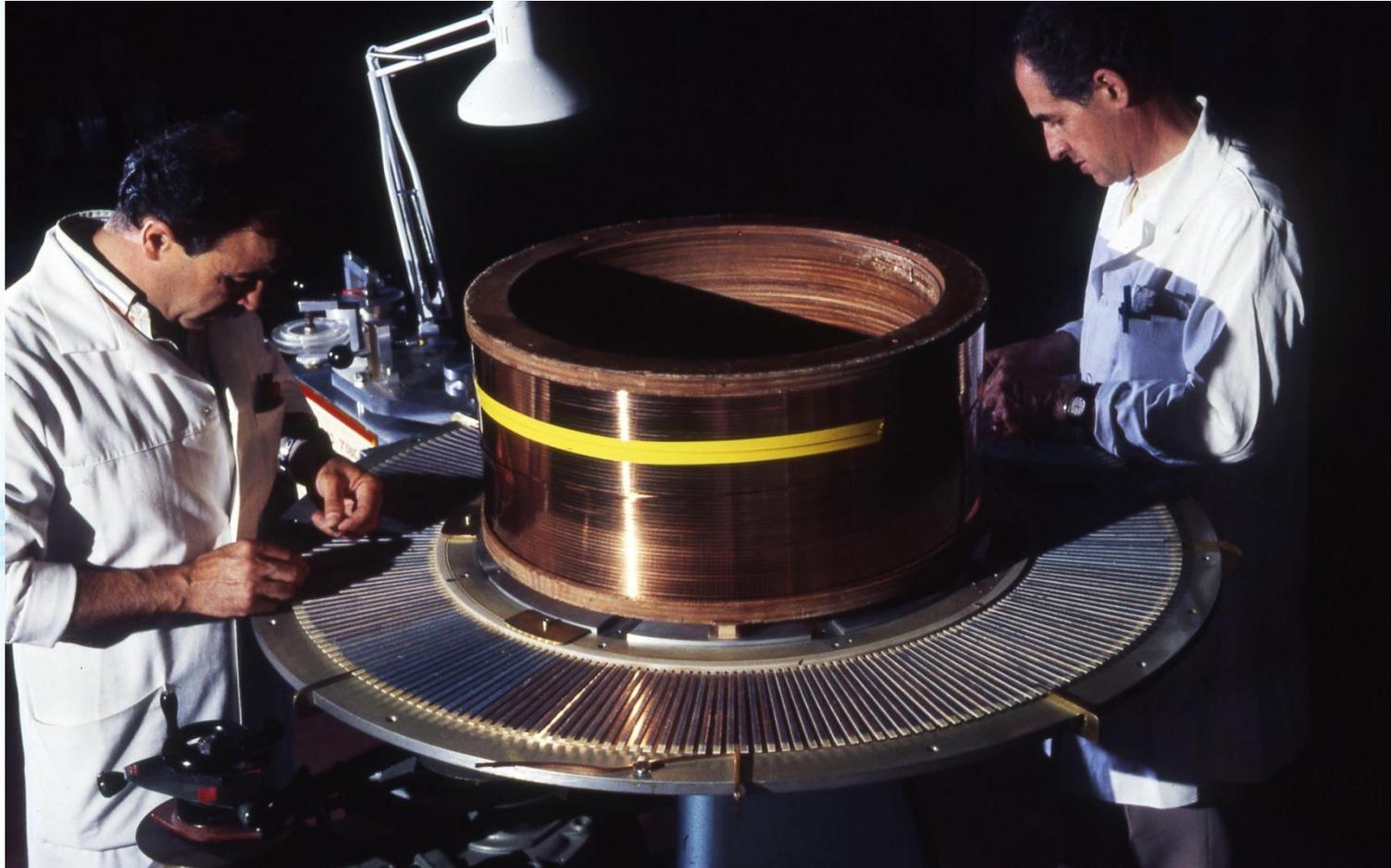
1985 : Prix Nobel de physique : Klaus von Klitzing

Dès 1975, le **projet d'une bobine hybride** associant une partie supraconductrice à l'extérieur et une partie en cuivre à l'intérieur est adopté par Daniel Bloch, Guy Aubert, Robert Tournier et les ingénieurs J.C.Vallier, J.C. Picoche et P.Rub.

