



La revue

# 3E.I

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société des Electriciens et des Electroniciens  
Cercle Thématique 13.01



NUMERO 15 DECEMBRE 1998



Cercle Thématique 13.01 La Revue 3E.I  
Relations enseignement au sein du club 13  
48 rue de la Procession 75724 Paris cedex 15

## La Revue 3E.I

### Responsables de la publication

Alain Cunière (Meaux)  
Gérard Delavier (Nogent/Marne)

### Equipe de rédaction

Jean Louis Bianchi (Versailles)  
François Boucher (Argenteuil)  
Gilles Feld (ENS Cachan)  
M. Michèle Lebihan (Versailles)

### Comité de lecture

Jean Pierre Caron (ENSAM Lille)  
Jean Faucher (ENSEEIH Toulouse)  
François Forest (LESIR Cachan)  
Michel Lavabre (ENS Cachan)  
Michel Meunier (SUPELEC)  
Bernard Multon (ENS Rennes)  
Jean Marie Peter (SEE Paris)

### Articles

La Revue 3E.I  
lycée Pierre de Coubertin  
chaussée de Paris  
77100 Meaux

### Abonnements

année scolaire 1998/1999:  
180F les 4 numéros (France et CEE)  
240F les 4 numéros (hors CEE).

La Revue 3E.I n'est pas solidaire des opinions émises par les auteurs d'articles. Celles-ci n'engagent que la seule responsabilité de leurs auteurs.

### Impression

(1000 exemplaires)  
Imprimerie OG4  
rue des frères Lumière  
ZI des Chanoux  
93330 Neuilly sur Marne  
Distribué par  
SAFI SYNTONE

Dépôt légal :  
décembre 1998

Commission paritaire :  
1202 G 78028

ISSN :  
1252-770X

## Sommaire

p II Sommaire  
p III Publicité  
p IV Annonce Journées 3E.I 1999

p 1 Editorial

### LES AIMANTS ET ELECTRO AIMANTS

p 2 Les paliers magnétiques  
*par J. DELAMARE, F. FAURE (LEG, GRENOBLE)*  
p 10 Calcul rationnel des circuits magnétiques comportant des aimants  
*par D. MATT (LEM, MONTPELLIER)*  
p 20 Magnétisation et démagnétisation des dispositifs à aimants permanents  
*par C. LESBROUSSART (Société SEIBO, NOYON)*

### LEÇON

p 26 Aimants permanents  
*par F. ALVES (LESIR, ENS de CACHAN)*

### FICHES TRAVAUX PRATIQUES

p 38 Etude électromagnétique de contacteurs en régime d'alimentation continue et alternative  
*par L. KHIRAT, M. MONTREDON (lycée de ST Cyr L'ECOLE)*  
p 42 Simulation électrotechnique avec le logiciel SIMPLORER  
*par P. LEBRUN (lycée de NOGENT/MARNE)*  
p 46 Un variateur de vitesse pour MAS à contrôle vectoriel de flux :  
pour quoi faire ?  
*par P. BRUNET, J.C. FORTIN (lycée de VIERZON)*

### L'ACTUALITE TECHNOLOGIQUE

p 51 Evaluation du niveau de protection des varistances à Oxyde de Zinc utilisées comme éléments de parafoudre  
*par M. AZIZI, O. MOKHTARI (USTUM I, OUJDA MAROC)*

### JOURNEES D'ETUDE

p 62 Compte-rendu de la journée d'étude du 29 septembre à SUPELEC  
*par M. MEUNIER (SUPELEC, GIF/YVETTE)*

### RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

p 68 Quelle motorisation pour le véhicule électrique :  
synchrone à rotor bobiné ou à aimants ?  
*par A. LEVY (THOMSON/AUXILEC, CHATOU)*

### SERVICE LECTEURS

p 75 Station IFA 2000 d'EDF  
*par A. CUNIERE (lycée de MEAUX)*

## La lettre de l'équipe de rédaction

La cinquième année de parution de la Revue 3EI débute par l'édition de ce numéro 15 dont le thème est consacré aux aimants. Ces matériaux prennent une place de plus en plus importante dans la constitution des différents actionneurs et sont trop peu étudiés dans nos cours. Nous souhaitons que les articles qui suivent, aident nos collègues à introduire ou développer l'étude des aimants dans leur cours d'électrotechnique. De nombreux textes nous ont été adressés sur le sujet, nous avons été contraints de les répartir sur deux numéros. Un texte sur les machines synchrones spéciales à aimants et un autre sur les aimants composites paraîtront en mars prochain (n°16).

Comme nous nous y étions engagés, et pour répondre à l'attente de la plus grande majorité de nos lecteurs, nous développerons les articles à caractère pédagogique sous forme de leçon, de thèmes de travaux dirigés ou de travaux pratiques.

L'objectif du cercle 13-01 de la SEE, dont la Revue 3EI est l'un des outils, est de favoriser les échanges entre les enseignants, les chercheurs et les industriels. Pour cela, nous souhaitons aider nos collègues à participer à des journées d'études ou leur donner la possibilité d'avoir accès aux publications des textes des conférences et séances de travail tenues lors de ces journées. Nous publions dans ce numéro les textes rapportant les échanges ayant eu lieu lors des séances d'ateliers organisées le 29 septembre dernier, au cours de la journée qui s'est tenue à SUPELEC sur le thème des transformateurs et inductances de l'électronique de puissance (annonce dans le n°13 de juin 98). Plus d'une vingtaine de professeurs de sections de TS, abonnés à la Revue, ont pu y participer en bénéficiant d'un tarif privilégié.

Nous continuerons régulièrement à rendre compte de ces journées d'études. La prochaine, se déroulera à l'ENS de CACHAN, sur le thème des entraînements directs. (annonce dans le numéro 14 de septembre 98).

Pour développer encore cet outil d'information qu'est aussi cette Revue 3EI, une rubrique actualité technologique voit le jour. D'autres rubriques apparaîtront certainement, suite à vos suggestions.

Nous sommes en train d'analyser les réponses au questionnaire accompagnant le bulletin d'abonnement 98/99; nous publierons en mars prochain le résultat de ce sondage effectué auprès de vous. Dès à présent, nous retenons de cette consultation que le souhait majoritaire, est de trouver dans la Revue 3EI des articles favorisant les échanges pédagogiques. Cela nous conforte dans l'esprit que nous avons donné à cette publication. Des collègues souhaitent trouver des références Internet concernant le domaine EEI; cette remarque est prise en compte et dès ce numéro 15, des sites WEB sont précisés à la fin de certains articles. Vous êtes très nombreux à nous encourager dans notre travail et nous vous en remercions.

Continuez à nous aider dans cette tâche que nous avons choisi volontairement d'accomplir, en nous faisant part de vos remarques et propositions en faisant connaître la Revue 3EI à vos collègues et en les incitant à souscrire un abonnement. L'équilibre financier de notre entreprise est aussi l'une des conditions à satisfaire pour la continuité de notre action, vous pouvez aussi y contribuer.

L'équipe de rédaction sera heureuse de vous rencontrer lors des journées 3EI'99.

# Les paliers magnétiques

Jérôme Delamare, Fabien Faure

Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

B.P. 46, 38402 Saint Martin d'Hères CEDEX - <http://www-leg.ensieg.inpg.fr>

## Résumé

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leur limite. Ils permettent à un rotor de tourner sans frottement ni contact. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance. Cet article, après une introduction sur la lévitation, explique l'intérêt des paliers magnétiques, énumère leurs domaines d'application, décrit les principes de fonctionnement et détaille un exemple simple de suspension magnétique.

## I Introduction : la lévitation magnétique.

Les champs magnétiques sont utilisés pour générer des forces dans la majorité des actionneurs qui nous entourent. Souvent, ces actionneurs ne fonctionnent que suivant un degré de liberté. Dans le cas d'un moteur, par exemple, seuls les efforts magnétiques qui permettent la rotation de l'arbre sont utilisés. Dans le cas d'un objet en lévitation dans un champ magnétique, c'est à dire flottant sans contact, les efforts doivent être générés et contrôlés suivant les six degrés de liberté. Prenons l'exemple du Swissmetro [1], un train en sustentation magnétique dans un tunnel sous vide (Figure 1).

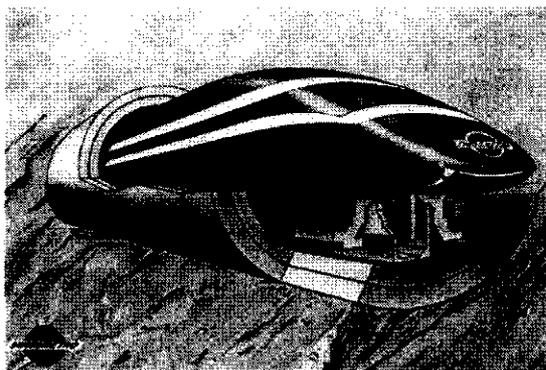


Figure 1 : Le Swissmetro

Dans ce projet, les concepteurs doivent gérer le roulis, le tangage, le lacet, la hauteur et la position latérale du train. Le sixième degré de liberté correspond au déplacement du train, géré par un moteur linéaire. La lévitation du Swissmetro est complexe car, à part le déplacement du train, tous les degrés de liberté sont instables. Plus concrètement, sans un contrôle très précis de tous les électroaimants servant à sa sustentation, le train a une forte tendance naturelle à venir se coller à son rail.

Lorsque l'on cherche à faire léviter un objet, obtenir sa stabilité relève d'un véritable casse-tête. Pour en être convaincu, il suffit de prendre deux

aimants en répulsion et tenter de les faire tenir l'un au-dessus de l'autre. On arrive aisément à obtenir un équilibre, mais cet équilibre est instable : à coup sûr l'aimant prend son envol... En 1839 S. Earnshaw [2] a démontré qu'une particule polarisée ne pouvait être stable dans un champ statique. Son théorème a depuis été étendu aux aimants et aux matériaux ferromagnétiques. Il est donc vain de tenter d'obtenir la lévitation d'un corps uniquement avec des aimants ou du fer. Par contre, il existe de nombreuses solutions pour détourner ce théorème. Une solution élégante consiste à utiliser un matériau diamagnétique. Contrairement à un matériau ferromagnétique qui conduit les lignes de champ, un matériau diamagnétique les repousse. Un supraconducteur peut être considéré comme un diamagnétique puisque les courants induits en son sein engendrent un flux qui s'oppose au flux qui les a créés. Il est ainsi possible de faire léviter un aimant au-dessus d'une pastille supraconductrice (Figure 2). Des progrès récents sur les supraconducteurs (laboratoire MATFORMAG, CNRS Grenoble) liés à de judicieuses associations d'aimants permettent d'obtenir des forces impressionnantes [3].

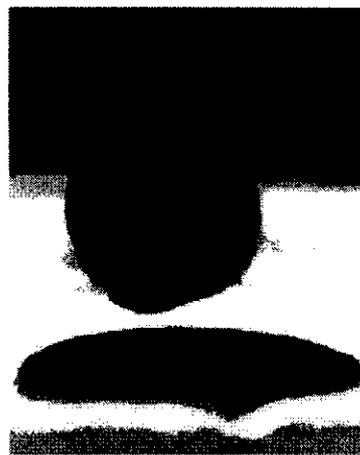


Figure 2 : Aimant en lévitation au dessus d'une pastille supraconductrice

Au Japon, un train expérimental plane à une vitesse de 400 km/h sur des bobines supraconductrices [4]. Malheureusement, pour fonctionner un supraconducteur doit être refroidi à l'azote ou à l'hélium liquide. Une ligne commerciale a donc peu de chances de voir le jour, car de telles performances ne sont réalisables que grâce à des systèmes cryogéniques complexes et très coûteux. L'expérience la plus spectaculaire reste la lévitation d'un animal dans un champ magnétique. En effet, contrairement à l'idée reçue, nous sommes tous légèrement diamagnétiques. Soumis à un gradient de champ intense (sous 18 T) nous pouvons donc tous léviter. Un parc d'attraction pourrait investir dans des bobine supraconductrices géantes capables de nous faire voler. En attendant, des chercheurs offrent ce type de distraction à des grenouilles (Figure 3). Une animation sur le WEB nous prouve qu'un batracien peut vivre sous l'eau, sur terre... et dans les airs ! [5].



Figure 3 : Grenouille volante

Un autre moyen de détourner le théorème d'Earnshaw, et d'obtenir une lévitation stable, consiste à utiliser des champs alternatifs. Il est ainsi possible d'aller voir au palais de la découverte [6] un disque de cuivre qui flotte au-dessus d'une bobine (Figure 4). Le principe est le même que celui du moteur à induction :

- la bobine crée un champ alternatif,
- le champ pénètre dans la plaque de cuivre,
- des courants sont induits dans la plaque,
- ces courants, soumis au champ magnétique, subissent la force de Laplace et soulèvent le plateau.



Figure 4 : Lévitation par courants induits

L'inconvénient majeur de cette méthode vient de la puissance importante qu'il est nécessaire de fournir

à la bobine. Cette puissance engendre un échauffement important de la partie suspendue et de l'inducteur. Pour cette raison cette méthode n'est utilisée de manière industrielle que dans des fours à induction. Cela permet de chauffer des métaux sans qu'ils soient en contact avec un creuset risquant de les polluer.

Enfin, il existe un moyen d'obtenir la lévitation d'un objet avec uniquement deux aimants. Pour cela il n'est pas utile d'avoir un champ intense, un supraconducteur ou des courants induits. On utilise juste l'effet gyroscopique. C'est ainsi que l'on peut trouver dans le commerce (Nature&Découverte...), des toupies capables de tourner quelques minutes à plusieurs centimètres au-dessus d'un socle magnétique (Figure 5)[7].

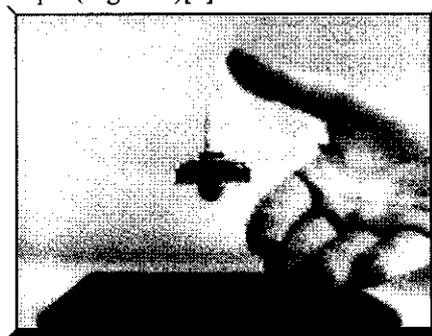


Figure 5 : Toupie Lévitron

Ce type de suspension est donc très simple à mettre en œuvre mais a deux inconvénients :

- l'équilibre obtenu n'est pas très stable,
- la partie suspendue doit obligatoirement être en rotation.

La lévitation par supraconducteur, dans de forts gradients de champ, par courants induits ou par stabilisation gyroscopique donnent lieu aujourd'hui à peu d'applications industrielles. Des problèmes technologiques, économiques ou tout simplement de performance les cantonnent pour l'instant dans les laboratoires. Cependant, les avancées scientifiques régulières obtenues sur les supraconducteurs laissent espérer que des applications verront le jour dans les prochaines années.

Pour réaliser une suspension magnétique, les industriels ont recours à des électroaimants asservis. Pour obtenir un centreur, par exemple, ils utilisent des électroaimants qui exercent des forces sur un arbre en matériau ferromagnétique. La figure 6 représente le stator d'un centreur industriel produit par la société S2M [8].

Lorsque tous les degrés de libertés d'un mobile en suspension magnétique sont contrôlés par électroaimants, la suspension est dite active. Cependant, afin de simplifier certaines suspensions, il est possible d'utiliser des paliers magnétiques à base d'aimants. On assure la stabilité grâce à un ou plusieurs paliers actifs. Ces suspensions sont dites partiellement passives.

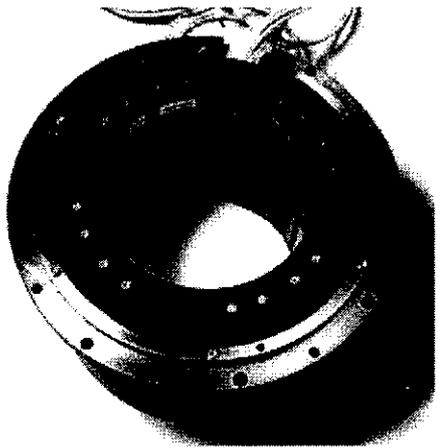


Figure 6 : Centreur magnétique S2M

## II Domaines d'utilisation

Les paliers magnétiques sont utilisés dans des domaines où les systèmes mécaniques atteignent leurs limites :

- **Domaine des hautes vitesses** : la vitesse de rotation d'un roulement à billes est limitée sous peine de problèmes mécaniques et d'échauffements. L'absence de contact dans un palier magnétique permet d'atteindre des vitesses bien supérieures. La limite est définie par la rupture mécanique du rotor du fait de la force centrifuge engendrée par la rotation. Une suspension mécanique pose un problème d'équilibrage à haute vitesse. Mécaniquement, il est impossible de faire coïncider exactement l'axe de rotation d'un palier avec l'axe d'inertie de la partie tournante. Il en résulte un balourd qui, même s'il est très faible, peut entraîner des vibrations importantes. L'utilisation de paliers magnétiques permet de s'affranchir de tels problèmes d'équilibrage car l'axe d'inertie peut s'aligner sur l'axe de rotation.

- **Domaine des atmosphères spécifiques ou du vide** : dans ce cas, il n'est absolument pas possible d'utiliser un gaz ou un lubrifiant pour permettre le fonctionnement d'un palier. Les roulements à billes lubrifiés ou les paliers hydrodynamiques sont donc prohibés.

- **Domaine dans lequel les frottements doivent être minimisés** : les frottements sont totalement inexistantes sur une suspension entièrement magnétique car il n'y a aucun contact entre les pièces mobiles et les pièces statiques. Cependant, des variations de champ vues par la pièce en rotation peuvent donner naissance à des pertes par courants induits et des pertes par hystérésis. La figure 7 montre la déformation des lignes de champ due aux courants induits dans un arbre en rotation [8]. Ces pertes, dues à la rotation, sont assimilables à des frottements fluides. Un palier magnétique ne possède par contre aucun frottement sec, ce qui élimine tous les phénomènes d'à-coups.

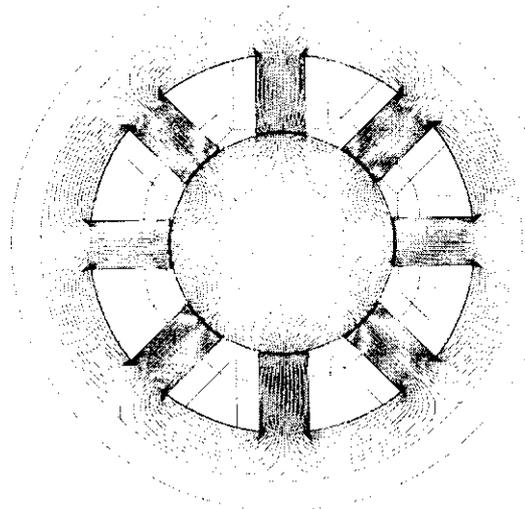


Figure 7a : Centreur magnétique – Arbre à l'arrêt

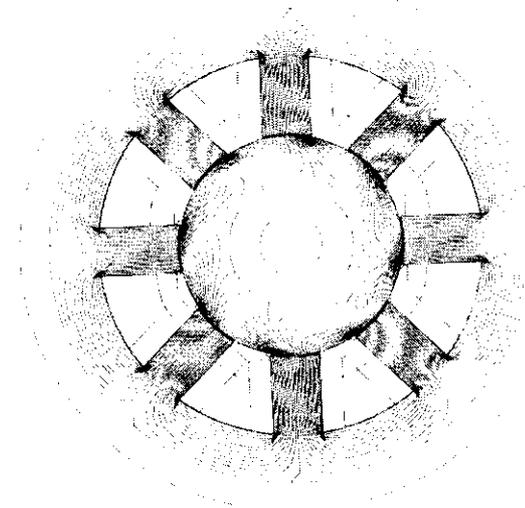


Figure 7b : Centreur magnétique – Arbre en rotation

- **Domaine dans lequel l'usure doit être minimisée** : comme il n'y a aucun contact entre la partie fixe et la partie mobile, la durée de vie du palier est illimitée (sauf accident). Cet avantage peut être appréciable dans un dispositif tel qu'un satellite où les paliers d'un système tournant ne peuvent être remplacés régulièrement. L'absence d'usure est aussi intéressante en atmosphère spécifique car elle n'engendre aucune poussière.

- **Domaine dans lequel une grande précision est requise** : un palier magnétique actif, contrôlé par un asservissement permet de positionner la partie mobile avec beaucoup de précision. Celle-ci dépend essentiellement de la qualité des capteurs utilisés et n'est donc pas sujette aux modifications des contraintes extérieures.