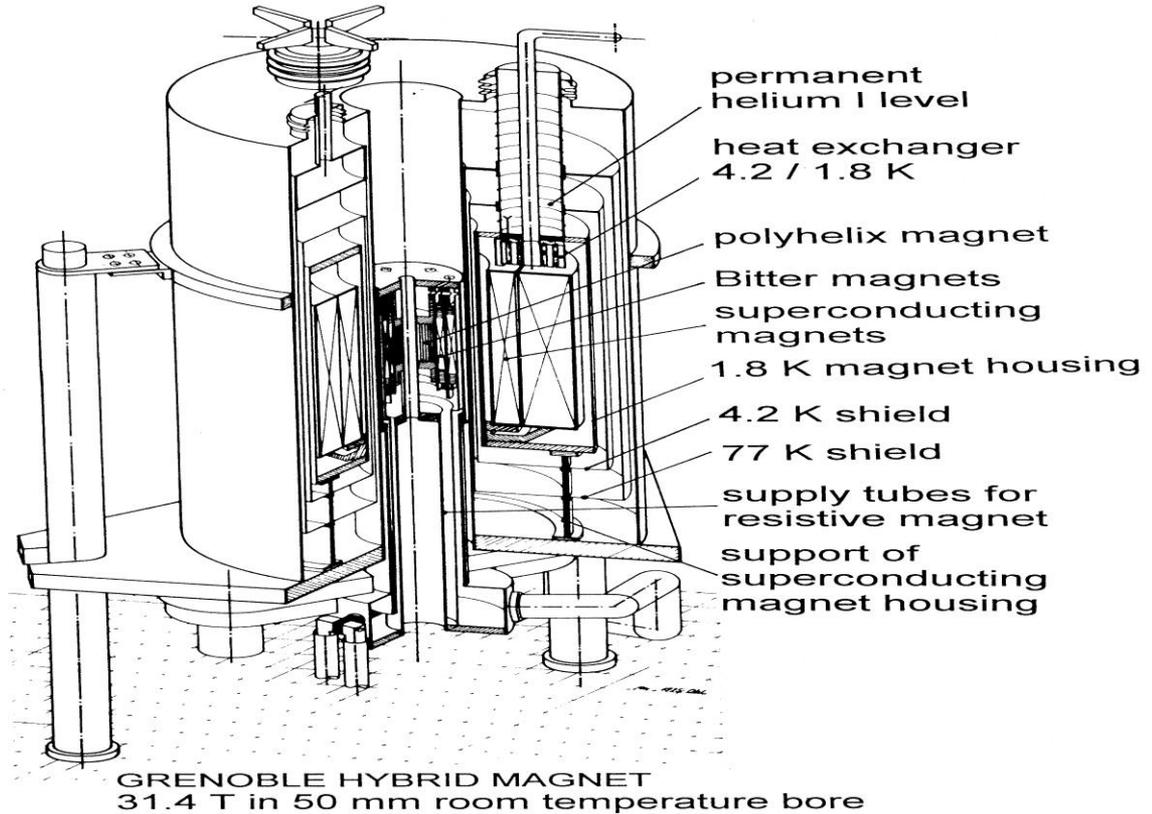
Ce projet est réalisé compte-tenu des progrès dans le domaine des supraconducteurs et de leur fonctionnement dans un bain d'hélium à 1.8K (bain G. Claudet (CEA) et J.C.Vallier 1979), ainsi que dans la technologie des bobines de Bitter (P.Rub) et polyhélices (H.Schneider-Muntau 1981).