- **Domaine dans lequel la variation de température est importante** : une suspension magnétique, fabriquée avec des matériaux appropriés, est capable de fonctionner à des températures extrêmes. Elle peut ainsi être soumise à des températures basses, proches du zéro absolu ou bien être utilisée à des températures élevées en sortie de turbine.

### III Applications des suspensions magnétiques

Les suspensions magnétiques sont utilisées dans des domaines très différents. Elles peuvent supporter des pièces d'à peine quelques grammes telles que des disques de compteur électrique jusqu'à des machines de plusieurs tonnes telles que certains compresseurs. Les parties sustentées peuvent être immobiles (télescopes) ou soumises à des vitesses élevées (centrifugeuses, turbines...). Les principales applications sont les suivantes :

- **Le spatial** : Une partie des recherches effectuées dans le domaine des paliers magnétiques a été menée par des entreprises telles que l'Aérospatiale en France ou la NASA aux Etats-Unis. La principale application des suspensions magnétiques dans le spatial concerne la mise en œuvre des volants d'inertie permettant de stabiliser un satellite ou bien d'emmagasiner de l'énergie. Les paliers magnétiques sont aussi utilisés dans certains dispositifs de prise de vue.

- **L'usinage** : Les suspensions magnétiques permettent d'équiper des broches d'usinage et de faire tourner des outils de coupe (rectification et fraisage) à des vitesses de rotation difficilement accessibles avec des broches à roulements plus conventionnelles (Figure 8). De telles broches tournent à des vitesses allant de 15.000 à 150.000 tr/mn pour des puissances respectives de 50 kW à quelques centaines de Watt (source S2M). En dehors de leurs performances dans le domaine des vitesses élevées les paliers magnétiques apportent une grande précision en rotation lors de l'usinage.

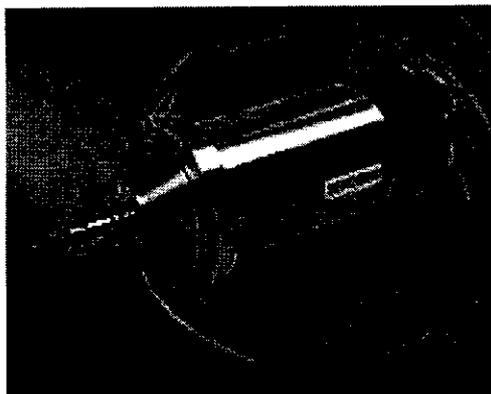


Figure 8 : Fraise sur paliers magnétiques (S2M)

- **Les turbocompresseurs** : Ce sont souvent des machines de grande puissance : il existe des

gammes de 2 MW à 20.000 tr/mn jusqu'à 25 MW à 7.000 tr/mn (source S2M). Ils sont utilisés dans l'industrie du gaz, en production, transport et stockage ainsi qu'en pétrochimie. Les paliers magnétiques actifs apportent une solution aux problèmes de vibration, d'alignement, de joint et de maintenance.

- **Les turboexpanders** : Ce sont des machines rapides permettant la détente des gaz. Ils sont utilisés dans des opérations de traitement, de refroidissement, de purification, de séparation ou de liquéfaction. Ces machines sont généralement puissantes et rapides : de 10.000 à 50.000 tr/mn et quelques centaines de KW ou plusieurs MW (source S2M).

- **Les pompes turbomoléculaires** : Elles permettent d'obtenir un vide très poussé grâce à une turbine tournant à grande vitesse (Figure 9). Le vide obtenu peut atteindre  $10^{-10}$  mbar. Les paliers magnétiques sont employés dans les pompes turbomoléculaires car il permettent d'atteindre des vitesses élevées (100.000 tr/mn) sans polluer l'atmosphère environnante avec un lubrifiant. La suspension peut être active ou partiellement passive : les deux solutions existent industriellement.

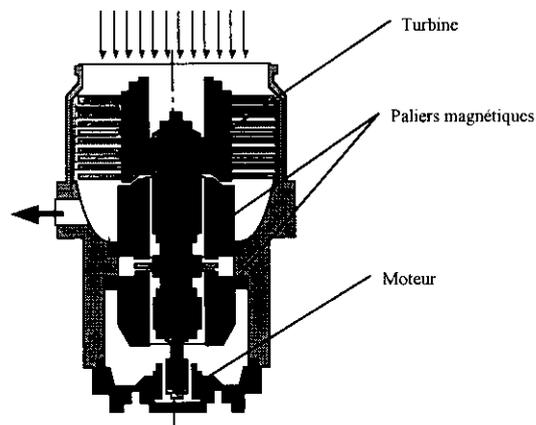


Figure 9 : Pompe turbomoléculaire sur suspension magnétique (d'après Alcatel DTV)

- **Les centrifugeuses** : Elles permettent grâce à leur vitesse de rotation extrêmement élevée de séparer des substances de densités différentes. Elles rendent possible l'enrichissement de l'uranium à un taux que peu d'autres méthodes peuvent atteindre. Là encore, l'intérêt du palier magnétique vient du fait qu'il permet d'atteindre des vitesses importantes tout en étant compatible avec le milieu environnant. Ce sont essentiellement des paliers passifs qui sont utilisés pour cette application.

- **Les "choppers" de particules** : Ils sont utilisés dans les Laboratoires de Physique pour filtrer des particules d'énergies différentes. Ils sont constitués d'un disque muni de fentes tournant à grande vitesse (Figure 10). Selon la largeur des fentes, l'épaisseur

du disque et la vitesse de rotation, le "chopper" ne laisse passer que des particules ayant une énergie donnée. Les particules trop lentes ou trop rapides sont déviées par les bords des fentes ou les autres disques.

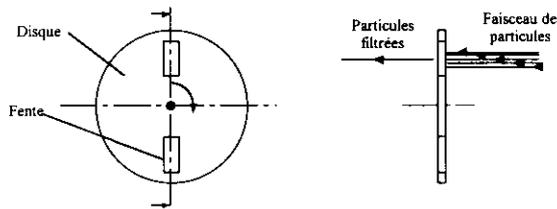


Figure 10 : Choppers de particules

- **Les volants d'inertie** : Ils permettent de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique (Figure 11). Ils sont constitués d'un rotor à grande inertie, d'un moteur et de paliers permettant la rotation à grande vitesse de l'ensemble. Le moteur permet d'accélérer ou de ralentir le rotor et donc de stocker ou restituer l'énergie. Les paliers doivent permettre la rotation de l'ensemble avec le moins de pertes possible et sans usure prématurée. Des sociétés américaines proposent des systèmes de stockage de ce type. Ce procédé est propre (pas de pollution chimique), à une grande durée de vie (pas d'usure) n'est pas sensible à la température, et permet dans certains cas d'offrir un coût inférieur à celui des batteries [10].

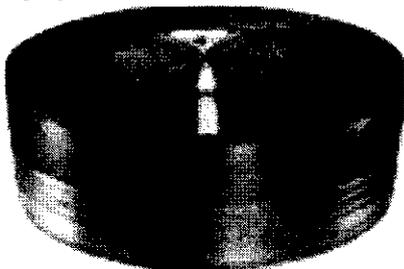


Figure 11 : Stockage d'énergie par volant d'inertie (Active Power)

#### IV Les différents types de palier magnétique

##### - Les suspensions magnétiques passives

Les paliers magnétiques passifs sont les plus simples à réaliser. Ils sont autonomes. Leur fonctionnement ne nécessite aucun apport d'énergie venant de l'extérieur, comme les paliers magnétiques actifs, ni un refroidissement comme les paliers supraconducteurs. Néanmoins ils ne peuvent être utilisés seuls pour des raisons de stabilité (voir les exemples ci-après). Les paliers magnétiques passifs doivent donc être associés à un système mécanique (roulement, palier hydrodynamique, butée à aiguille...) ou à autre type de palier magnétique. Les paliers magnétiques passifs sont de deux types : les paliers à aimants permanents et les paliers à réluctance variable.

##### a) Les paliers à aimants permanents

Ils sont constitués au minimum de deux bagues d'aimant permanent en interaction, l'une des bagues étant fixe tandis que l'autre est solidaire du rotor. En fonction des directions d'aimantation des deux bagues il est possible d'obtenir, avec la même géométrie, soit un centreur, soit une butée. Dans le cas de la figure 12, si la bague intérieure se décale radialement, la bague extérieure la repousse vers le centre, il s'agit donc d'un centreur.

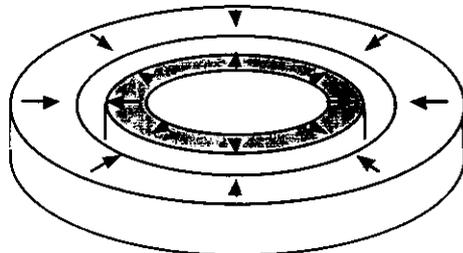


Figure 12 : Centreur à aimant permanent

Dans le cas de la figure 13, si la bague intérieure se décale axialement, la bague extérieure la rappelle dans son plan de symétrie. Il s'agit donc d'une butée.

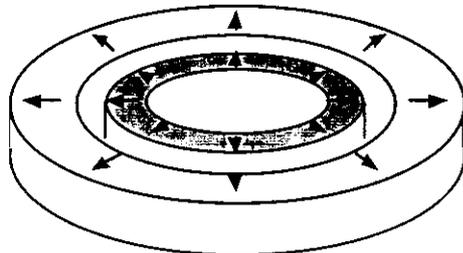


Figure 13 : Butée à aimant permanent

On peut néanmoins mettre en évidence des problèmes d'instabilité liés à ces paliers. Si dans le cas de la butée, la bague intérieure s'éloigne radialement, elle est violemment attirée par la bague extérieure. La butée est donc instable radialement. Inversement, dans le cas du centreur, si la bague intérieure est déplacée axialement, elle sera éjectée par la bague extérieure. Le centreur est donc instable axialement. De même, lorsque la bague intérieure du centreur est décalée angulairement, la bague extérieure exerce des forces qui tendent à créer une rotation plus importante. Le centreur est donc aussi instable angulairement (Figure 14).

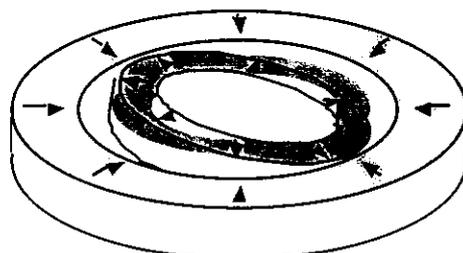


Figure 14 : Instabilité angulaire d'un centreur

En conclusion, nous pouvons retenir la simplicité de réalisation d'un centreur passif et d'une butée passive. Néanmoins, leur utilisation est rendue délicate par les différentes instabilités qui peuvent survenir. Rappelons qu'une stabilité complète est impossible à obtenir avec ce type de paliers.

*b) Les paliers à réductance variable*

Là aussi, on a affaire à des systèmes passifs. Ils n'ont par conséquent besoin d'aucune source d'énergie extérieure pour fonctionner. Bien qu'ils puissent comporter des aimants, ces paliers ne fonctionnent pas sur un principe d'interaction directe entre aimants. Ils sont composés de deux circuits magnétiques séparés. L'un des circuits est lié au rotor tandis que l'autre est fixé au stator (Figure 15).

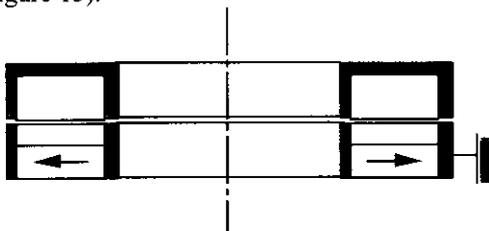


Figure 15 : Centreur à réductance variable

Les circuits magnétiques sont composés de dents en vis-à-vis. La moitié de ces dents est placée sur la partie statique du palier tandis que l'autre l'est sur la partie mobile. Une différence de potentiel magnétique est créée entre ces dents soit par une bobine soit par un aimant. Cette différence de potentiel magnétique crée un flux qui circule entre les dents. Ce flux engendre une pression qui tend à rapprocher les dents. Lorsque l'on décale latéralement ces dernières l'une par rapport à l'autre, on observe dans le même temps, un allongement des lignes de champ et donc une variation de l'énergie du système. Les dents cherchent alors à se réaligner afin de minimiser cette énergie.

Sur une butée à réductance variable, les dents doivent être disposées de façon à s'opposer à un déplacement axial du centreur (Figure 16).

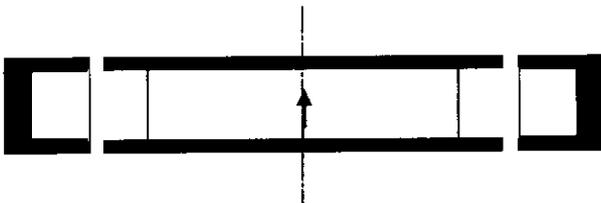


Figure 16 : Butée à réductance variable

Cette butée assure donc la stabilité axiale mais est instable latéralement.

**- Les paliers actifs**

Les paliers actifs sont des électroaimants dont le courant est asservi pour maintenir la partie mobile du circuit magnétique dans une position fixée. Ils ont besoin d'un apport d'énergie pour fonctionner. Pour alimenter chacun des actionneurs constituant un palier actif, il faut une alimentation de puissance, une commande et un capteur de position. L'exemple le plus simple est celui de la butée active (Figure 17).

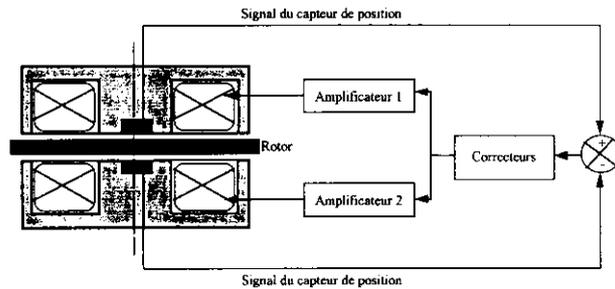


Figure 17 : Principe d'une butée active

Nous remarquons la nécessité de mettre en œuvre deux électroaimants pour constituer une butée. Cela s'explique par le fait qu'un électroaimant ne peut exercer que des forces d'attraction. Pour asservir un axe, soit 2 directions, il faut donc 2 actionneurs. Grâce aux asservissements, la position peut être réglée avec une grande précision. Les limitations sont dues aux capteurs, aux saturations (des matériaux ou de la puissance) et à la dynamique de l'asservissement.

Pour pouvoir obtenir une suspension complète, il faut associer deux centreurs et une butée. Chaque centreur est constitué de quatre actionneurs et asservit deux axes de liberté (figure 18).

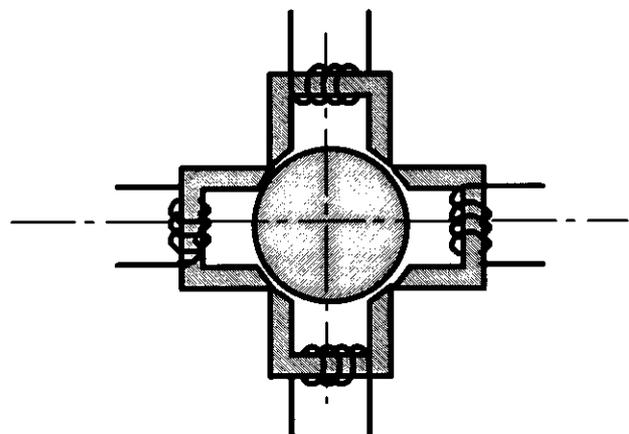


Figure 18 : Centreur actif

Les paliers actifs sont à priori applicables à tout type de système mécanique à condition d'être correctement dimensionnés. Par contre, si leur structure est simple dans le principe (pas d'instabilité puisque correctement asservis), leur

mise en œuvre est assez lourde. Une suspension complète nécessite le contrôle de cinq axes de liberté, donc de dix directions. Cela peut entraîner la mise en œuvre de dix actionneurs, dix capteurs, dix amplificateurs de puissance et cinq commandes reliées entre elles pour tenir compte des couplages mécaniques.

La pression magnétique dans un électroaimant est proportionnelle au carré de l'induction. Avec 1 Tesla, il est possible d'obtenir une pression magnétique de 4 bars ( $1/8 < 10^{-7} \text{ N/m}^2$ ). Une pression de 10 bars est obtenue sous une induction de 1,6 T et 20 bars sous 2,2 T. Une induction de 1,6 T est obtenue facilement avec des matériaux ferromagnétiques courants. Pour atteindre 2,2 T il est nécessaire d'utiliser du fer-cobalt dont l'aimantation à saturation dépasse légèrement 2,4 T. Grâce à ces pressions importantes, les systèmes actifs peuvent supporter de très fortes contraintes. C'est la raison pour laquelle certaines machines de plusieurs tonnes utilisées dans l'industrie lourde (par exemple des compresseurs) sont équipées de paliers actifs. Pour ce type d'application aucun palier magnétique passif ne peut prétendre remplacer le palier actif.

### V Exemple de suspension magnétique

La suspension présentée est une suspension partiellement passive. Sa longueur totale est de 25 cm et son diamètre de 7 cm. Elle est constituée d'un rotor cylindrique dont les deux extrémités sont attirées par des électroaimants (Figure 19a).

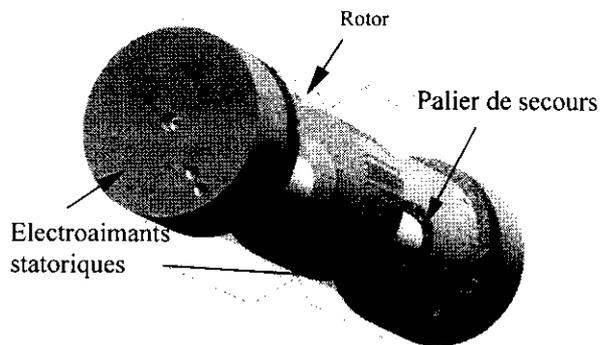


Figure 19a : Suspension complète

Ces électroaimants sont asservis afin de positionner axialement le rotor. Le centrage et la position angulaire de la partie suspendue sont assurés par les dents de l'électroaimant (Figure 19 b et c). Un aimant aux terres rares possédant une polarisation rémanente de 1,1 Tesla engendre un champ permanent dans l'électroaimant. Le centrage par réluctance est donc assuré même si les bobines ne sont pas alimentées. Cette configuration permet un fonctionnement stable et sans contact grâce à un contrôle axial unique. Elle

nécessite donc un seul capteur, un seul correcteur, et un seul amplificateur.

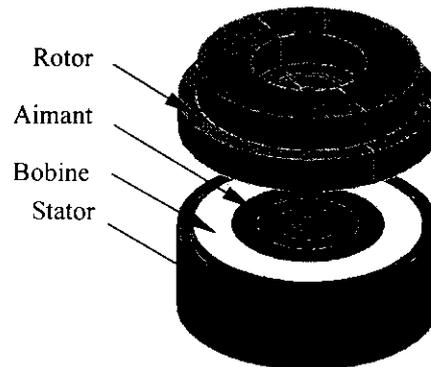


Figure 19b : Détails d'un électroaimant

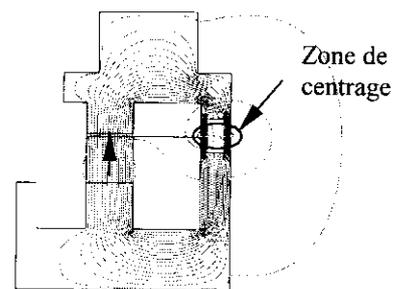


Figure 19c : Lignes de champ dans l'électroaimant

De plus, grâce à la polarisation fournie par les aimants, l'actionneur est parfaitement linéaire et bidirectionnel (Figure 20). Pour arriver à ce résultat, si la bobine du premier électroaimant vient renforcer le champ de l'aimant, la bobine du second le diminue. Les deux bobines sont traversées par le même courant et alimentées par le même amplificateur. La justification théorique de la linéarité obtenue est la suivante :

$$- \text{ la force dans un électroaimant s'écrit : } F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$$

où  $B$  est l'induction dans l'entrefer et  $S$  la surface de l'entrefer,

- En position centrée, la force totale exercée par les électroaimants sur le rotor s'écrit donc :

$$F_t = \frac{S}{2\mu_0} \left[ (B_a + B_i)^2 - (B_a - B_i)^2 \right]$$

$B_a$  est l'induction dans l'entrefer due à l'aimant et  $B_i$  est l'induction dans l'entrefer due à la bobine,

$$- \text{ après simplification : } F_t = \frac{2S}{\mu_0} B_a B_i.$$

$B_i$  est une image du courant. La force est donc totalement proportionnelle au courant, comme le prouvent les simulations numériques réalisées avec le logiciel FLUX2D (Figure 20).