**AIMANT SUPRACONDUCTEUR 11T, diamètre utile 40
cm, pour SNCI
(J.C. Vallier, A.Boulbés, J.Pilon)**

Photo Pierre Gianèse



**1987 : L'équipe CNRS-MPG :
Hans Schneider-Muntau et Jean-Claude Vallier atteint le
record de champ magnétique continu en aimant
hybride : 31.35T, dans un diamètre de 50 mm**



1987 Décès de René Pauthenet

Résumé René Pauthenet

Enseignement :

CNRS de 1948 à 1957, Maître de conférences, 1961 Professeur

1971 : Directeur ENSEG, 1976 Vice-président INPG, 1978 Président du CUEFA

1966 : création et direction du « Génie Physique » à l'INPG

Recherche, construction, directions:

1948-1951 : thèse d'ingénieur-docteur

1957 : Thèse d'état sur grenats d'Yttrium et de Terres Rares

Environ 200 publications. 72 invitations à l'étranger

1960-70 membre puis secrétaire de la commission magnétisme de UIPPA

1970-80 directeur du Service National de Champs Intenses : SNCI

1985 : Président de l'Action Concertée Européenne sur les Aimants Permanents

Distinctions :

Médaille d'argent du CNRS

1961 : Médaille Blondel

Chevalier du Mérite National

1970 : Grand Prix de l'Académie des Sciences

1984 : Chevalier de la Légion d'Honneur

1990

**Création du Laboratoire franco-allemand : LCMI ou
GHMFL**

**Doublement de la puissance électrique portée à 24 MW soit
400V et 2x30000A**

**Les Etats – Unis créent un nouveau laboratoire de champs
magnétiques continus à Tallahassee (Floride)
Couplé au
Laboratoire de champs pulsés de Los Alamos**

Le NHMFL

**Aujourd'hui : 37T dans un diamètre de 34 mm,
avec 24 MW**

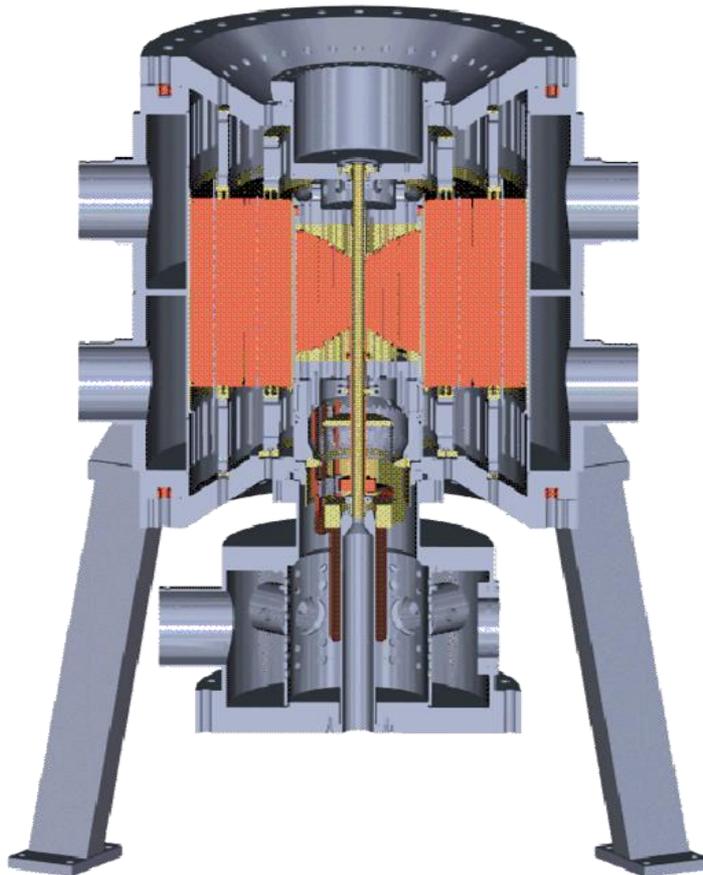
nouvelles polyhélices (G.Aubert, F.Debray, W.Joss)

Coupe et éléments de la partie intérieure

Vue générale de l'aimant 37T



Aimants résistifs à base d'alliages de cuivre actuellement en service au LNCMI-G et mis à la disposition de la communauté scientifique internationale



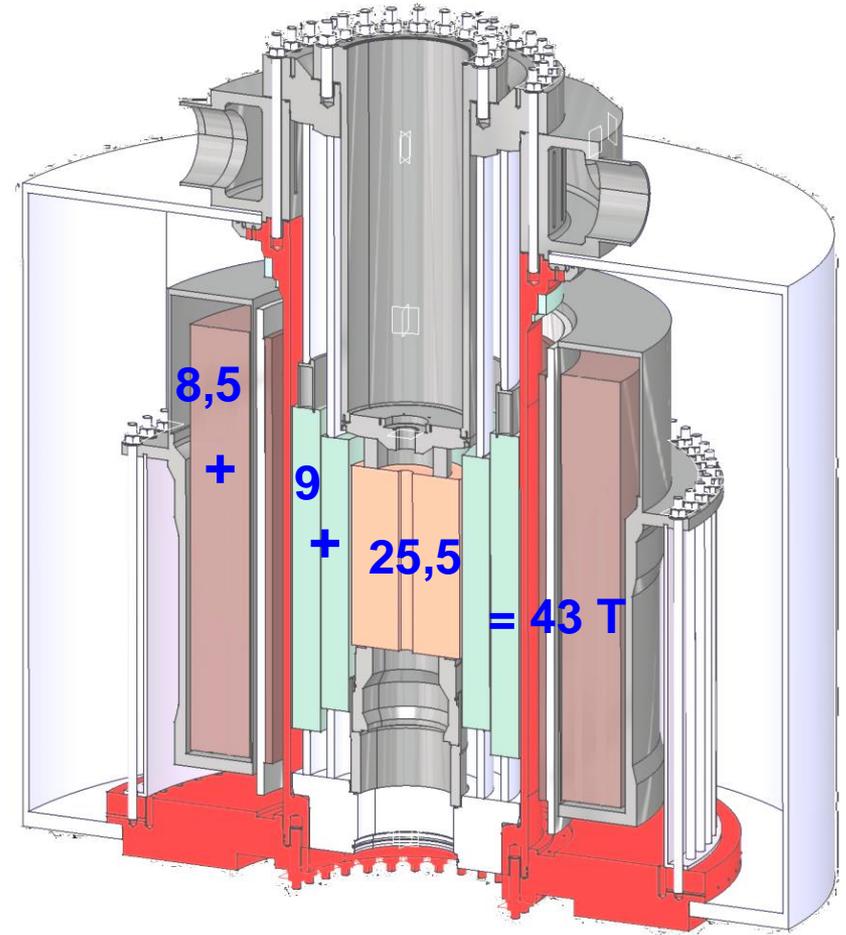
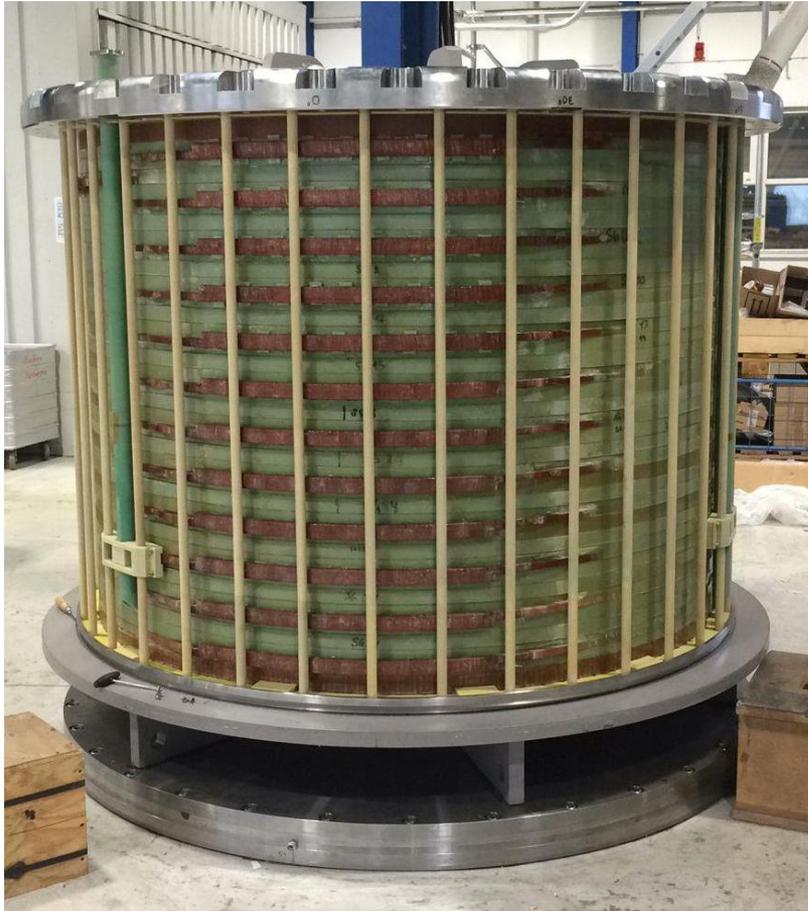
P élec (MW)	Champ (T)	Diamètr re utile (mm)
24	37	34
24	32	50
24	20	170
12	23	50
12	13	130
12	10	376
6	6	284 *