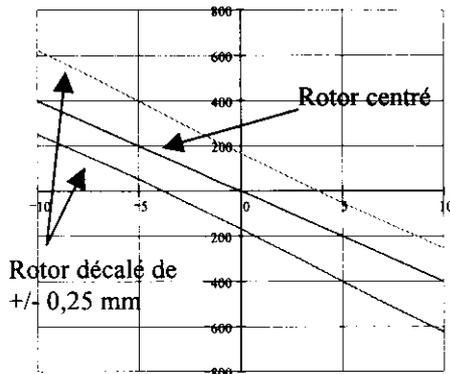


Figure 20 : Forces (N) en fonction de la densité de courant dans la bobine ( $A/mm^2$ )

Avec une butée plus traditionnelle telle que celle décrite sur figure 16, il est nécessaire d'utiliser deux amplificateurs : l'un pour exercer une force dans un sens et l'autre pour exercer la force dans l'autre sens. De plus, un électroaimant non polarisé est fortement non linéaire car les forces exercées dépendent du carré du courant. L'asservissement doit alors être lui aussi non linéaire et l'utilisation d'un calculateur numérique est recommandé.

Dans notre cas, le correcteur est plus simple à réaliser. Voici le calcul d'un correcteur à avance de phase dans un cas idéal :

- l'électroaimant possède un temps de réponse nul,
- le capteur de position est parfait ( $g_c = 10 \text{ mV}/\mu\text{m}$ ),
- l'amplificateur de courant qui alimente les bobines est parfait ( $1 \text{ A/V}$ ),
- 1 ampère dans l'amplificateur de courant engendre  $1 \text{ A}/\text{mm}^2$  dans la bobine.

Pour calculer la fonction de transfert d'un palier, la démarche habituelle consiste à linéariser ses caractéristiques autour d'un point de fonctionnement. Dans notre cas cette linéarisation est naturelle. La force exercée sur le rotor s'écrit :

$$F_t = kx + \alpha I$$

Avec

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = 0.7 \cdot 10^6 \text{ N/m},$$

$$\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta I} = 40 \text{ N/A},$$

$x$  correspond au déplacement axial par rapport à la position centrée.

Le principe fondamental de la dynamique permet d'écrire :

$$F_t = kx + \alpha I = mx'' \text{ avec } m \text{ la masse du rotor (1 kg)}$$

En utilisant la transformée de Laplace, la fonction de transfert se met sous la forme :

$$\frac{x}{I} = -\frac{\alpha}{k} \frac{1}{1 - \frac{m}{k} p^2} = -\frac{\alpha}{k} \frac{1}{(1 + \tau p)(1 - \tau p)} \quad \left( \tau = \sqrt{\frac{m}{k}} \right)$$

On remarque que cette fonction de transfert a une phase constante de  $180^\circ$ . On la diminue par le correcteur à avance de phase :

$$C(p) = K \frac{1 + \tau p}{1 + \tau_2 p}$$

Afin de simplifier les calculs, la constante de temps du numérateur a été choisie égale à celle de la fonction de transfert du palier (compensation de pôle). La fonction de transfert en boucle ouverte, incluant le capteur, le correcteur, l'amplificateur et le palier s'écrit alors :

$$H_{BO} = -\lambda \frac{1}{(1 + \tau_2 p)(1 - \tau p)}$$

$$\text{avec } \lambda = K \frac{\alpha}{k} g_c$$

En boucle fermée on obtient :

$$H_{BF} = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{1}{1 + \frac{\tau - \tau_2}{\lambda - 1} p + \frac{\tau \tau_2}{\lambda - 1} p^2}$$

Cette fonction est du second ordre et est stable si :

$$\lambda > 1 \text{ et } \tau > \tau_2.$$

En choisissant un coefficient d'amortissement de 1

et  $\tau_2 = \frac{\tau}{10}$ , on obtient  $\lambda = 9,1$ . On en déduit

$$K = 9,1 \frac{k}{\alpha g_c}.$$

A.N.:  $K=16$ ,  $\tau = 1,2 \text{ ms}$  et  $\tau_2 = 0,12 \text{ ms}$

D'autres correcteurs permettent de stabiliser un palier. Il est tout à fait possible d'utiliser un PID, qui permet d'obtenir une erreur statique nulle, ou même de stabiliser le palier par un correcteur lui-même instable.

## VI Références :

- [1] <http://sentenext1.epfl.ch/swissmetro/>
- [2] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020717914000111>
- [3] S. Earnshaw, "On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether", Trans. Camb. Phil. Soc., 7, pp 97-112 (1842)
- [4] P. Tixador, P. Hiebel, Y. Brunet, X. Chaud, P. Gautier-Picard, "Hybrid superconducting magnetic suspensions", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, pp. 2578-2581, 1996.
- [5] <http://www.rtri.or.jp/>
- [6] <http://www-hfml.sci.kun.nl/hfml/levitate.html>
- [7] <http://www.palais-decouverte.fr/html/magnetis.html>
- [8] <http://www.levitron.com/>
- [9] <http://www.s2m.fr/index.html>
- [10] P.E. Allaire, R. Rockwell, M.E.F. Kasarda, "Magnetic and electric field equations for magnetic bearing application", pp 259-270 MAG'95
- [11] <http://www.activepower.com/apFrames.html>

# Calcul rationnel des circuits magnétiques comportant des aimants

D. MATT, Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5.

## I - Introduction.

Cet article a pour objet la description de quelques règles très pragmatiques de calcul des circuits magnétiques dans lesquels le champ est produit par un aimant permanent. Nous nous efforcerons, en particulier, de mettre en évidence les principes fondamentaux qui régissent le fonctionnement des matériaux magnétiques à forte rémanence, utilisés couramment aujourd'hui. Nous en profiterons pour « tordre le cou » (modestement) à certaines légendes qui ont bien trop souvent cours, encore actuellement, à tous les niveaux.

L'approche qui est faite est essentiellement basée sur les équations macroscopiques de fonctionnement, (courbes  $B(H)$ ), nous ne ferons que très peu référence aux modèles microscopiques, plus ou moins précis, en vigueur.

Pour illustrer les principes, nous rapprocherons nos calculs d'une application assez caractéristique, pour laquelle se pose l'essentiel des problèmes de fonctionnement des aimants : le dimensionnement de l'inducteur d'une machine synchrone à aimants dite « à concentration de flux ». Nous reviendrons sur ce dernier terme.

## II - Définition. L'aimantation d'un matériau magnétique.

La caractéristique d'aimantation, c'est à dire l'évolution de l'induction,  $B$ , en fonction du champ d'excitation,  $H$ , de tout matériau magnétique, peut se mettre sous la forme suivante (nous raisonnons sur des scalaires) :

$$B = \mu_0 H + \mathcal{I}_H, \quad (1)$$

où  $\mathcal{I}_H$  représente la polarisation magnétique qui apparaît dans le matériau soumis au champ  $H$ , soit la contribution de ce même matériau à la création de  $B$ . Le nom donné à la grandeur  $\mathcal{I}$  est variable suivant les auteurs, nous l'appellerons, par commodité, aimantation.

Le processus d'aimantation intégrale d'un matériau pour aimant consiste à appliquer un champ  $H$  dont l'intensité, très élevée dans l'absolu, peut atteindre plusieurs milliers de kA/m pour les matériaux présentant les meilleurs niveaux de performance (cf. plus avant).

Nous nous intéressons principalement au résultat obtenu après cette phase de fabrication. Il faut alors d'emblée noter que, avec les matériaux modernes, l'aimantation  $\mathcal{I}$  peut être considérée, en première approximation, comme une constante, et ceci quel que soit le mode d'utilisation de l'aimant. Isoler l'aimant en démontant, par exemple, une machine n'a absolument aucune incidence sur le niveau d'aimantation, même si, par ailleurs, il apparaît dans le matériau un champ de nature démagnétisante comme nous le verrons.

Les courbes caractéristiques obtenues ont alors la forme qui apparaît sur la figure 1. Il est ici plus intéressant de les représenter dans un plan  $B(\mu_0 H)$  que dans le classique plan  $B(H)$ , car la courbe d'induction dans l'aimant,  $B_a$ , y apparaît sous la forme d'une droite de pente unitaire, conformément à ce qui est donné par (1). Cette pente est, bien entendu, assimilable à la perméabilité relative,  $\mu_r$ , du matériau aimanté, qui se comporte alors, abstraction faite de la rémanence, exactement (par rapport aux variations d'induction) comme s'il était non magnétique.

Nous ne représentons que le deuxième quadrant dans la mesure où le point de fonctionnement a toutes les chances de s'y trouver (la justification de ceci est donnée plus loin).

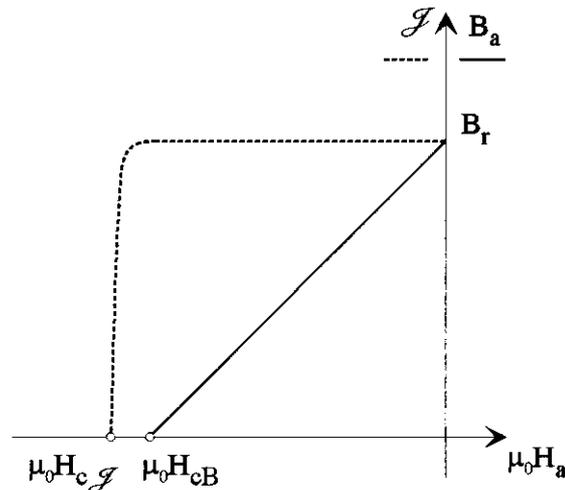


Fig. 1 - Caractéristique de désaimantation idéalisée.

L'ordonnée à l'origine,  $B_r$ , représente l'induction rémanente obtenue à l'issue de la phase d'aimantation.

La courbe de  $B_a$  croise l'axe des abscisses au point  $\mu_0 H_{cB}$ . Le champ  $H_{cB}$  est le champ coercitif d'induction ( $B_a=0$ ). Cette valeur ne possède pas un caractère significatif pour l'aimant, nous obtenons simplement, du fait de la pente unitaire :

$$\mu_0 H_{cB} = - B_r \quad (2)$$

La courbe de l'aimantation,  $\mathcal{J}$ , est d'abord horizontale, l'aimantation est insensible au champ  $H_a$ . Le comportement de l'aimant dans cette zone, complètement conforme à (1), est parfaitement linéaire et, par conséquent, strictement réversible.

A partir d'un niveau d'excitation très élevé (jusqu'à 2000 kA/m),  $\mathcal{J}$  décroît très rapidement. La pente raide est caractéristique d'un phénomène de désaimantation irréversible : l'aimant perd ses propriétés « normales » à l'issue d'un événement qui doit être considéré comme accidentel et destructeur. La courbe d'induction est affectée, l'aimant doit en principe être réaimanté.

La courbe de  $\mathcal{J}$  croise l'axe des abscisses au point  $\mu_0 H_{c\mathcal{J}}$ . Le champ  $H_{c\mathcal{J}}$  est le champ coercitif d'aimantation ( $\mathcal{J}=0$ ). Cette valeur, contrairement à  $H_{cB}$ , est typique de la tenue au champ démagnétisant de l'aimant. Le fonctionnement en régime linéaire est garanti si :

$$H_a < H_{c\mathcal{J}} \quad (3)$$

en conservant une marge de sécurité puisque la désaimantation irréversible intervient un peu plus tôt.

**Remarque :** les courbes de la figure 1 sont (un peu) idéalisées. En pratique, l'aimantation décroît, au début, très légèrement avec le champ, de façon parfaitement réversible. La courbe de fonctionnement est alors conforme à :

$$B_a = \mu_0(1 + \chi_r).H_a + B_r, \quad (4)$$

où le coefficient  $\chi_r$ , appelé susceptibilité relative, a pour ordre de grandeur  $10^{-2}$ . L'erreur commise en utilisant un modèle tel que celui de la figure 1, qui n'est que de quelques pour-cent, est masquée par toutes les autres approximations qui sont faites (dispersions des caractéristiques, influence de la température, flux de fuite ...).

### III - Principales propriétés des matériaux usuels pour aimants.

Avant de préciser les modes opératoires de calcul, il est important de fixer quelques ordres de grandeur concernant les performances des différents matériaux susceptibles d'être utilisés. Elles apparaissent dans le tableau suivant. Nous avons choisi de les classer par famille, en précisant pour chacune d'elle une fourchette de valeurs typiques.

Famille → Propriétés ↓	AlNiCo ①	Ferrites ②	Samarium-Cobalt ③	Fer-Neodyme-Bore ④
Composition	aluminium, nickel, cobalt, fer, cuivre ...	oxyde de fer et de baryum ou strontium	Samarium, cobalt, fer, cuivre ...	néodyme, fer, bore
Date (≈)	1932	1950	1966	1986
$B_r$ (T)	1-1,3	0,3-0,4	0,8-1	1-1,2
$H_{c\mathcal{F}}$ (kA/m)	50-100	200-300	500-1500	1000-2000
$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	50	30	200	250
Temp. max util. (°C)	500	300	300	175
Influence temp. - sur $B_r$ - sur $H_{c\mathcal{F}}$	Pas d'influence Pas d'influence	Négative (--) Positive (+)	Peu d'influence Peu d'influence	Négative (--) Négative (--)
Commentaires	Matériau atypique. Peu utilisé. Très faible tenue au champ démagnétisant	Bon marché. Le plus utilisé.	Onéreux (coût du cobalt)	Onéreux (brevets)

En plus des propriétés magnétiques que nous avons déjà précisées, nous faisons apparaître le produit d'énergie ( $BH_{max}$ ), lié au volume d'aimant à utiliser pour réaliser une fonction donnée. Cette notion fera l'objet d'un développement détaillé.

Les courbes de désaimantation, pour les différentes familles représentées dans le tableau, sont données sur la figure 2.

Le plus ancien des matériaux modernes, appelé couramment Alnico, a un comportement complètement atypique par rapport aux notions fondamentales présentées au paragraphe II. C'est le seul des matériaux usuels pour lequel il n'est pas possible d'assimiler l'aimantation,  $\mathcal{F}$ , à une constante. Il en résulte que sa courbe de désaimantation n'est pas une droite. Les conditions d'utilisation d'un tel matériau sont très spécifiques, nous ne les précisons pas.

Le marché des Alnico est devenu pratiquement inexistant, les autres matériaux présentant, globalement, des caractéristiques plus intéressantes.

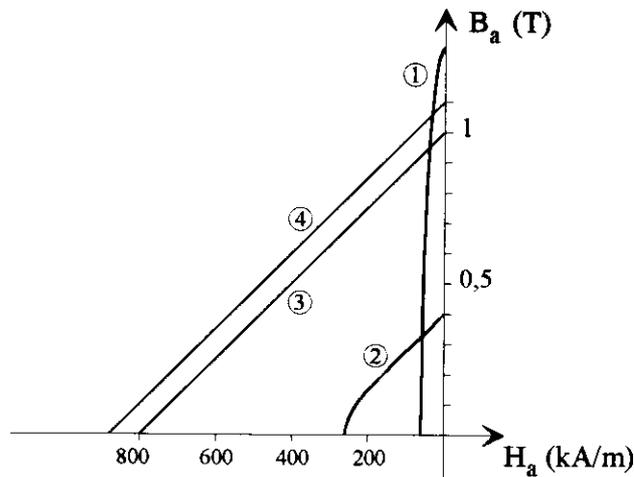


Fig. 2 - Courbes  $B_a(H_a)$  des différents matériaux

Sur la courbe ② apparaît, aussi, une portion non linéaire, qui correspond à une diminution, irréversible, de  $\mathcal{F}$ . L'aimant ne doit pas, normalement, être utilisé dans cette zone. Le système qui l'utilise devra être conçu en conséquence. Le critère (3) doit être vérifié.

Le phénomène irréversible est susceptible d'apparaître pour les autres familles (③ et ④), mais pour des niveaux de champ,  $H_a$ , très élevés, pratiquement impossibles à atteindre. Sur les courbes de la figure 2, la désaimantation (non représentée) interviendrait dans le troisième quadrant.

Nous indiquons aussi l'influence de la température, qui peut être importante selon la nature de l'aimant. L'augmentation de la température se traduit, pour tous les matériaux, par une diminution réversible de l'aimantation. Les ferrites y sont très sensibles, les samarium-cobalt beaucoup moins. Le champ coercitif,  $H_{c\mathcal{F}}$  diminue aussi avec l'augmentation de température, sauf pour les ferrites pour lesquelles on observe un effet inverse.

#### **IV - Principes de calcul.**

##### 1) Description du problème :

Le calcul d'un circuit magnétique comportant des aimants s'effectue à partir de la courbe  $B_a(H_a)$  caractéristique de l'aimant, présentée aux paragraphes précédents, et des caractéristiques géométriques du circuit.

Le calcul d'un inducteur de moteur synchrone constitue un bon exemple d'application. La machine considérée est représentée sur la figure 3. La disposition des aimants, placés radialement au sein du circuit magnétique du rotor, est particulière, elle permet d'obtenir un niveau d'induction dans l'entrefer supérieur à l'aimantation,  $\mathcal{F}$ , des aimants. Il est d'usage, dans ce cas de figure, d'évoquer le terme de « concentration de flux ». Le principe consiste à faire en sorte que la section de passage du flux magnétique soit plus importante dans l'aimant que dans l'entrefer.

Nous nous limitons strictement au calcul du champ créé par les aimants. Le motif élémentaire, à la base du raisonnement, extrait du schéma précédent, est donné sur la figure 4. Les encoches sont supposées très fermées, l'entrefer considéré est lisse.

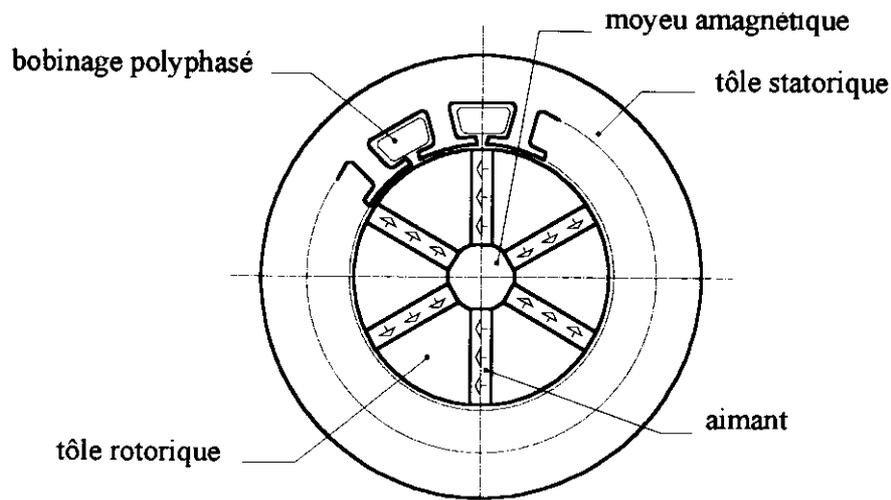


Fig. 3 - Machine synchrone à concentration de flux.

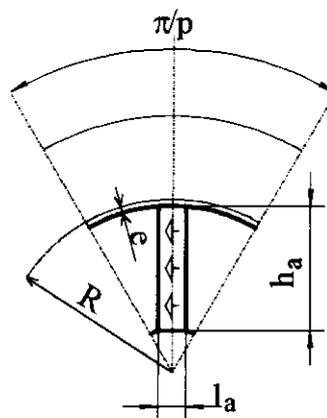


Fig. 4 - Détail de l'inducteur.

Les dimensions du motif de la machine à  $p$  paires de pôles sont les suivantes :

- arc polaire (rd) :  $\pi/p$
- rayon d'alésage :  $R$
- entrefer :  $e$
- épaisseur de l'aimant :  $l_a$
- hauteur de l'aimant :  $h_a$
- profondeur du motif :  $L$

la dernière dimension correspond à la longueur du paquet de tôles rotorique, perpendiculaire au plan de la figure.

Pour simplifier les notations et généraliser les résultats à tout dispositif similaire, nous pouvons raisonner sur un circuit magnétique équivalent, tel que celui de la figure 5. Les dimensions  $S_a$ ,  $S_e$ ,  $l_a$  et  $l_e$  représentent respectivement la section de passage du flux dans l'aimant, la section de passage du flux dans l'entrefer, l'épaisseur de l'aimant et l'épaisseur de l'entrefer. Le sens de l'aimantation,  $\mathcal{H}$  dans l'aimant est matérialisé par des flèches.