*** Aimant horizontal**

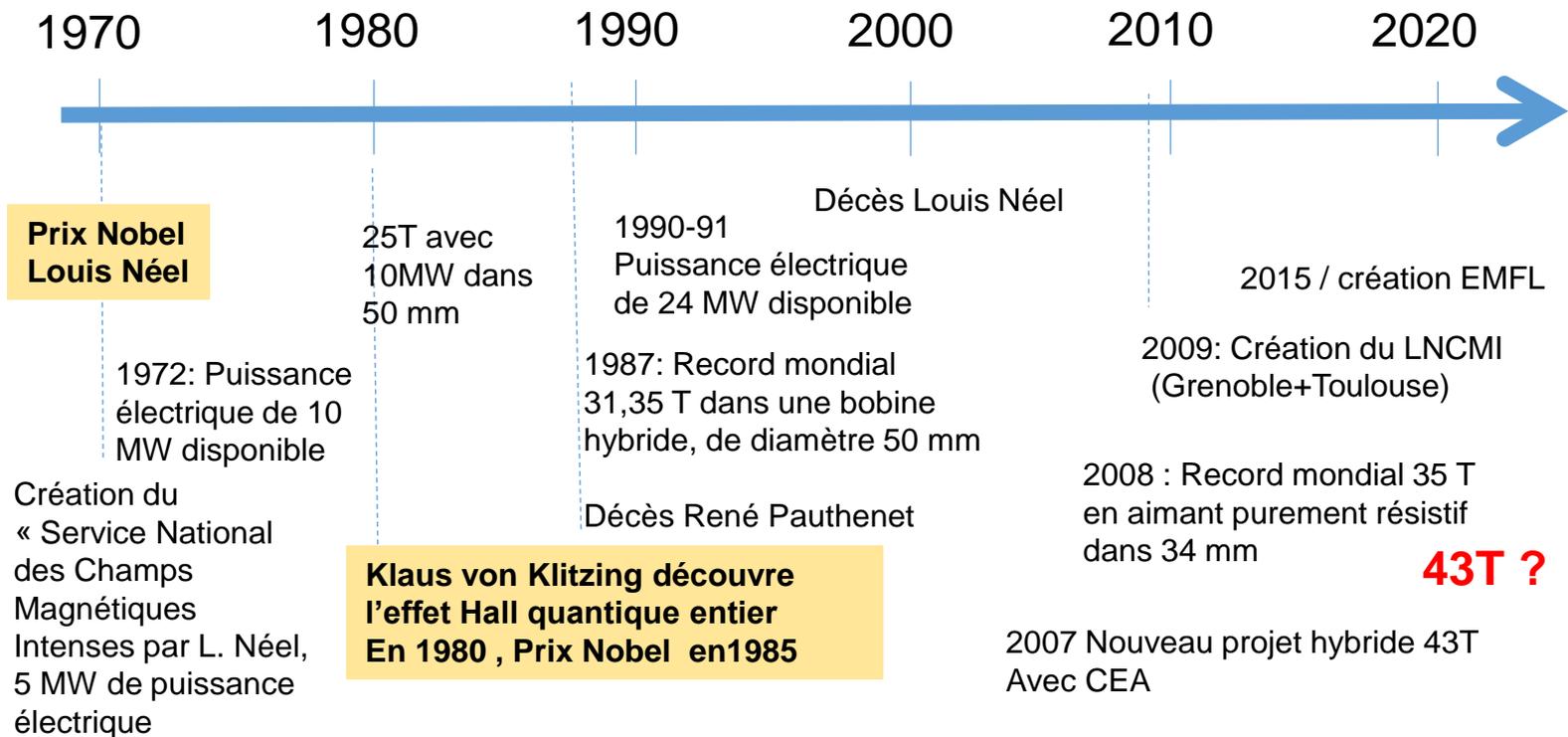
Le prochain aimant hybride du LNCMI

Objectif : 43 T dans ϕ 34 mm avec 24 MW

Avec CEA Saclay