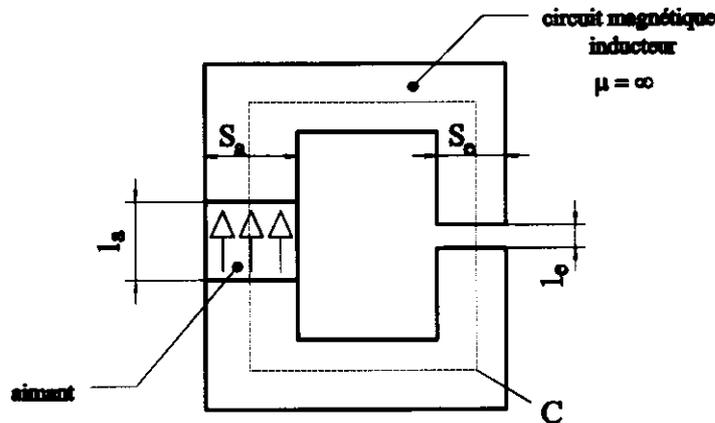


Fig. 5 - Circuit magnétique équivalent.

Nous nous ramenons à l'inducteur du moteur synchrone par l'intermédiaire des relations suivantes :

$$S_a = h_a \cdot L$$

$$S_e \approx (\pi/2p - l_a/2R) \cdot R \cdot L$$

$$l_e = 2e$$

#### Hypothèses et conventions :

- les armatures du circuit magnétiques sont supposées infiniment perméables,
- tous les champs magnétiques sont colinéaires au contour C, ils sont traités comme des grandeurs scalaires,
- le sens positif des champs est le sens de l'aimantation.

#### 2) La droite de charge de l'aimant.

A partir du théorème d'Ampère appliqué au contour C, nous obtenons :

$$H_a \cdot l_a + H_e \cdot l_e = 0, \quad (5)$$

le champ d'excitation étant nul dans l'armature infiniment perméable. Le champ,  $H_e$ , créé dans l'entrefer grâce à l'aimantation,  $\mathcal{I}$ , est nécessairement dans le même sens que cette aimantation.

La relation (5), que nous pouvons mettre sous la forme :

$$H_a = \frac{-H_e \cdot l_e}{l_a},$$

contient déjà une information importante : le champ  $H_a$  dans l'aimant est de signe opposé au champ  $H_e$  (positif) dans l'entrefer, donc le champ  $H_a$  (négatif) est démagnétisant pour l'aimant (l'induction  $B_a$  diminue).

Le point de fonctionnement de l'aimant est ainsi situé dans le deuxième quadrant du plan  $B_a(H_a)$ . La démagnétisation est d'autant plus importante que la dimension,  $l_e$ , de l'entrefer, est élevée. Dans le cas d'utilisation des matériaux ②③④ (cf. §III), ce champ ne sera jamais suffisamment élevé (quelle que soit  $l_e$ ) pour affecter, de manière irréversible, la valeur de  $\mathcal{I}$ .

La loi de conservation du flux nous donne :

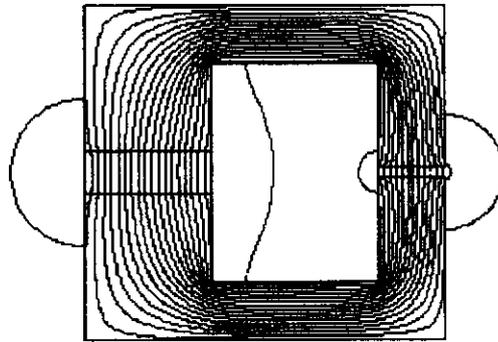
$$\Phi_a = \Phi_f + \Phi_e, \quad (6)$$

où  $\Phi_a, \Phi_f$  et  $\Phi_e$  représentent respectivement le flux d'induction dans l'aimant, le flux de fuite et le flux dans l'entrefer. Le flux de fuite, par définition, est la part de flux produit par l'aimant qui ne traverse pas la surface utile soit, ici, l'entrefer.

Le flux de fuite quittant le circuit magnétique principal, dépend, de façon complexe, de la géométrie du dispositif. En pratique, il ne peut pas être calculé analytiquement. La figure 6 permet d'illustrer le phénomène. Une partie des lignes de champ se referment localement autour de l'aimant. Le tracé est obtenu à l'aide d'un logiciel de calcul numérique par éléments finis, seul outil capable de chiffrer avec précision le problème.

La figure 6 n'est pas représentative du niveau de fuite dans la machine synchrone. De ce point de vue, la géométrie est différente. Toutefois elle nous permet de donner quelques ordres de grandeur.

Dans l'exemple calculé, l'aimant a une épaisseur,  $l_a$ , de 5 mm. Avec un entrefer,  $l_e$ , égal à 1 mm, le flux de fuite est égal à 17% du flux produit par l'aimant, ce chiffre passe à 8% si l'entrefer est ramené à 0,5 mm.



Ech. 1

Fig. 6 - Fuites dans un circuit magnétique. Calcul numérique de champ.

Partant de ce constat, nous négligeons dorénavant le phénomène fuite pour ne pas alourdir les raisonnements qui suivent. Nous précisons toutefois, dans la mesure du possible, les limites de ces raisonnements.

En explicitant la relation (6) nous obtenons :

$$B_a \cdot S_a = B_e \cdot S_e, \quad (7)$$

avec  $B_e = \mu_0 H_e$ . En combinant (5) et (7), nous obtenons l'expression :

$$B_a = -\frac{S_e \cdot l_a}{S_a \cdot l_e} \cdot \mu_0 H_a, \quad (8)$$

qui représente le lieu des points de fonctionnement de l'aimant, indépendamment de la caractéristique du matériau. Il s'agit de la droite de charge de l'aimant, de pente  $-S_e \cdot l_a / S_a \cdot l_e$  dans le plan  $B_a(\mu_0 H_a)$ .

### 3) Point de fonctionnement.

Le point de fonctionnement est donné par l'intersection de la droite de charge avec la caractéristique du matériau, conformément à ce qui apparaît sur la figure 7.

Le niveau d'induction dans l'aimant est d'autant plus faible que l'entrefer est important. Il ne tend toutefois pas vers zéro lorsque  $l_e$  croît, le calcul n'étant plus juste dans ce cas à cause des fuites.

Le point de fonctionnement de l'aimant peut être choisi en jouant sur les dimensions  $S_a$  et  $l_a$ , indépendamment de ce que l'on souhaite obtenir dans l'entrefer. Ce choix a toutefois une incidence importante sur le volume d'aimant à mettre en œuvre, comme nous allons le voir.

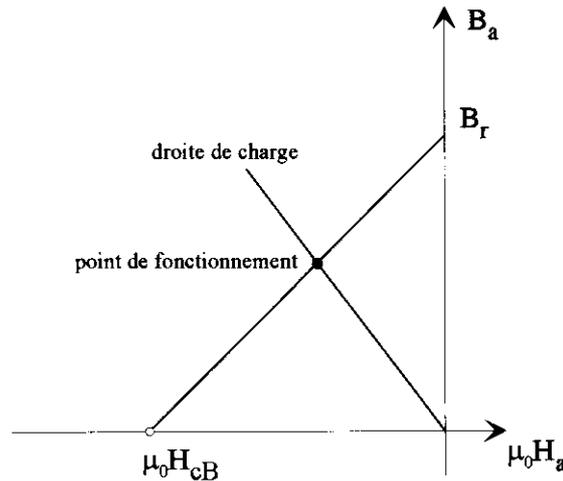


Fig. 7 - Point de fonctionnement.

### 4) Critère d'Evershed.

L'énergie électromagnétique,  $W_e$ , contenue dans l'entrefer, est égale à :

$$W_e = \frac{1}{2} \mu_0 H_e^2 S_e l_e \quad (9)$$

Toujours en partant des équations (5) et (7), nous pouvons l'exprimer en fonction des champs dans l'aimant :

$$B_a H_a S_a l_a = -2W_e \quad (10)$$

Le produit  $S_a l_a$  représentant le volume d'aimant à utiliser pour obtenir la quantité  $W_e$  voulue.

Ainsi, le volume d'aimant est d'autant plus faible que le produit  $B_a H_a$  lié au point de fonctionnement de l'aimant est élevé. C'est le critère d'Evershed, qui permet d'optimiser le coût du dispositif. Le produit  $BH_{\max}$  qui apparaît dans le tableau du paragraphe III, représente donc la capacité de l'aimant à produire un champ de niveau donné avec plus ou moins de matière.

Si nous considérons les courbes de la figure 7, le point de fonctionnement optimal, selon le critère d'Evershed, est obtenu lorsque  $B_a = \mu_0 H_a$ , puisque la courbe de désaimantation est linéaire. La pente de la droite de charge doit donc être égale à -1.

En d'autre terme, il faut faire travailler l'aimant de façon à obtenir :

$$\left. \begin{aligned} B_a &= \frac{1}{2} B_r \\ \mu_0 H_a &= -\frac{1}{2} B_r \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ce critère est surtout intéressant pour les aimants des familles ③ et ④, très onéreux, par contre, il peut être plus difficile à mettre en œuvre pour les aimants ferrite dans la mesure où il oblige à fonctionner avec un champ démagnétisant initialement grand, soit, pour l'ordre de grandeur, environ 160 kA/m avec  $B_r = 0,4$  T. L'adjonction d'un courant pourrait alors provoquer une désaimantation irréversible.

Nous pouvons effectuer maintenant une application numérique à partir de l'inducteur.

Les données de départ sont, par exemple, les suivantes :  $R = 25$  mm,  $L = 20$  mm,  $e = 0,3$ ,  $p = 4$ . Nous souhaitons obtenir 1,2 T sous les pôles, à l'aide d'un aimant aimanté à 1 T (p.e. Samarium-Cobalt). L'aimant doit fonctionner au critère d'Evershed.

D'après (7), nous avons  $S_a/S_e = B_e/B_a$ , avec  $B_a = 0,5T$  ( $B_r/2$ ), soit  $S_a/S_e = 2,4$ .

D'après (8), nous avons  $S_e.l_a/S_a.l_e = 1$  (droite de charge de pente -1), soit  $l_a = S_a.l_e/S_e$ . L'entrefer,  $l_e$ , vaut  $2 \times 0,3$ , nous déduisons alors la valeur de l'épaisseur d'aimant :

$$l_a = 2,4 \times 0,6 = 1,44 \text{ mm.}$$

Sachant que la section de passage du flux sous un pôle,  $S_e$ , est approximativement égale à  $(\pi/2p - l_a/2R).R.L$ , soit environ 182 mm<sup>2</sup>, nous pouvons calculer la hauteur,  $h_a$ , de l'aimant :

$$h_a = S_a/L = 2,4 \times S_e/L = 21,8 \text{ mm.}$$

Le dessin de la configuration obtenue permettrait de vérifier que les dimensions sont cohérentes, mais à la limite du réalisable (les logements des aimants sont très proches les uns des autres au rayon le plus faible).

Cette démarche simpliste n'est qu'un exemple, elle ne vise pas à optimiser l'inducteur. Une première approche concernant l'optimisation est donnée dans la référence bibliographique [1].

##### 5) Influence de l'entrefer.

En combinant (1), (5) et (7), nous pouvons exprimer l'induction dans l'entrefer,  $B_e$ , en fonction de  $\mathcal{F}$  et des paramètres géométriques :

$$B_e = \frac{\tau \mathcal{F}}{1 + \varepsilon \tau} \quad (12)$$

où les deux grandeurs adimensionnelles,  $\varepsilon$  et  $\tau$ , représentent respectivement le taux de concentration et l'entrefer relatif, et sont calculés comme suit :

$$\tau = \frac{S_a}{S_e}$$

$$\varepsilon = \frac{l_e}{l_a}$$

Nous voyons ainsi que  $B_e$  est à peu près proportionnel à l'aimantation et au taux de concentration, à la condition expresse que l'entrefer relatif soit très petit. En pratique cette condition est difficile à réaliser pour une valeur élevée du taux de concentration.

Au critère d'Evershed, le produit  $\epsilon \cdot \tau$  vaut 1, donc  $B_e$  vaut :

$$B_e = \frac{\tau \cdot \mathcal{J}}{2}$$

## **V - Conclusions.**

Le calcul analytique des circuits comportant des aimants est simple à mettre en œuvre, sur la base de la relation (1), en adoptant une aimantation,  $\mathcal{J}$  constante. Le dimensionnement est alors correct si le critère de contrainte magnétique (3) est vérifié, quelle que soit la température de fonctionnement de l'aimant.

Le critère d'Evershed permet, le cas échéant, d'introduire une contrainte d'optimisation du volume d'aimant.

La principale hypothèse simplificatrice réalisée consiste à négliger le flux de fuite produit par l'aimant. L'erreur commise dépend alors de la configuration géométrique du dispositif calculé. Dans certains cas elle peut être importante. L'évaluation précise des fuites n'est possible, la plupart du temps, que par l'intermédiaire du calcul numérique, à l'aide, par exemple, d'un outil de calcul des champs par éléments finis.

## **Bibliographie restreinte :**

[1] Rapports de jurys de concours, Agrégation Génie Electrique 1997. Ed. Centre National de Documentation Pédagogique.

[2] G. LACROUX, "Les aimants permanents". Ed. Technique et documentation - Lavoisier.

[3] P. ROBERT, "Matériaux de l'électrotechnique". Ed. Dunod.

[4] Catalogue "Aimants permanents". Société Magnetfabrik Bonn, Postfach 2005, Dorotheenstrasse 215, D-5300 Bonn 1.

[5] Catalogue "Aimants permanents et composants magnétiques". Société KRUPP WIDIA Magnettechnik, Postfach 102161, D-45021, Essen.

# MAGNETISATION ET DEMAGNETISATION DES DISPOSITIFS A AIMANTS PERMANENTS - UN TRAITEMENT PRATIQUE A L'USAGE DES ATELIERS DE MAINTENANCE

C. LESBROUSSART - Docteur - ingénieur de l'U.T.C.

Directeur des études et du développement au sein de la société SEIBO  
(Société d'électrotechnique industrielle et de bobinage). 6, rue du Champ des Cosaques  
60 400 Noyon.

Cet article traite des problèmes de la maintenance effective des moteurs intégrant des aimants permanents. Après avoir rappelé les différents types de moteurs concernés par ces opérations de maintenance, nous développerons la nécessité d'avoir un dispositif permettant de réaliser les opérations de démagnétisation et de remagnétisation sur ces aimants. Finalement l'article présente un dispositif développé par la société SEIBO pour la démagnétisation et la remagnétisation des moteurs à aimants permanents.

## **Introduction**

Les moteurs électriques doivent subir régulièrement des opérations de maintenance ou de remise en état.

Ces matériels sont des servomoteurs souvent très sollicités, travaillant dans des conditions de température et de cadence élevées.

On constate le plus souvent :

- Un encrassement de l'induit par de la poussière de charbon, ce qui a pour conséquence une baisse du niveau d'isolement entre l'induit et la carcasse (risques électriques)
- Une fragilisation des aimants due aux chocs ou au vieillissement
- Une désaimantation des aimants due à un vieillissement ou à des surintensités.

Les aimants permanents présents dans ces matériels sont des composants généralement onéreux et donc un entretien courant est parfaitement justifié économiquement.

Cependant, la maintenance des moteurs à aimants permanents est un problème délicat.

En effet, les interventions demandent des manipulations qui font encourir un certain nombre de risques sur les différents composants de ces moteurs :

- Risque de démagnétisation.
- Risque de chocs sur les aimants et d'effritement.
- Risque d'endommagement des parties tournantes.

## **1 - Les différents types de moteurs concernés.**

Les moteurs concernés par les opérations de maintenance sur les matériels à aimants permanents sont essentiellement de deux types :

- Les moteurs à courant continu (C.C.) à aimant permanent (A.P.).  
Ceux-ci se divisent essentiellement en deux sous catégories :
  - Les moteurs C.C. à A.P. à rotor plat à champ axial.
  - Les moteurs C.C. à A.P. à induits classiques à champ radial.
- Les moteurs pas à pas.

### 1-a - Les M.C.C. à induit à champ radial.

Ces moteurs très répandus possèdent une configuration très classique des aimants à une ou deux paires de pôles (fig. 1)

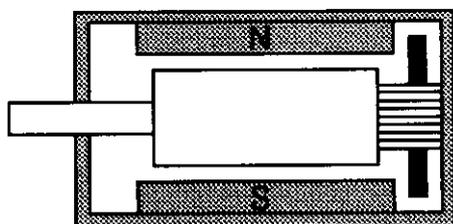


Fig. 1 - Moteurs C.C. à A.P. à flux radial.

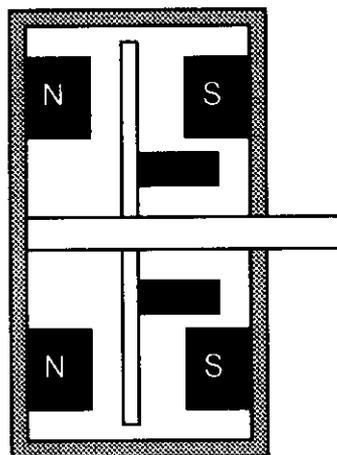


Fig. 2 - Moteurs C.C. à A.P. à flux axial.

Les problèmes rencontrés dans l'entretien de ces moteurs sont :

- L'espace trop important du changement des charbons (encrassement de l'induit).
- Des échauffements importants de l'induit et de la carcasse du moteur entraînant une fragilisation des aimants.

### 1-b - Les M.C.C à rotor plat.

Ces moteurs possèdent un inducteur constitué de plusieurs aimants répartis sur la périphérie statorique. Dans cette configuration, le flux est axial. Ce sont des moteurs de type AXEM. Le rotor est une bakélite sur laquelle sont disposés les conducteurs gravés. Il est placé entre deux aimants en vis à vis. La figure 2 suivante rappelle la constitution de ces moteurs. Ces moteurs sont très utilisés dans les applications de robotique. Ils présentent en effet l'avantage d'avoir un rotor plat de très faible inertie.

Les problèmes rencontrés sur ces moteurs sont :

- Une usure des pistes formant les conducteurs de l'induit sur la bakélite
- Des défauts d'isolation dus aux poussières de charbon.

Sur ces moteurs, toutes les interventions de maintenance nécessitent un démontage partiel ou total. Ces opérations impliquent un démontage de l'induit. Afin de faciliter ces manipulations, il est préférable que le champ magnétique des aimants soit peu intense, car dans le cas contraire, les pièces métalliques à démonter peuvent être plaquées contre les aimants et le rotor qui est d'une structure fragile peut être endommagé.

Les conducteurs très fins placés sur le rotor sont très facilement endommageables lors d'une extraction. Il est à noter que lors d'un démontage la désaimantation peut être supérieure à 30 %.

### 1-c - Les moteurs pas à pas à aimant permanent.

Une grande partie du parc de moteurs pas à pas installés industriellement est représentée par des moteurs de type hybrides. C'est à dire qu'ils possèdent un rotor aimanté avec orientation des lignes de flux et un stator bobiné. Le couple obtenu est une combinaison du couple de réluctance variable et du couple d'aimantation.

Les moteurs très répandus ont la configuration représentée sur la figure 3.

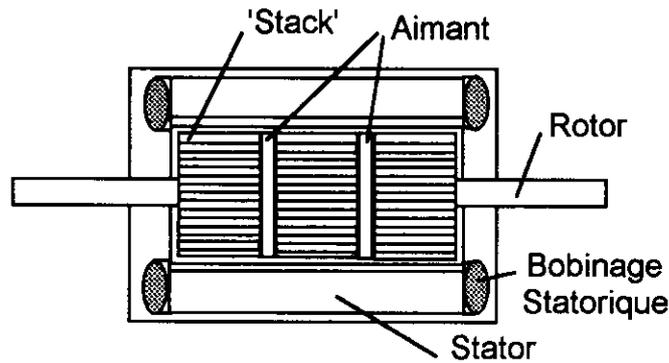


Fig. 3 - Constitution des moteurs pas à pas.

Les problèmes les plus souvent constatés sont dus à des surcharges électriques ou mécaniques ayant entraîné une rupture des conducteurs. Dans ces cas, une extraction des parties tournantes est indispensable pour l'exécution du bobinage statorique.

## 2 - Risques encourus lors des interventions sur les aimants permanents.

Nous traiterons ici le risque le plus fréquent apparaissant lors de la manipulation des aimants permanents qui est le risque de démagnétisation lors de l'extraction de la partie tournante du moteur. Nous rappellerons très brièvement pourquoi un tel risque existe et pour quel type de matériaux. Pour les moteurs actuellement sur le marché, il existe essentiellement trois types de matériaux utilisés pour réaliser des aimants permanents : Les Alnico, les ferrites et enfin les terres rares.

- Les Alnico ont été les premiers aimants artificiels. Ils sont le résultat d'un alliage (Aluminium, Nickel, Cobalt et fer), ils sont moulés à haute température. La grande diversité des traitements thermiques et magnétiques ont fait apparaître une très grande variété d'aimant Alnico.

- Le deuxième type est appelé ferrites. Ce sont des poudres agglomérées sous pression pour fournir un matériau final sous forme de céramique.

- La troisième catégorie d'aimants permanents et la plus récente, est représentée par les aimants permanents à base de "terres rares". Ce sont les aimants possédant l'hystérésis le plus large.

Ces trois catégories possèdent des caractéristiques  $B(H)$  distinctes. Les aimants à bases de terres rares sont ceux qui présentent un  $H$  coercitif le plus élevé et sont donc le moins sujet à des risques de démagnétisation comme nous le verrons au paragraphe suivant.

La figure 4 suivante rappelle les courbes  $B(H)$  pour les trois catégories d'aimants cités.

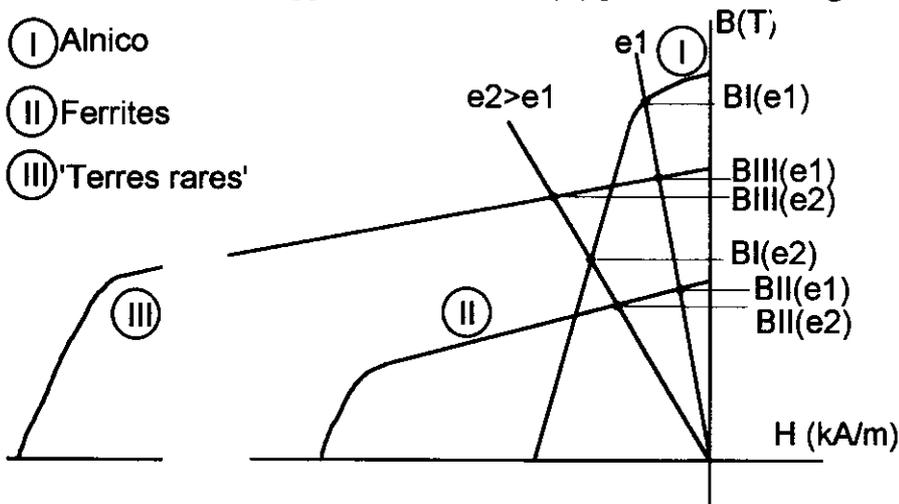


Fig. 4 - Caractéristique  $B(H)$  pour les Alnico, les ferrites, les terres rares.

**Le phénomène de démagnétisation.**

Les aimants placés dans les moteurs vont créer un flux magnétique. Ils sont insérés dans un circuit magnétique possédant un entrefer. Le point de fonctionnement de l'aimant dépend de cet entrefer. Il est donné par l'intersection de la droite d'entrefer et la caractéristique  $B_a(H_a)$  de l'aimant. Le point de fonctionnement de l'aimant est fonction de l'importance de l'entrefer. Lorsque celui-ci varie (Variation au cours du fonctionnement dû à la denture ou variation due à un démontage), le point de fonctionnement se déplace. Plus l'entrefer est important (par exemple lors d'un démontage), plus la pente de la droite d'entrefer se rapproche de 0 et par conséquent,  $B_a$  tend à diminuer (de façon irréversible). Mais la diminution dépend de la caractéristique  $B_a(H_a)$  de l'aimant.

Pour les Alnico et les ferrites (courbes de type I et II) sur la figure 4, un démontage entraîne une chute de  $B_a$  alors que pour une caractéristique de type III (Terres rares), l'accroissement de l'entrefer n'aura qu'une influence mineure. Nous nous intéresserons donc aux dispositifs possédant une caractéristique  $B_a(H_a)$  de type I (et II), car une intervention sur ces moteurs intégrant ces matériaux présente un risque de désaimantation.

Lors de l'extraction du rotor, le risque de démagnétisation est variable, il peut aller de 30 % pour les moteurs de type AXEM à près de 90 % pour des qualités d'aimants plus anciennes (MCC à flux axial et moteur pas à pas).

Nous voyons donc qu'un appareil permettant de retrouver le niveau initial du champ après démontage et remontage est tout à fait utile puisqu'il permet d'atteindre à nouveau les caractéristiques initiales du moteur.

Pour résumer, il apparaît que les opérations de maintenance sur les moteurs à aimants permanents peuvent être facilitées en utilisant :

- la désaimantation provoquée pour faciliter l'ouverture des moteurs (Cf. §1-b).
- la réaimantation pour retrouver le point de fonctionnement initial du moteur.

### **3 - Pratique des opérations de désaimantation et de réaimantation : l'AMPIRIT.**

L'Ampirit est un appareil servant à la démagnétisation active et à la remagnétisation des moteurs intégrant des aimants permanents. Cet appareil a été développé par la société SEIBO avec l'aide de l'ANVAR dans le but de se doter d'un outil pour réaliser des opérations de maintenance sur des matériels possédant des aimants permanents.

#### **3.a - Création d'un champ magnétique intense.**

De façon élémentaire un champ magnétique peut être créé en utilisant un solénoïde parcouru par un courant. Le champ étant proportionnel au courant et au nombre de spires de ce solénoïde, augmenter ces deux quantités (Ampères.tours) permet d'accroître l'importance du champ.

La difficulté réside ici dans deux contraintes : la place disponible dans le moteur pour insérer un bobinage et l'intensité du courant disponible.

C'est à l'utilisateur d'utiliser la géométrie et la configuration des aimants pour déterminer le type de bobine la plus efficace. La place disponible pour recréer le solénoïde qui permettra de magnétiser ou démagnétiser l'aimant est souvent très limitée.

Pour obtenir un champ magnétisant ou démagnétisant intense, il faut pouvoir obtenir une intensité importante. Cependant, pour éviter d'avoir une puissance installée trop grande, le courant doit être très élevé mais pendant une durée très courte.

Le dispositif devrait posséder les caractéristiques suivantes :

- Souplesse d'utilisation pour s'adapter à un maximum de configurations différentes.
- Ne pas nécessiter une source d'énergie trop importante.
- Etre portable et transportable facilement dans l'atelier de maintenance.

### 3.b - Méthodologie d'utilisation d'un appareil de démagnétisation - remagnétisation.

Les opérations de démagnétisation et de remagnétisation nécessitent une méthodologie minimale pour obtenir un maximum d'efficacité.

- Déterminer les lignes de flux dans les carcasses et les entrefers.
- Déterminer la polarité des champs magnétiques.
- Définir une bobine permettant de créer un champ dans le sens souhaité.
- Estimer l'intensité qui permettra de réaliser l'opération en fonction du volume des aimants.

### 3.c - Description de l'Ampirit.

L'appareil réalisé est constitué de plusieurs modules. Ils sont donnés sur le schéma suivant (figure 5) :

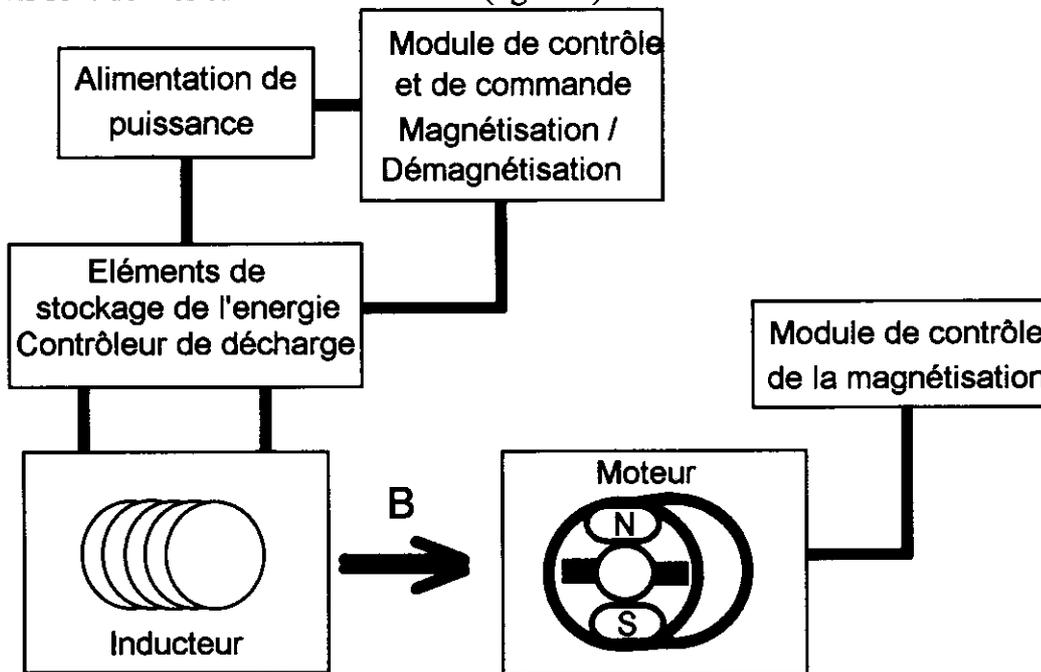


Fig. 5 - Représentation schématique de l'Ampirit.

- L'alimentation de puissance : permet l'adaptation de la tension et l'isolation galvanique.
- Le module de contrôle et de commande permet de piloter l'intensité qui sera délivrée.

Il est à noter qu'il est assez délicat de déterminer pratiquement l'impulsion du courant qui sera délivrée. Cependant, nous savons qu'il est nécessaire d'atteindre le  $B_{sat}$  du matériaux à remagnétiser. L'expérience permet néanmoins d'évaluer empiriquement les niveaux de décharge pour traiter des volumes d'aimants connus.

- Le contrôleur de décharge associé à des éléments capacitifs permet de surveiller la décharge impulsionnelle et le champ.

- L'inducteur est la bobine qui permet de créer le champ magnétisant ou démagnétisant des aimants. Les bobines doivent les entourer le plus efficacement possible.

Il est clair que l'inducteur est différent selon que l'on travaille sur un moteur à flux axial, à flux radial ou sur un moteur pas à pas hybride.

- Un module de contrôle externe de la magnétisation.

Ce module permet de contrôler la valeur effective de la force électromotrice en entraînant à vitesse variable le moteur remagnétisé.

Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour deux moteurs de type AXEM de puissance différente. Ces moteurs ont subi successivement une opération de démagnétisation, un changement d'induit, une révision complète et une remagnétisation.

f.e.m par 1000 tr/mn	Après démagnétisation	Après remontage et remagnétisation	Tension nominale donnée par le constructeur.
1 kW	16,1 V	34,9 V	35,2 V
7,2 kW	26,3 V	48,5 V	48,3 V

**Tableau I : f.e.m. mesurée après démagnétisation et après remagnétisation.**

Ces données montrent que l'AMPIRIT permet de diminuer sensiblement le niveau d'induction dans le moteur et surtout de retrouver les niveaux d'induction initiaux, ce qui valide l'efficacité du dispositif.

### **Conclusion et évolution du matériel.**

La présentation réalisée ici nous a permis de considérer un prototype fonctionnel. Cet appareil est souple et d'usage aisé. Il permet de s'adapter à un grand nombre de types et de configurations de moteurs. Pour cette raison, c'est un outil qui autorise la réalisation des opérations de maintenance les plus diverses en toute sécurité.

Si le prototype actuellement réalisé par SEIBO, permet de traiter des moteurs d'une puissance d'environ 10 kW, Il est évident qu'un dispositif de puissance plus élevé peut être facilement envisagé. Il en est de même pour la mise en place de différents modules supplémentaires pour l'évaluation et le contrôle de la magnétisation pour des moteurs dont la configuration des aimants permanents est plus complexe ou difficilement accessible.

### **Bibliographie-Ouvrages généraux :**

Actionneurs électriques - Principes, Modèles, Commande - G. Grellet, G. Clerc - Ed. Eyrolles Nov 1996.

Entraînements électriques à vitesse variable, J. Bonal Ed. Tec et Doc 1997.

# Aimants permanents

## rappels théoriques, technologie et critères de dimensionnement

F. ALVES  
ENS CACHAN- IUFM CRETEIL  
61, Av. Président Wilson, 94235 CACHAN

### Introduction

Les avancées technologiques dans les systèmes électrotechniques (production, transport et utilisation de l'énergie électrique) n'auraient vu le jour sans les progrès réalisés sur les matériaux, citons pour exemple: la densité d'énergie spécifiques des aimants est passée de 50 (AlNiCo) à 320 kJ/m<sup>3</sup> (aimants Néodyme-Fer-Bore), ce qui résulte d'une diminution des dimensions et du poids des aimants pour la même induction et le même entrefer. Des applications dans de nombreux domaines (automobile, électroménager, jouet...) ont pu être développées avec les possibilités des aimants actuels. En ce qui concerne les chiffres, selon un rapport CNRS récemment publié sur les matériaux, le marché des aimants était en 1995 de 20 milliards de francs avec une croissance de plus de 10% / an. Les aimants AlNiCo, ferrites et à base de terres rares représentent respectivement environ 15, 55 et 30 %.

Bon nombre d'articles et ouvrages ont été publiés sur les aimants, l'objectif de cet article est de faire synthèse sur les propriétés remarquables des grandes classes d'aimants actuels en soulignant leurs avantages et inconvénients dans le but de dresser des critères de choix pour le dimensionnement de dispositifs intégrant ces matériaux.

Dans le chapitre I, on rappelle les aspects théoriques relatifs aux aimants. Ensuite le chapitre II décrit la technologie en matière de synthèse de ces matériaux. Enfin, le chapitre III présente des comparatifs entre les différentes familles d'aimants et se conclut par un résumé des principaux axes de recherche actuellement développés dans ce domaine.

Sans être une liste exhaustive, les principales applications sont:

#### ① les machines électriques:

Remplaçant l'inducteur et son bobinage de cuivre, ils amènent les avantages suivants (puissance de qq. dizaines de kW):

- diamètre du moteur plus faible (15 à 30% pour les ferrites et >50% pour les Nd-Fe-B) ou plutôt on raisonne en gain en puissance à volume équivalent,
- diminution de la masse,
- consommation de courant moindre,
- rendement amélioré (50 -->80%).

Signalons que le créneau de la forte puissance (MW) s'élargit avec la technologie des aimants radiaux alternés puisque Jeumont Industrie filiale du groupe Framatome fabrique des machines de 1800kW-300tr/min jusqu'à 100kW-3000tr/min pour les systèmes de propulsion. Comparées aux machines conventionnelles alternatives, ces machines synchrones à aimants offrent, en outre, un gain en volume et poids de 30%.

#### ② applications utilisant la propriété "d'attraction"

- électro-aimant (relais, moteurs-frein ...)
- supports et fermetures magnétiques dans le domaine du Grand Public

#### ③ applications utilisant la propriété "d'attraction-répulsion"

- paliers magnétiques (rotation sans support -> pas de frottement -> vitesses de rotation très grandes) qui suscitent à nouveau un regain d'intérêt.
- accouplements

#### ④ toutes les applications basées sur la détection magnétique

- détection sans contact de la présence d'un mobile (vérin, ascenseur, niveau d'huile...)
- mesure de la vitesse de rotation (vilebrequin, tambour de machine à laver, roulement à billes...)

La méthode la plus simple est de former un couple aimant fixé sur la partie mobile-capteur fixe (ex: capteur effet Hall) pour recueillir un signal; il s'agit là de détections type binaire (présence ou absence de signal, comptage d'une fréquence de défilement.

#### ⑤ transmission de mouvement

- freins à courants de Foucault (ralentisseurs de poids lourds)

- embrayages à hystérésis
- microvérins sans tiges

## **L1- Caractéristiques recherchées**

### **L1.1- Intérêt d'une source d'induction magnétique B?**

Pour se convaincre de la nécessité d'avoir une source de champ d'induction magnétique B pour réaliser des convertisseurs électromagnétiques, partons de la loi de Lenz ( $e = -\frac{\partial\phi}{\partial t}$ ) où  $\phi$  est le flux d'induction

magnétique B à travers une surface S ( $\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ ). En la développant, on obtient l'expression suivante :

$$e = \underbrace{-SB \frac{\partial\theta}{\partial t} \sin\theta}_{\text{machines électriques}} + \underbrace{S \cos\theta \frac{\partial B}{\partial t}}_{\text{transformateurs}} + \underbrace{B \cos\theta \frac{\partial S}{\partial t}}_{\text{lanceurs électromagnétiques}}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = k\omega B$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \theta = \Omega = \text{cste}$$

Dans tous les cas, on a besoin d'une induction magnétique B d'autant plus importante que l'on demandera aux convertisseurs d'être performants (gain en volume, poids, énergie stockée,...). Deux manières de produire une induction magnétique B:

- les courants de conduction d'une part (courants circulant dans des circuits ou des conducteurs),
- la matière aimantée (matériaux doux dits "polarisables" et les aimants permanents).

A titre de rappel, on a dans le vide la relation suivante:  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  avec  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ .

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ [\text{Tesla}] & [\text{H/m}] & [\text{A/m}] \end{array}$$

Alors que dans la matière aimantée, on a une relation non linéaire compliquée (prise en compte des phénomènes d'anisotropie, d'hystérésis et de saturation) entre l'induction magnétique B et le champ d'excitation H:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \vec{J} & \text{J est la polarisation magnétique ([Tesla])} \\ \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} & \text{où } \chi \text{ est la susceptibilité magnétique (sans dimension).} \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} & \mu_r \text{ est la perméabilité relative (sans dimension)} \end{aligned}$$

Cette dernière formulation doit être comprise, d'une manière générale, sous forme tensorielle compte tenu du caractère anisotrope du magnétisme:

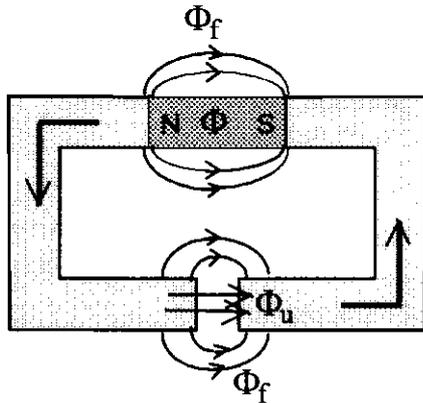
$$\vec{B} = \|\mu\| \vec{H} \quad \text{avec} \quad \|\mu\| = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix}$$

### **L1.2- Quels sont les avantages - inconvénients de l'aimant ?**

Les caractéristiques requises pour les aimants sont à l'opposé de celles recherchées pour les matériaux doux. En effet, un aimant est un matériau magnétique susceptible, après aimantation, de maintenir indéfiniment un flux dans l'air. Un tel matériau doit posséder un champ coercitif élevé et une induction rémanente notable. Il peut être ferromagnétique (alliages métalliques) ou ferrimagnétiques (ferrites céramiques). Il peut être utilisé seul ou souvent inséré dans un circuit magnétique en matériau doux dont le but est de canaliser le maximum de flux de l'aimant vers l'entrefer où doit être utilisé le champ magnétique produit.

Compte tenu que l'air n'est pas un isolant pour le flux, le flux total se divise en deux flux (l'un utile, l'autre de fuites) et on définit alors un coefficient de fuites  $\sigma = \frac{\Phi}{\Phi_u} > 1$ .

L'utilisation des aimants dans les systèmes électrotechniques présente des avantages de facilités de création et de maintien d'un flux constant. Ce maintien n'exige aucune énergie. L'indépendance de toute source de courant permet d'avoir un échauffement Joule nul, une sécurité absolue, une technologie simple et un emploi possible dans des lieux où aucune installation électrique n'existe. De plus, les critères encombrement réduit et stabilité parfaite du flux dans le temps sont aussi à prendre en considération.



$\Phi$  flux total de l'aimant  
 $\Phi_u$  flux utile  
 $\Phi_f$  fuites de flux

L'inconvénient majeur des aimants est qu'il est très difficile de régler et de supprimer le champ produit par des aimants en des temps très courts (de l'ordre de la milliseconde).

**L.1.3- Comment paramétrer les aimants?**

La réponse est basée sur l'allure des cycles J(H) et B(H), très différents dans le cas des aimants. Les cycles idéaux sont portés sur la figure 1. Le cycle J(H) est rectangulaire. Pour une valeur de H égale à  $H_C^J$ , l'aimantation de l'aimant idéal se retourne en un seul bloc.

A partir du cycle J(H) et de la relation  $B = \mu_0 H_i + J$  avec  $H_i = H_{ext} + H_d$  ( $H_d$  étant le champ démagnétisant, lié à l'effet de forme), on peut construire le cycle B(H) qui est plus adapté aux besoins de l'utilisateur. Le renversement d'aimantation se traduit par une chute verticale de B qui se déclenche dans le quadrant II (d'aimants à faible coercivité) ou dans le quadrant III (aimants très coercitifs). On définit dans ce cas  $H_C^B$ , champ où B=0; information importante pour l'utilisateur mais ne correspondant à aucun phénomène physique car  $H_C^B \neq H_C^J$ .