La puissance électrique sera prochainement portée à 30 MW

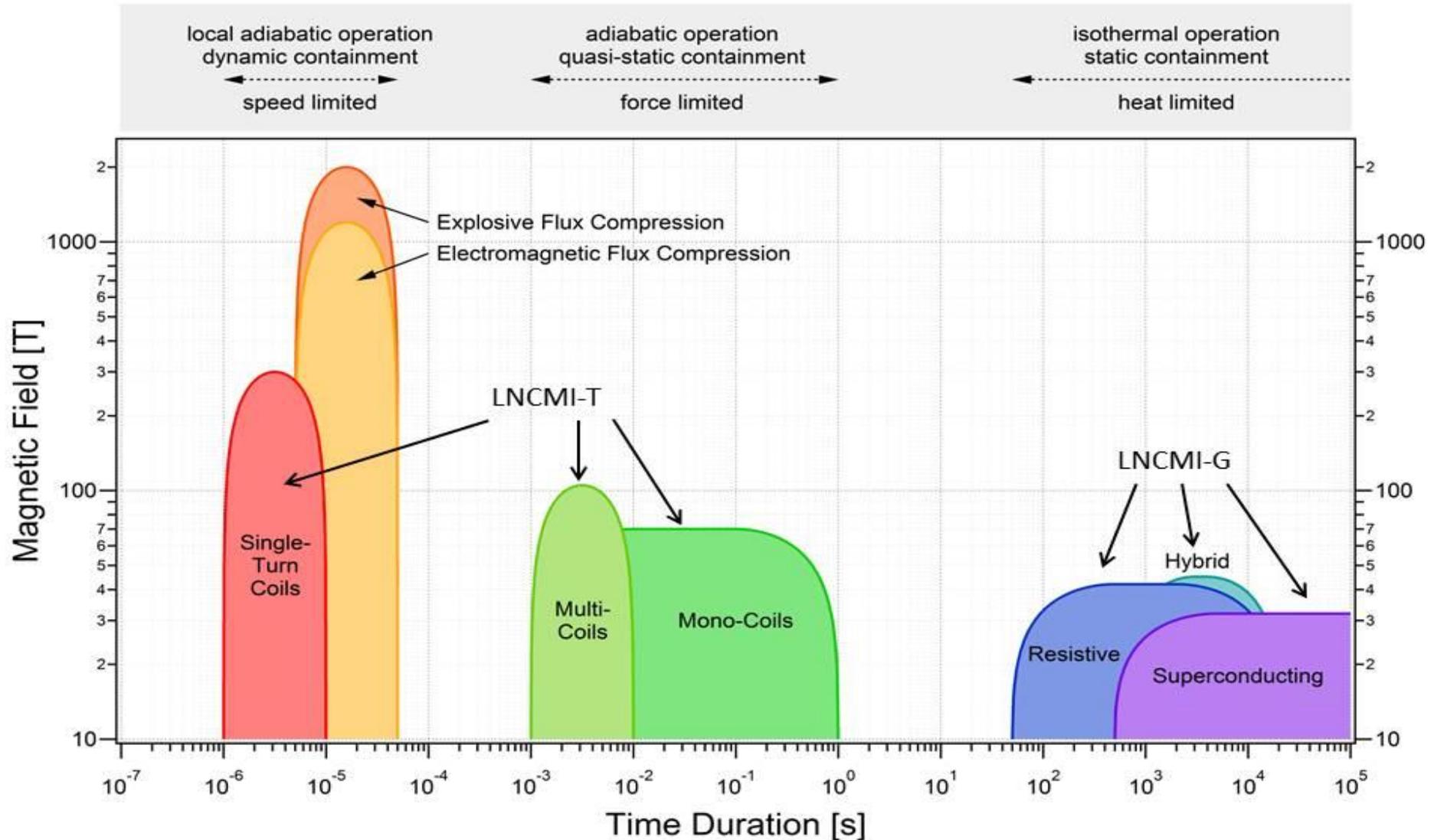


En 50 ans le Laboratoire est passé de 5 MW et 15T dans 34 mm de diamètre à 37T avec 24 MW, avec du cuivre