Si on regarde maintenant les aimants réels, on observe des écarts par rapport aux cycles idéaux. La courbe J(H) fait apparaître des imperfections:

- existence d'évolutions réversibles de l'aimantation (rotation réversible des moments magnétiques) entre saturation et rémanence,
- présence d'un mélange de phénomènes réversibles et irréversibles entre  $H = 0$  et  $H = H_C^J$ .

Les grandeurs qui permettent de caractériser les qualités intrinsèques et les imperfections sont:

- $J_s$  (grandeur mesurée en champ très fort  $\gg$  champ d'anisotropie),
- $J_r$  (grandeur très importante car elle donne une idée des rotations réversibles parasites),
- $H_C^J$  (théoriquement c'est le champ pour lequel une majorité de moments se retournent).

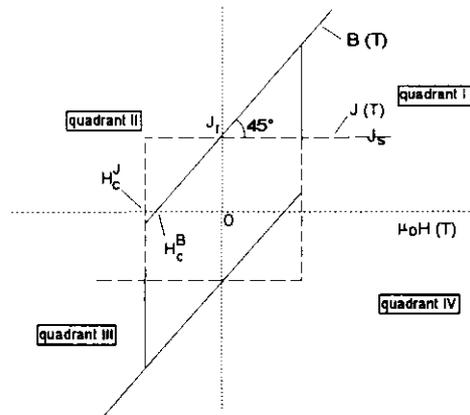


Figure 1: Cycles idéaux J(H) et B(H)

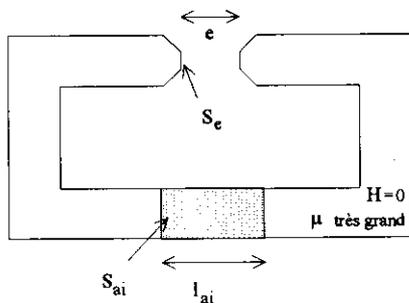
## L2- Dimensionnement d'un aimant et fonctionnement dans un circuit magnétique

### L2.1- principe de fonctionnement

Composant de dispositifs, un aimant doit être intégré dans un circuit magnétique comportant une culasse en matériau ferromagnétique doux et des entrefers. Le concepteur aura à optimiser le circuit afin de tirer profit de l'aimant. Les paramètres d'optimisation sont:

- choix de l'aimant au travers de sa **courbe caractéristique** (second quadrant de la courbe d'hystérésis),
- **dimensions de tous les éléments**: aimant, culasse de canalisation du flux magnétique produit par l'aimant et entrefers.

Vu de l'aimant, le circuit magnétique se comporte comme une "courbe de charge" B(H) linéaire de pente d'autant plus verticale que les entrefers sont petits. Le point de fonctionnement de l'aimant dans son circuit correspond au point d'intersection entre la droite de charge et la caractéristique B(H) propre à l'aimant.



$$H_{ai} l_{ai} + H_{culasse} l_{culasse} + H_e e = 0 \quad (\text{théorème d'Ampère})$$

$$\Rightarrow H_{ai} = -\frac{e}{l_{ai}} H_c \quad (H_{culasse} \approx 0)$$

De plus,  $B_{ai} S_{ai} = B_e S_e$  (fuites de flux supposées nulles) et

$$B_e = \mu_0 H_e,$$

d'où:

$$B_{ai} = -\frac{l_{ai}}{e} \frac{S_e}{S_{ai}} \mu_0 H_{ai} \quad \text{droite de charge}$$

$$B_{ai} = \mu_0 H_{ai} + J_{ai} \quad \text{aimant}$$

Les figures 2a-b montrent respectivement l'évolution historique des aimants (avec comparaison de leurs performances aux matériaux doux) et les courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs.

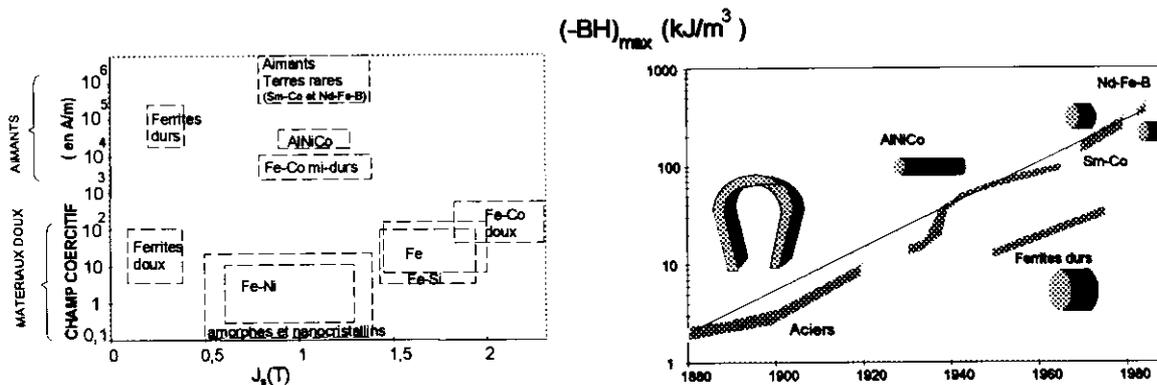


Figure 2-a: Placement des matériaux doux - durs dans un diagramme  $H_c - J_s$  [1], évolution historique des aimants [2].

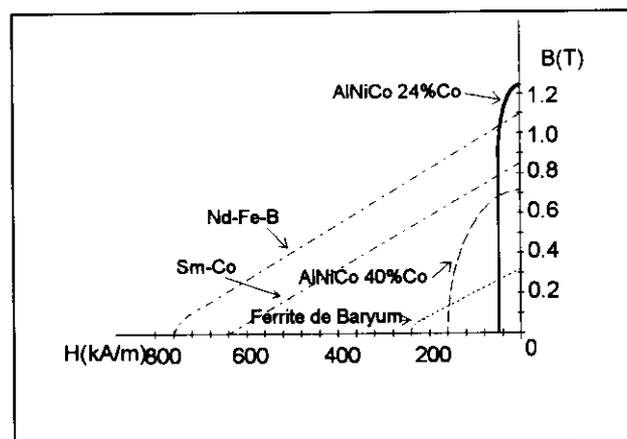
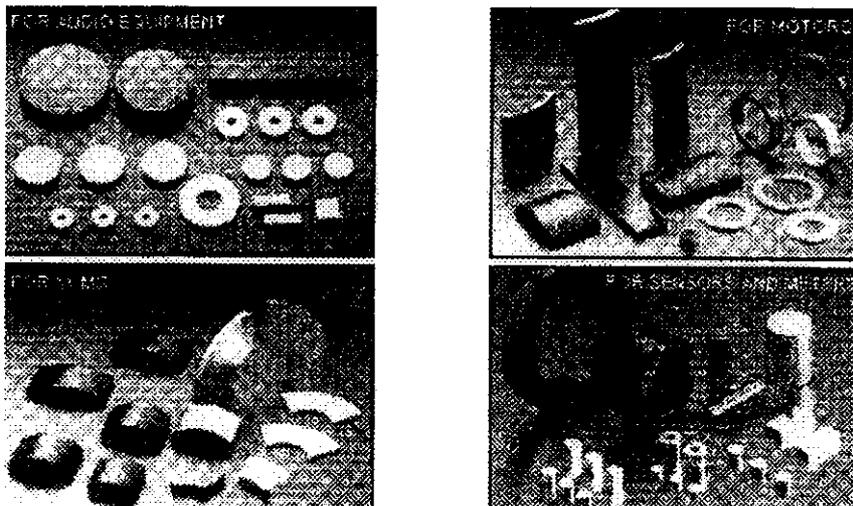


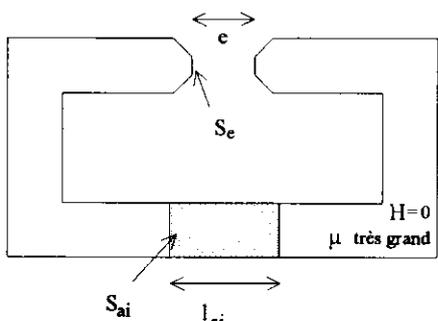
Figure 2-b: courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs.

Il faut signaler l'évolution de la forme des aimants et plus précisément la diminution du rapport  $l_{ai}/S_{ai}$ . Ce rapport est une donnée fondamentale pour les applications (réduction de volume, résistance à la désaimantation) et reflète une propriété remarquable des aimants performants. En effet, en terme de réluctance, ils sont équivalents à de l'air ( $\mu \sim 1.001 \times \mu_0$ ), ce qui permet d'obtenir des aimants avec des pôles Nord et Sud très proches (possibilité de réaliser des aimants en couches minces). Sinon il est nécessaire d'augmenter la réluctance de l'aimant (longueur) de manière à ce qu'elle soit supérieure à celle de l'air (image du fer à cheval).

*N.B.: Il existe aussi d'autres formes d'aimants: cylindre, tore, barres, plats, multipôles....*



**I.2.2- calcul simplifié d'un circuit magnétique( non prise en compte des flux de fuite et ampère-tours consommés dans la culasse)**



A partir des relations  $H_e = -\frac{l_{ai}}{e} H_{ai}$ ,  $B_{ai} S_{ai} = B_e S_e$  et  $B_e = \mu_0 H_e$ , on obtient  $B_{ai} = -\mu_0 \frac{S_e}{S_{ai}} \frac{l_{ai}}{e} H_{ai}$

Pour avoir un fonctionnement optimal de l'aimant, établissons le bilan énergétique:

$w_e = \frac{1}{2} \mu_0 H_e^2$  ( Joules / m<sup>3</sup> ) : densité volumique d'énergie stockée dans l'entrefer

$W_e = \frac{1}{2} \mu_0 H_e^2 V_e = \frac{1}{2} B_e H_e V_e$  (Joules)

or suivant les relations établies plus haut, l'énergie stockée s'écrit:

$W_e = -\frac{1}{2} H_{ai} l_{ai} B_{ai} S_{ai} = -\frac{1}{2} (H_{ai} B_{ai}) V_{ai}$

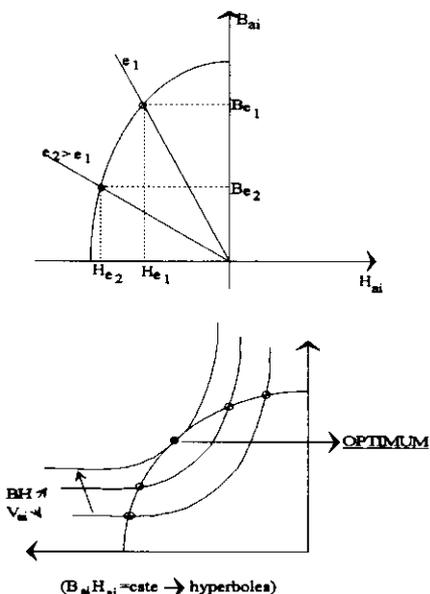
Etant donné que les aimants sont généralement chers, on cherche à avoir des volumes petits (mais aussi dans un souci d'encombrement réduit), donc à maximiser le produit  $(-B_{ai} H_{ai})$ : **CRITERE d'EVERSHED.**

Energie spécifique (ou produit énergétique) maximale idéale:  $(-BH)_{max}$

Si on prend le cas d'aimants possédant la courbe  $B_{ai}(H_{ai})$  suivante (ex: Sm-Co, Ferrites de Baryum, Nd-Fe-B):

$B_{ai} = B_r + \mu_0 H_{ai}$ ,  $H_c$  tel que  $H_c = \frac{B_r}{\mu_0}$ , le produit

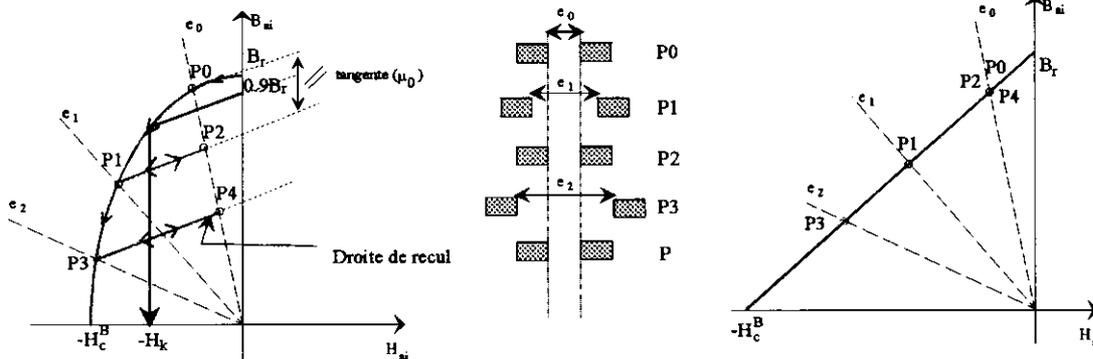
énergétique  $E = -B_{ai} H_{ai} = -B_r H_{ai} - \mu_0 H_{ai}^2$  est maximal



lorsque  $\frac{dE}{dH_{ai}} = 0$  ce qui donne  $H_{ai} = -\frac{B_r}{2\mu_0}$  et donc:

$$E_{\max} = (-B_{ai}H_{ai})_{\max} = \frac{B_r^2}{4\mu_0}$$

### L2.3- Variation d'entrefer



aimants ferrites de Baryum, Sm-Co et Nd-Fe-B

aimants AlNiCo

Si on continue indéfiniment à faire varier l'entrefer, on risque de désaimanter l'aimant. Ceci concerne les aimants AlNiCo uniquement, par contre les aimants ferrites de Baryum, Sm-Co et Nd-Fe-B, le problème ne se pose pas car on a un phénomène réversible.

### L2.4- Présence d'un champ ("démagnétisant ou magnétisant" suivant le sens du courant i)

L'effet démagnétisant permet le défluxage dans les machines synchrones à aimants afin d'assurer une puissance constante sur une large plage de vitesse.

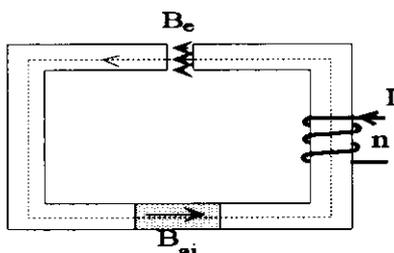
L'effet magnétisant sert à surexciter la machine afin d'augmenter le couple moyen.

$$B_{ai} S_{ai} = B_e S_e = \mu_0 H_e S_e$$

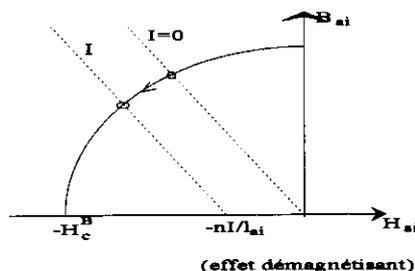
$$H_{ai} l_{ai} + H_e e = -nI$$

$$H_e = -\frac{nI}{e} - H_{ai} \frac{l_{ai}}{e}$$

$$B_{ai} = -\mu_0 \frac{S_e}{S_{ai}} \frac{nI}{e} - \mu_0 \frac{S_e}{S_{ai}} \frac{l_{ai}}{e} H_{ai}$$



le sens du courant I a tendance à désaimanter l'aimant



En conclusion, les performances d'un aimant sont :

① produit énergétique  $(-BH)_{\max}$ , et comme référence,  $(-BH)_{\max}^{idéal} = \frac{B_r^2}{4\mu_0}$ , représente la densité d'énergie maximale pouvant être stockée dans l'entrefer

### ② induction rémanente $B_r$

Pour un aimant idéal  $\mu_0 H_C^B = B_r$ , si les valeurs expérimentales vérifient d'assez près cette égalité alors l'aimant considéré est presque parfait et peut être utilisé dans un circuit à entrefer de travail largement variable (fonctionnement dit "dynamique")

③ **champ limite d'utilisation ou champ de rigidité limite  $H_k$** , champ expérimental à partir duquel 10% de l'induction sont irréversiblement perdus (ce qui revient à dire que 10% des moments magnétiques de l'aimant sont déjà retournés sous ce champ). Cette donnée technique est bien plus importante que  $H_C^J$ . En effet, dans les systèmes hybrides combinant bobinages et aimants, les fonctionnements dans les quadrants I et III peuvent exister si le courant dans le bobinage est respectivement suffisamment magnétisant ou démagnétisant. Ces deux situations peuvent se rencontrer dans les cas suivants:

- pics de courant transitoire au démarrage ou à l'inversion du sens de rotation (peuvent dépasser d'un facteur 10 le courant nominal) dans les moteurs à aimants.
- courts-circuits francs devant supporter les alternateurs à aimants.
- régimes transitoires sévères dans les machines à aimants pour la robotique.

Par conséquent, il s'agit là d'un défaut grave qui se solde inéluctablement par la destruction de l'appareillage.

Néanmoins il faut garder à l'esprit qu'un champ  $H_k$  inutilement grand rend difficile une aimantation correcte (rappelons que le champ d'aimantation doit être au moins trois fois supérieur à  $H_C^J$ ).

## II Technologie des aimants performants

### II.1- Optimisation du champ coercitif

A l'opposé des matériaux doux où l'on cherche à supprimer tous les obstacles aux mouvements des parois de Bloch, dans les aimants, on crée des défauts dans le matériau: précipités, seconde phase, contraintes...

Cette méthode présente plusieurs inconvénients:

- les précipités sont généralement peu ou pas magnétiques et on perd alors sur  $J_s \rightarrow B_r \rightarrow (-BH)_{\max}$ ,
- l'expérience montre qu'on ne dépasse guère quelques centaines d'Ampère par mètre.

La seconde méthode, plus efficace, consiste à créer un matériau à grains fins monodomains. Le champ coercitif passe par un maximum pour une taille de particules voisine de l'épaisseur des parois de Bloch. Les seules sources capables de fournir des champs coercitifs importants sont les anisotropies magnétocristalline et de forme. La seconde n'est intéressante que pour des particules allongées dont  $N_{//} \gg N_{\perp}$  (facteurs démagnétisants dans les directions parallèles et perpendiculaires). L'énergie associée à cette anisotropie étant d'origine magnétostatique, les différentes particules ont les unes sur les autres des effets démagnétisants d'autant plus importants qu'elles sont proches:

$$\approx H_C^J \approx \frac{\alpha}{\mu_0} (N_{//} - N_{\perp}) J_s (1 - \Phi)$$

où  $\Phi$  représente le coefficient de remplissage ou proportion de phase dure dans le matériau entier

$\alpha = 0,5$  pour des particules orientées au hasard

$\alpha = 1$  pour des particules alignées

L'anisotropie magnétocristalline conduit à une valeur théorique du champ coercitif qui dépend aussi de l'orientation des grains:

$$\approx H_C^J \approx \alpha \frac{K_1}{J_s}$$

où  $\alpha = 2$  pour des particules alignées

$\alpha = 0,64$  ou  $0,96$  pour des grains orientés au hasard respectivement de structure cubique ou uniaxe.

#### Remarque:

En réalité, ces valeurs théoriques ne sont jamais atteintes car les grains fins ne sont pas des monocristaux parfaits et présentent donc des sites de nucléation préférentielle de domaines de fermeture qui peuvent renverser l'aimantation !

### Ordres de grandeur des diverses anisotropies:

- anisotropie magnétocristalline corps uniaxe (Co, Ferrites hexagonales)	$K_1 \sim 5 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$
- anisotropie magnétocristalline corps cubique (Fe, Ferrites)	$K_1 \sim 10^4 \text{ J/m}^3$
- anisotropie de forme (Fe longueur/diamètre = 2)	$K_F \sim 5 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$
- anisotropie magnétoélastique $\sigma = 50 \text{ MPa}$	$K_\sigma \sim 5 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$
- anisotropie magnétique induite	$K_u \sim 10^3 \text{ J/m}^3$

(signalons que l'anisotropie est la capacité d'un matériau à s'aimanter ou être aimanté dans une direction privilégiée)

## II.2- Méthodes classiques de préparation:

### Alliages AlNiCo coulés ou frittés:

Les meilleures performances sont obtenues pour des alliages riches en cobalt (exemple:  $\text{Fe}_{34}\text{Al}_7\text{Ni}_{14}\text{Co}_{36}\text{Cu}_3\text{Ti}_5\text{Nb}_1$ , point de curie élevé), en partant d'un polycristal texturé, dit "orienté" ou "colonnaire", qu'on a cristallisé en présence d'un gradient thermique et traité ensuite sous champ magnétique de même direction.