En 2021 Aimant hybride 43 T dans ϕ 34 mm avec 24 MW, en cours de montage

Projet d'aimant tout supraconducteur avec aimant commercial 19 T à l'extérieur et 21T en Supra à haute température critique à l'intérieur

Champs magnétiques atteints



LNCMI depuis 2009

Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses



Grenoble
Champs continus



Toulouse
Champs pulsés

Le **Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses** (LNCMI) est une infrastructure de recherche française, qui met à disposition des chercheurs du monde entier les champs magnétiques les plus intenses d'Europe. Les champs continus sont disponibles à Grenoble (LNCMI-G) et les champs pulsés à Toulouse (LNCMI-T).



Champs statiques

LNCMI - G

HFML Nimègue

Champs pulsés

LNCMI – Toulouse

HLD Dresde

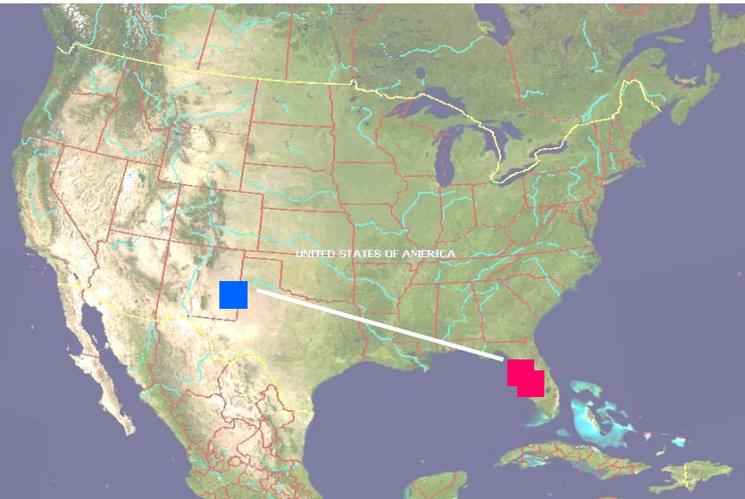
Composition LNCMI :
30 chercheurs et 60 ITA
36 temporaires
Production :
100 publications / an

Champs magnétiques intenses dans le monde

■ Champ continu

■ Champ pulsé

Etats unis



Tallahassee (continu),
45T avec 36 MW
Los Alamos (pulsé)
Gainesville (RMN)

Japon



Tsukuba,
Sendai

Chine



Hefei (continu),
Wuhan (pulsé)

Bibliographie principale

- 1 - Lucienne GOSSE : « René GOSSE 1883-1943. Bâtitteur de l'Université, Résistant des années noires », Presses Universitaires de Grenoble, BP47, 38040 Grenoble-cedex 09
- 2 – Louis NEEL : Un siècle de physique, Editions Odile Jacob, Paris 1991 (Voir aussi CRAS 1932, et titres et travaux, 1953)
- 3 – Dominique PESTRE : « Louis Néel. Le Magnétisme et Grenoble. Récit de la création d'un empire physicien dans la province française 1940-1965 », Cahiers pour l'histoire du CNRS, 8, 1990, 188 p.
- 4- SOUTIF Michel L'Asie, source de sciences et de techniques, [EDP Sciences](#) (1995).
- 5 – GUTHLEBEN Denis, « De Louis NEEL au campus CNRS de Grenoble, une aventure scientifique », 2015 Galaade éditions. Et La construction du grand électro-aimant de l'Académie des sciences, comité pour l'histoire du CNRS.
- 6 –PAUTHENET René, cours de Magnétisme 1962. Et « Théorie du magnétisme », Techniques de l'Ingénieur, D175 (1983).
- 7 – FAVIER René, Le roman de l'Université Grenoble (1339-2016)
PUG, la pierre et l'écrit (2017).
- 8 - du TREMOLET de LACHEISSERIE Étienne (coordinateur), *Magnétisme I - Fondements*, [Presses universitaires de Grenoble](#), Grenoble, 2000