Les alliages frittés sont obtenus grâce à la métallurgie des poudres basée sur la technique du frittage. Il se pratique surtout pour les ferrites dont le broyage en grains fins à la dimension monodomaine est aisé. Le compactage ( $1-10 \text{ t/cm}^2$ ) précède le frittage ( $1200-1400^\circ\text{C}$ ) qui est effectué sous atmosphère contrôlée et peut être réalisé sous champ (AlNiCo - ferrites orientés). Les objets ainsi réalisés (céramiques c.a.d. produits durs mais fragiles, peu résistants aux efforts de traction) sont alors rectifiés à la meule et découpés à la scie diamantée. Par conséquent, les formes sont essentiellement simples (cylindres, anneaux, parallélépipèdes).

### Ferrites durs ou ferrites hexagonaux de Strontium et Baryum:

Ce sont des oxydes ferrimagnétiques de structure hexagonale dont la formule générale s'écrit:  $\text{MO } 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , où M est un métal divalent essentiellement Sr ou Ba.

Ces matériaux se distinguent sur plusieurs points:

- leur aimantation à saturation est quatre fois plus faible que celle du fer, ce qui les pénalise dans les dispositifs de puissance,
- leur point de Curie bas ( $450^\circ\text{C}$ ) rend leurs propriétés magnétiques sensibles à la température,
- ce sont des isolants électriques,
- ils sont très durs, ce qui interdit l'usinage des produits finis et nécessite la fabrication directe des composants.

La fabrication des ferrites, relevant de l'industrie des céramiques, suit les étapes suivantes:

- à partir des matériaux de départ ( $\text{CO}_3 \text{ Ba}$ ,  $\text{CO}_3 \text{ Sr}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), broyage fin puis mélange en proportions convenables porté ensuite à  $1200^\circ\text{C} \Rightarrow$  formation du ferrite,
- broyage en présence d'eau jusqu'à obtention d'une boue, dans laquelle les grains de ferrite en suspension doivent être les plus fins que possible avec une uniformité dans leurs tailles (typiquement  $0.5 \mu\text{m}$ ),
- compression en présence d'un liant, par des presses automatiques, dans des moules de forme adaptée et ceci en présence d'un champ magnétique suffisant pour orienter les grains  $\Rightarrow$  aimants anisotropes, plus performants que les aimants isotropes,
- frittage haute température ( $\approx 1200^\circ\text{C}$ ) des pièces moulées, en s'assurant que le chauffage et le refroidissement soient lents afin de ne pas créer de contraintes (fêlures) et que le taux d'oxygène soit ajusté de manière à contrôler la stabilité chimique du ferrite.

La deuxième forme d'élaboration du ferrite, appelé ferrite flexible ou moulé, est la structure composite: poudres de matériaux durs + résine.

L'orientation des poudres s'effectue par application d'un champ au cours de la polymérisation de la résine. Pour les ferrites, on tire parti de leur structure en feuillet (réseau hexagonal) pour orienter les particules par laminage de la résine au moment de sa polymérisation.

*Avantages:* matière dense et homogène, résiste aux chocs, mauvais conducteur (peu de courants de Foucault en présence de champ alternatif).

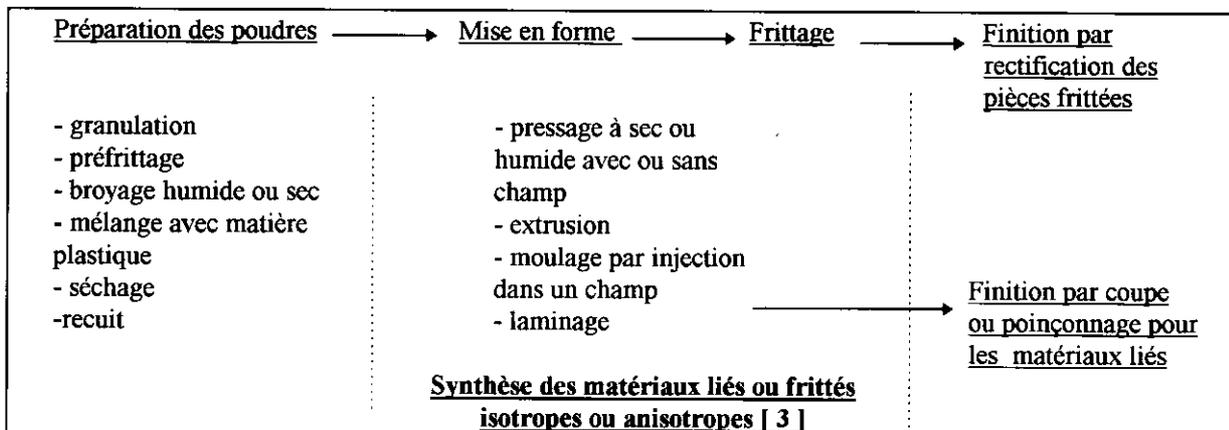
**Les alliages Sm-Co et Nd-Fe-B** sont obtenus, eux aussi, par frittage de poudres.

Signalons qu'un nouveau procédé est apparu (n'a pas rencontré de succès auprès du monde industriel) et consiste à une trempe rapide de l'alliage Nd-Fe-B sur une roue froide (procédé utilisé pour fabriquer les alliages

amorphes et nanocristallins se présentant sous forme de rubans d'épaisseur micrométrique). Le ruban cristallisé est réduit en particules (qq. centaines de  $\mu\text{m}$ ). La poudre peut alors être conditionnée suivant trois techniques:

- soit avec ajout d'un liant plastique. L'aimant est obtenu par pressage à froid ( $B_r = 0.55-0.65 \text{ T}$ ,  $H_C^J \approx 1200 \text{ kA/m}$ ,  $(-BH)_{\text{max}} \approx 60-70 \text{ kJ/m}^3$ ),
- soit par pressage à chaud ( $(-BH)_{\text{max}}$  peut atteindre  $120 \text{ kJ/m}^3$ ),
- soit par double pressage à chaud avec extrusion  $\Rightarrow$  aimant anisotrope avec une énergie volumique de l'ordre de  $260 \text{ kJ/m}^3$ .

L'avantage indéniable est la possibilité d'obtenir directement des aimants de formes complexes, impossibles par frittage ou coulée.



### En résumé

La réalisation d'aimants performants consiste à trouver des matériaux et des technologies qui permettent de créer des assemblages de particules à **FORTE AIMANTATION, MONODOMAINES, ANISOTROPES DANS LEUR FORME** et si possible de les **ORIENTER TOUTES PARALLELEMENT A UN AXE**.

L'avantage d'un tel assemblage réside dans le fait qu'un renversement de l'aimantation de quelques grains isolés n'entraîne pas de conséquence grave sur l'ensemble de l'aimant.

Aux AlNiCo, il leur manque une anisotropie magnétocristalline ( $K_1$ ) importante.

Aux ferrites, il leur manque une polarisation à saturation ( $J_s$ ) élevée.

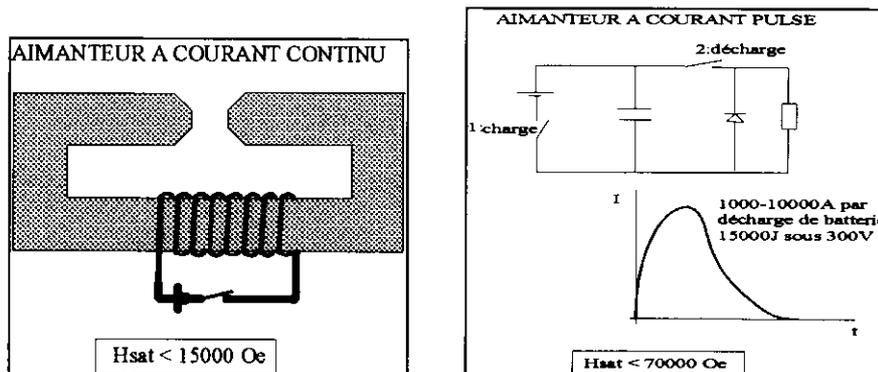
Aux Sm-Co, il leur manque une technologie bon marché.

Aux Nd-Fe-B, leur instabilité thermique des propriétés magnétiques (température d'usage limitée à  $100^\circ\text{C}$ ) est, grâce à des substitutions de Vanadium et Cobalt par exemple, repoussée jusqu'à  $180^\circ\text{C}$ , limite actuellement bon nombre d'applications.

Signalons aussi que les aimants à base de terres rares (Sm-Co et Nd-Fe-B), du fait de leur faible résistance à l'oxydation et à la corrosion en atmosphère humide, sont recouverts d'une couche d'aluminium ou d'époxy.

### II.3 Aimantation des aimants [ 4 ]

$\Rightarrow$  le champ d'aimantation doit être appliqué parallèlement à la direction d'anisotropie du matériau.



L'utilisation de l'un au l'autre dépend de la coercivité de l'aimant. Dans le premier cas le flux est canalisé dans l'entrefer, dans le second cas, non (l'aimantation est produite par l'intermédiaire d'une bobine).

⇒ influence du champ démagnétisant sur l'aimantation d'un aimant

	$\mu_0 M_s$	$H_{sat}$ (A/m)	Excitation nécessaire H (A/m)
AlNiCo orienté courant; $H_c = 48$ kA/m	1,4T	2000	9000
“ ” à fort $H_c$ ; $H_c = 120$ kA/m	1,1T	4000	9500
Ferrite de Baryum ; $H_c = 200$ kA/m	0,45T	10000	12500

$$H = H_{sat} + |H_d| \text{ avec } H_d = -NM_s \text{ (N=0,5)}$$

⇒ influence des courants de Foucault

Si l'aimantation est réalisée par champ pulsé, des courants de Foucault peuvent apparaître dans les matériaux conducteurs et par conséquent le champ externe à appliquer sera d'autant plus fort que le temps d'aimantation est bref.

### III Critères de choix d'un aimant

#### III.1- Récapitulation des paramètres d'un aimant

aimant	paramètres de qualité : $M_s, M_r, H_c^J$
	paramètres de performances : $(-BH)_{max}$ (et $(-BH)_{max}^{idé al} = B_r^2 / 4\mu_0$ ), $B_r, H_c^B$ et $H_k$

#### matériau

paramètres intrinsèques de la phase principale  $\Phi$ :  $M_s^\Phi$ , les  $K_i$  (ou  $H_{anisotopie} = \frac{2K_i}{\mu_0 M_s^\Phi}$ ),  $T_c$ .

Paramètres de microstructure: -  $\Phi\%$  (proportion de phase  $\Phi$  dans le matériau définitif)  
 -  $O\%$  ( $=M_r/M_s$ ); largeur de la distribution des axes de facile aimantation des grains  
 - compacité (rapport des densités expérimentale et théorique  $d/d_0$ )

#### III.2- Valeurs typiques, à température ambiante, des paramètres des principaux aimants

	$B_r$ (Tesla)	$\mu_0 H_c^J$ (Tesla)	$\mu_0 H_c^B$ (Tesla)	$(-BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$(-BH)_{max}^{idé al}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_c$ (°C)	$\mu_0 H_k$ (Tesla)	Dureté Vickers	Résistance à l'oxydation	Résistance à la corrosion
Aciers durs martensitiques $Fe_{93.8}C_{0.7}Mn_{0.5}W_5$	1.05	-	0.007	2.65	219	-	-	-	-	-
Alliages ductiles: ex: $Pt_{77}Co_{23}$	0.68	-	0.43	75	92	500	-	-	-	très bonne (-->médical)
AlNiCo: colonnaire (par cristallisation dirigée) anisotrope(24%Co)	1.4	-	0.075	60	390	860	-	-	bonne	moyenne
isotrope	1.2 0.7	-	0.07 0.063	40 13	286 98	-	-	-	-	-
Ferrites	0.4	0.39	0.32	27	31.8	460	-	-	bonne	bonne
$SmCo_5$	0.98	2.5	0.95	190	191	730	1.5	560	moyenne	médiocre
Nd-Fe-B	1.3	1.38	1.19	320	336	310	1.25	500-600	médiocre	médiocre

N.B.: Les différences entre énergies spécifiques réelle et idéale sont d'autant plus faibles que l'aimant a une perméabilité proche de  $\mu_0$  à  $10^3$  près (cas des ferrite,  $SmCo_5$  et Nd-Fe-B).

#### III.3- Choix des aimants suivant les impératifs de volume, de température d'utilisation, de prix et facilité de mise en forme

propriétés désirées	matériaux	applications type
volume réduit --> $(-BH)_{max}$	terres rares	matériel embarqué, micro-électronique
résistance à la désaimantation --> $H_c^J$ élevé	terres rares ferrites de Strontium	moteurs, accouplement, répulsion, aimants minces
$B_r$ élevé	AlNiCo - terres rares	capteurs

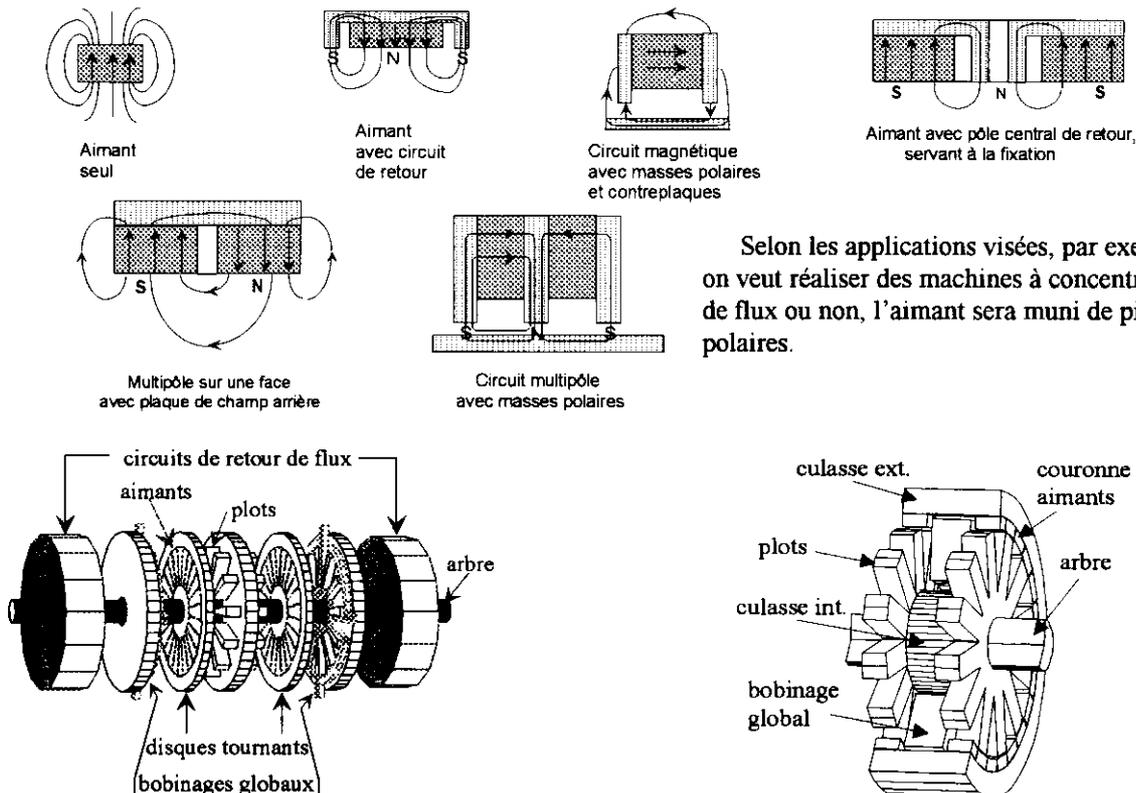
stabilité en température	Ferrites : -0.2 % / °C sur $B_r$ : > 0 sur $H_k$ (intéressant) AlNiCo : <b>-0.02 % / °C sur <math>B_r</math></b> Sm-Co : -0.045 % / °C sur $B_r$ : -0.25 % / °C sur $H_k$ Nd-Fe-B : -0.11 % / °C sur $B_r$ : -0.5 % / °C sur $H_k$	appareils de mesure
solidité mécanique	AlNiCo Nd-Fe-B (par compression dans une matrice époxy)	pièces exposées
formes (plats, souples...)		supports courbes
formes complexes	composites injectés	applications (aimant+mécanique)
économie	ferrites	fixation, moteurs,....

	ferrites	AlNiCo	Sm-Co	Nd-Fe-B
<b>prix (F/kg)</b>	35	200	3000	2000
<b>température maximale d'utilisation (°C), valeurs typiques</b>	< 400	< 450	200	150

En résumé, les AlNiCo sont réputés pour leur excellente tenue en température (maintien des performances de l'aimant en température, propriété recherchée dans le domaine de l'instrumentation et dans les applications au-delà de 150°C). Les ferrites durs sont plutôt choisis pour leur meilleur rapport qualité - prix. Son emploi est très répandu, mais totalement inadapté aux applications où les contraintes de température et d'encombrement sont prédominantes. Quant aux aimants à base de terres rares, ils possèdent le produit énergétique le plus élevé. Relativement chers, ils sont réservés à des applications spécifiques où l'encombrement est le paramètre majeur.

Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que la stabilité en température de  $H_C^J$  et  $H_k$  est d'un facteur 10 moindre que celle de  $B_r$  et par conséquent il faut impérativement surveiller de très près ce problème qui peut, rappelons le, aboutir à la destruction éventuelle de l'appareillage et donc nuire à la sûreté de fonctionnement de l'installation générale.

#### III.4- Forme des circuits magnétiques [ 5 ]



Selon les applications visées, par exemple si on veut réaliser des machines à concentration de flux ou non, l'aimant sera muni de pièces polaires.

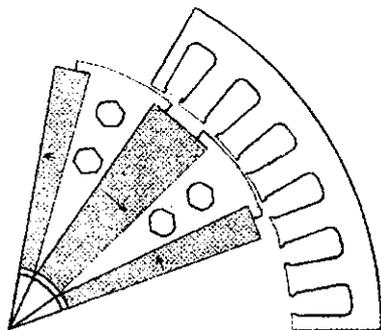
Machine à aimants axiaux alternés polydiscoïde

Machine à aimants radiaux alternés cylindrique monophasée

**Exemples de machines hybrides conçues par l'Equipe Conception d'Actionneurs du LESiR-URA CNRS 1375**

### III.5- Problème de désaimantation des aimants

Le problème de désaimantation se pose dans le contexte de fort champ dans les machines à concentration de flux, dû à l'effet réactif et à la réaction d'induit. Pour l'éviter, il faut soit utiliser des aimants à forte coercivité soit utiliser des aimants *bi-qualité* constitués d'un collage, onéreux, de deux nuances très différentes (une à champ coercitif très élevé pour la partie soumise à la réaction d'induit, l'autre à forte induction rémanente et plus faible champ coercitif pour améliorer le flux); signalons que ces derniers ont été abandonnés depuis 1990 au profit des matériaux ferrites mono-qualité haut de gamme.



*Structure synchrone à aimants orthoradiaux avec pièces polaires*

En pratique, c'est la connaissance du champ critique  $H_k$  qui conditionne le dimensionnement de machines électriques intégrant des aimants. Dans les machines sans pièce polaire au rotor, le champ au stator peut atteindre des valeurs importantes, notamment localement en face des dents statoriques, des champs transversaux à la direction de l'aimantation de l'aimant peuvent provoquer sa rotation. Par contre, dans les structures à aimants orthoradiaux, les pièces polaires rendent les champs vus par les aimants plus homogènes et limitent les effets démagnétisants locaux.

Dans le cadre du GDR (groupement de recherches) sur la sûreté et la disponibilité des systèmes électrotechniques dont la création date de cette année, des études sur la désaimantation des aimants dans les machines à double excitation font actuellement l'objet d'un projet

commun aux deux laboratoires le LESiR de l'ENS Cachan et l'IGE de Belfort.

### III.6- Actions de recherche sur les aimants

D'après un rapport de synthèse du CNRS, les principaux laboratoires participant dans le domaine des matériaux magnétiques durs sont les laboratoires de cristallographie et Louis Néel de Grenoble, le Laboratoire de Magnétisme et d'Optique de Versailles, l'Université Claude Bernard de Lyon, l'École des Mines de Saint Etienne, le département de Métallurgie de l'Université de Rouen.

Les axes de recherche qui y sont actuellement développés sont:

- Amélioration des propriétés d'aimants,
- Poudres coercitives,
- Nouveaux matériaux,
- Aimants en couche mince,
- Modélisation des processus de renversement d'aimantation,
- Développement de systèmes tels que les microsystèmes.