Remerciements : Denis Guthleben, Claire Schlenker, Daniel Bloch, Jean Laforest, Jean-Claude Vallier, Hans Schneider-Muntau, Dominique Givord, Geert Rikken, François Debray, Pierre Pugnat ... et les collègues du LNCMI

Merci pour votre attention



Création CEA-Grenoble (1956),
CNRS (1962)

SNCI----LCMI----LNCMI

Installation à Grenoble de
ILL (1970), ESRF (1992)



Le magnétisme et ses applications

Nikola Tesla (USA 1856 – 1943) courant alternatif, transport, machines

Louis Néel (1904 – 2000) à Grenoble



- Antiferromagnétisme (1932)
(confirmé par neutrons 1949)
- Ferrimagnétisme (1947)
- Magnétisme des grains fins ou
nanomagnétisme (géomagnétisme,
enregistrement) (1960)
- Interactions entre couches ferro et antiferro

Création CEA-Grenoble (1956),
CNRS (1962)
LCMI (1970),...
Installation à Grenoble de
ILL (1970), ESRF (1992)

History of the Grenoble high magnetic field laboratory



Louis Néel (1904-2000) created the Electrostatics and Metal Physics Laboratory (LEPM) in « Institut Fourier » Grenoble **1946**, with L.Weil, E.F. Bertaut, N.Félici



René Pauthenet, (1925-1987) hired in **1948**, built a first **2 T** electro-magnet to study ferrimagnets



1962-63 - New CNRS laboratories were built on the « scientific polygon » in Grenoble.



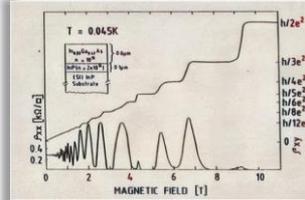
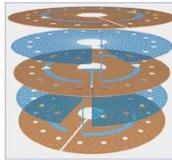
1963 - a "high field" project led by **René Pauthenet** started in building K with the installation of a **1.7 MW** generator.

Two experiments were built and several magnets tested to finally reach **11 T** in a **30 mm** bore diameter with a **Bitter coil** in **1967**, and temperatures of 50 mK were reached in such fields.

1970, **Louis Néel** gets the Nobel price for his theory of ferrimagnetism (1947) following his work on antiferromagnetism (1932)

René Pauthenet, **Pierre Rub** and **Jean-Claude Picoche** started a new high field project in 1966 as a **National Service for High Fields (SNCI)**. Building J was built in **1968-69**, and a new installation using « thyristors » was chosen to reach 5 and possibly 10 MW. R.Pauthenet became director of the SNCI in 1971.

In 1972 started a 33 years French-German cooperation between the CNRS and the Max-Planck Gesellschaft (K.Drantsfeld director of the german part). The running power reached **10 MW** in **1974**.



February **1980**, **Klaus von Klitzing** discovered the **quantum Hall effect**. He was awarded the Physics Nobel prize in **1985** for this



1982 - new **25 T** record with **10**

A **hybrid coil** project was launched in **1975-80**, combining a resistive and a superconducting coil. The superconducting part was built with the CRTBT. The CNRS-MPG team : **Jean-Claude Vallier** - **Hans Schneider-Muntau** reached the static magnetic field world record of **31.35 T** in this hybrid magnet in **1987**.



1990 - creation of a French-German laboratory. The power was then brought to **24 MW**.

From **2002 to 2020**, successive records from **33 to 37T** were obtained in Φ 34 mm with **24 MW**, with the poly-helix magnet design and new materials.



Hybrid project under construction aiming at **43T**, and its superconducting part

After dissolution of the French-German laboratory in **2004**, the GHMFL merged with the Toulouse laboratory for pulsed fields LNCMP in 2009 to become **the LNCMI**.

Since **2015**, the **LNCMI** is part of the **European Magnetic Field Laboratory : EMFL**, with the **Nijmegen** and **Dresden** laboratories