### Références bibliographiques

[ 1 ] P.Brissonneau Hermès	Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique, collection
[ 2 ] J.F. Herbst, J.J. Croat	JMMM, <u>100</u> , 1991, p.57
[ 3 ] Le Prince-Ringuet	Techniques de l'Ingénieur, D2100
[ 4 ] S. Brassard	Journées SEE mai 1996
[ 5 ] ARELEC	documentation technique

# ETUDE ELECTROMAGNETIQUE DE CONTACTEURS EN REGIME D'ALIMENTATION CONTINUE ET ALTERNATIVE

Layachi KHIRAT, Marie MONTREDON Lycée polyvalent Mansart, 78210 Saint-Cyr l'Ecole, 01 30 45 12 34

*Fruit de la collaboration d'un enseignant de Génie Electrique et d'un enseignant de Physique Appliquée, ce texte de TP tente de faciliter un " apprentissage plus efficace de la physique comme de l'ingénierie électrique " dans le domaine délicat de l'enseignement des lois de l'électromagnétisme.*

*Les élèves ne savent pas retrouver ces lois dans les systèmes industriels qui les utilisent : nous avons souhaité leur montrer que les problèmes posés en électrotechnique par l'utilisation d'électro-aimants de commande et les solutions apportées sont intimement liés aux lois fondamentales présentées dans le cours de physique appliquée.*

*Ce texte est adaptable à toutes les sections où interviennent le Génie Electrique et la Physique Appliquée.*

## I/ OBJECTIFS DU TP

Le Tp s'adresse à des étudiants de niveau TGE ; il vise à aborder les notions suivantes :

- étude de cycles de fonctionnement sur un circuit magnétique présentant deux états différents (circuit ouvert, circuit fermé).
- établissement du courant dans un circuit inductif, en alimentation continue et en alimentation sinusoïdale.
- grandeur électrique de commande de l'état magnétique.
- courant de maintien et résistance d'économie.
- forme du courant en alimentation sinusoïdale d'un circuit magnétique saturé, et déphasage courant/tension.
- puissance apparente à l'appel et au maintien.
- calculs d'impédance et d'inductance
- distinction appareils de mesure RMS et RMS vraie.
- utilisation en monocoup d'un oscilloscope à mémoire, et enregistrement sur table traçante.
- lecture d'un schéma électrique, repérage des bornes (schéma et câblage) en relation avec le schéma de câblage.

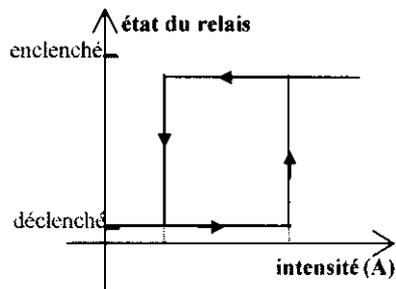
## II/ ELECTRO-AIMANTS EN CONTINU

**II-1) Etude du cycle de fonctionnement** : il s'agit ici de montrer le lien entre l'état de l'électro-aimant et l'intensité, qui est la grandeur électrique de commande ; on utilise un électro-aimant de type relais ILS.

Après avoir recherché le principe de fonctionnement, et prédéterminé l'allure du cycle de fonctionnement, les étudiants proposent un montage permettant de relever ce cycle.

On fait relever la valeur du courant, notée  $I_+$ , qui provoque l'enclenchement du relais lorsque la tension d'alimentation augmente, et on s'attache à la comparer à la valeur nominale du courant.

De même, on complète l'étude du cycle à tension d'alimentation décroissante, en repérant la valeur de l'intensité (notée  $I_-$ ) pour laquelle le relais se déclenche.



**II-2) Etude de l'insertion d'une résistance d'économie** : sur un support magnétique plus conséquent, à savoir un contacteur, on se propose de reprendre l'étude précédente et de la compléter par l'analyse du rôle de la résistance d'économie que nécessite généralement l'utilisation industrielle des contacteurs à courant continu.

Le cahier des charges imposé est le suivant :

- commande d'une bobine de contacteur sous 24 V ou 48 V à partir d'un interrupteur bi-stable
- insertion d'une résistance réglable d'économie (rhéostat) après l'enclenchement du contacteur
- par un bornier, raccordement à la platine d'essais de cette résistance d'économie, fonction des caractéristiques de la bobine
- alimentation de la bobine par un bornier.

Pour satisfaire ce cahier des charges, les étudiants doivent d'abord réaliser le schéma de principe et le schéma développé correspondant (symboles, repères normalisés).

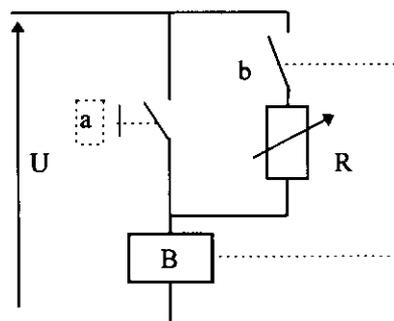
Ils fournissent ensuite une liste de matériel, et proposent un dessin d'implantation du matériel.

Une fois le matériel monté sur platine d'essais, selon le schéma ci-contre, ils câblent l'équipement et font les essais de bon fonctionnement.

**Remarque :** Le rhéostat faisant office de résistance d'économie doit être choisi de manière à permettre une intensité minimale de l'ordre du dixième du courant nominal  $I_n$ .

Après avoir réalisé le montage complet, les étudiants règlent le rhéostat à sa valeur minimale, et mettent le montage sous tension : ils repèrent l'état du contacteur, et la valeur de l'intensité.

En augmentant la valeur de R, ils recherchent l'intensité de maintien.



U : tension d'alimentation, 24 V ou 48 V  
R : rhéostat d'économie

### II-3) Etude de l'établissement du courant

On se propose ici d'analyser le régime transitoire d'établissement du courant.

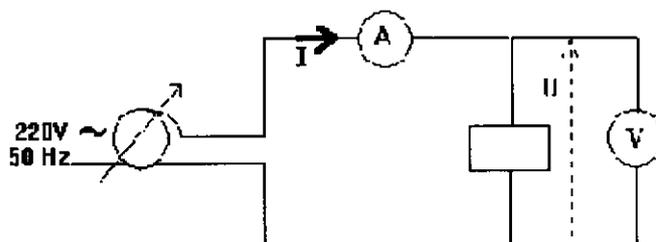
On utilise à cet effet, un oscilloscope à mémoire ; les enregistrements des variations de l'intensité  $i(t)$  et celles de la tension  $u(t)$  à l'établissement sont donnés figure 1 et figure 2.

Ces relevés permettent la détermination du moment de fermeture du contacteur, de la durée de fermeture, et de l'inductance à circuit fermé par mesure de la constante de temps électrique.

## III/ ELECTRO-AIMANTS EN ALTERNATIF.

### III-1) Etude du circuit électromagnétique

Après avoir réalisé le montage ci-contre, en choisissant correctement l'ampèremètre qui doit mesurer la valeur efficace du signal (ferromagnétique, ou électronique "valeur efficace vraie") les étudiants observent les variations de I lorsque U croît de zéro à la valeur maximale de tension d'utilisation autorisée ( $1,1 U_n$ ) : ils relèvent la valeur  $U_+$  de la tension qui provoque la fermeture du circuit magnétique, et l'effet de cette fermeture sur l'intensité.



On s'attachera à analyser ce phénomène, notamment en caractérisant la variation d'impédance provoquée par la fermeture du circuit magnétique : les élèves pourront ainsi justifier la variation brutale de courant observée.

Il est alors intéressant de les amener à une comparaison avec l'observation effectuée sur le courant lors de la fermeture du contacteur utilisé en continu.

On a fait relever les variations de l'intensité efficace I en fonction de U lorsque U varie de 0 à  $1,1 U_n$ , puis lorsque l'on fait décroître la tension (FIGURE 3).

L'analyse de la variation d'intensité observée doit permettre de déterminer les différents états du contacteur, de justifier les états magnétiques du système et donc de conclure sur l'évolution de l'impédance associée à chaque état.

### III-2) Cycles de fonctionnement

L'étude du cycle décrit par le point de coordonnées (U, I) permet la caractérisation des états du circuit magnétique et des commutations assurant le passage d'un état à l'autre.

On établira une comparaison avec l'évolution de ce même point en régime continu.

### III-3) Etablissement du courant

Les variations de l'intensité  $i(t)$  à l'établissement du courant ont été visualisées sur un oscilloscope à mémoire pour deux valeurs de la tension : les enregistrements sont portés figures 4a et 4b.

### III-4) Forme du courant permanent

Pour les deux valeurs précédentes de la tension, les variations du courant établi ont été relevées sur les figures 5a et 5b, et doivent permettre de justifier le choix d'un ampèremètre RMS et de retrouver les notions

## IV/ MATERIEL NECESSAIRE

- interrupteur à lame souple (ILS) ou tout autre petit relais à courant continu, de tension nominale connue
- contacteur à courant continu 24 V ou 48 V (ces tensions facilitent la mise en œuvre du TP dans le respect des normes de sécurité électrique...), câblé sur grille en TP de construction électrique
- documentation technique électrique du contacteur précédent (tension nominale et plage de variation autorisée, résistance, inductance du circuit fermé...)
- rhéostat approprié (voir texte)
- alimentation à courant continue adaptée

- contacteur (ou contacteur auxiliaire) 24 V ~ et sa documentation technique
- autotransformateur réglable de 0 à 27 V (1,1x24 V) de puissance apparente suffisante
- grille de câblage
- fil de câblage
- bornier et lettres de repérage
- ohmmètre (pour contrôle du câblage)
- oscilloscope numérique
- table traçante

## VI/ CONCLUSION

L'approche des phénomènes électromagnétiques nous semble facilitée lorsque l'étude s'appuie sur une expérimentation menée sur du matériel industriel relativement simple permettant l'illustration des principes physiques. Par ailleurs, il nous semble que cette démarche concrète est plus parlante pour des élèves n'ayant que peu de culture dans le domaine.

FIGURE 1

Bobine LX4D12024

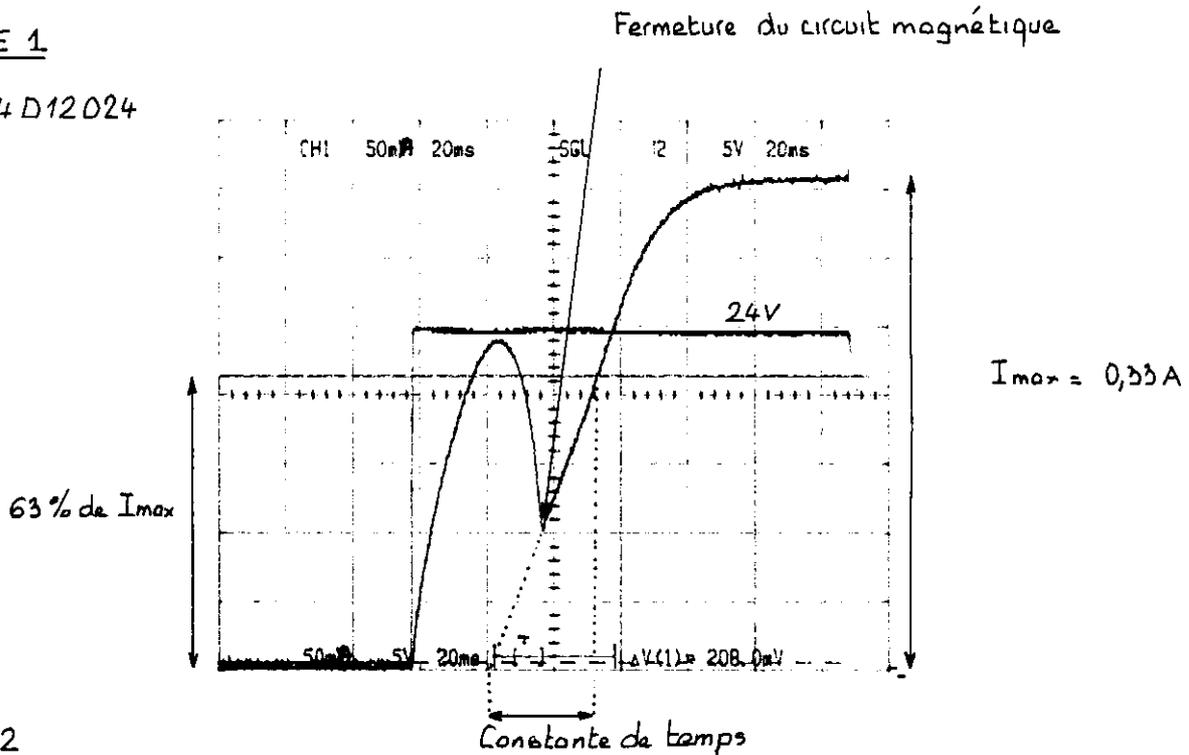
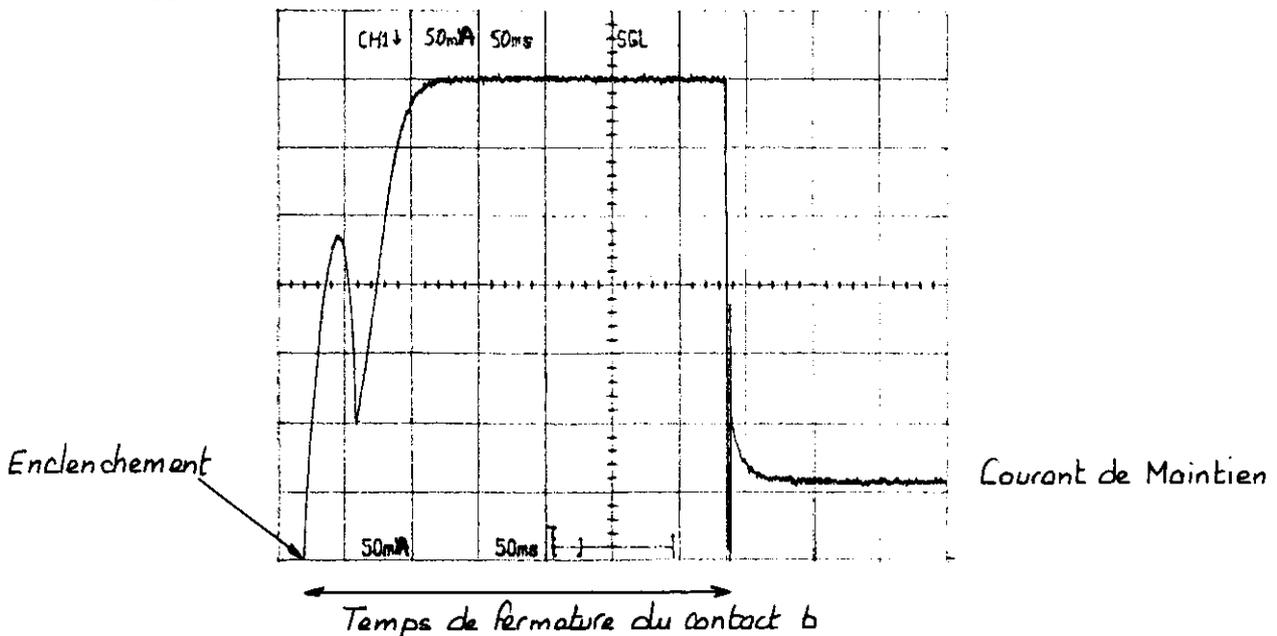
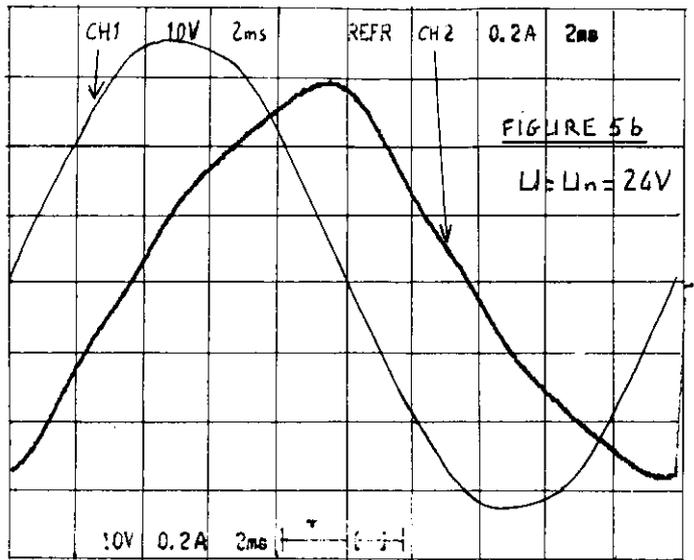
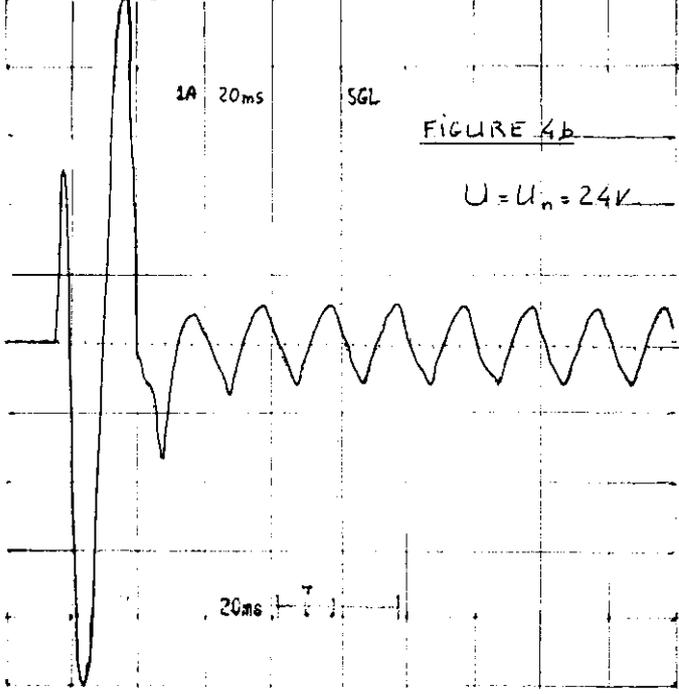
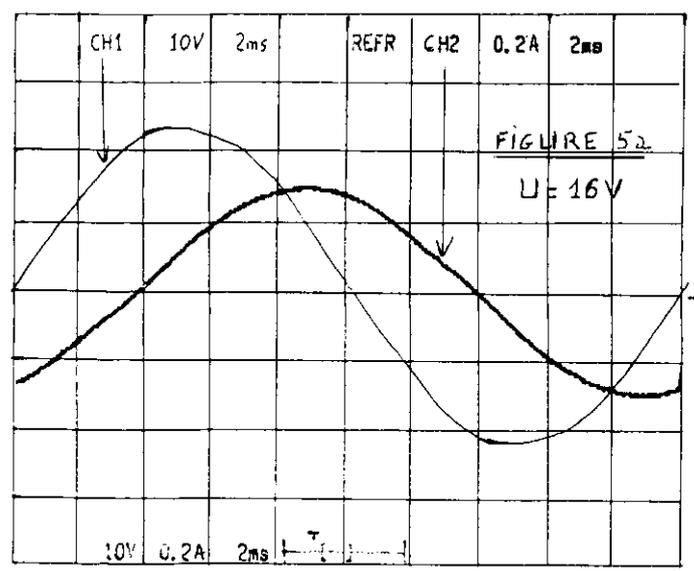
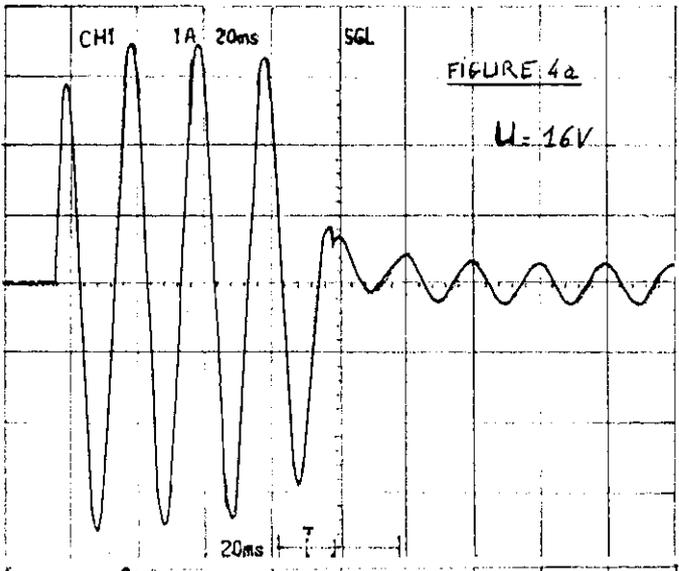
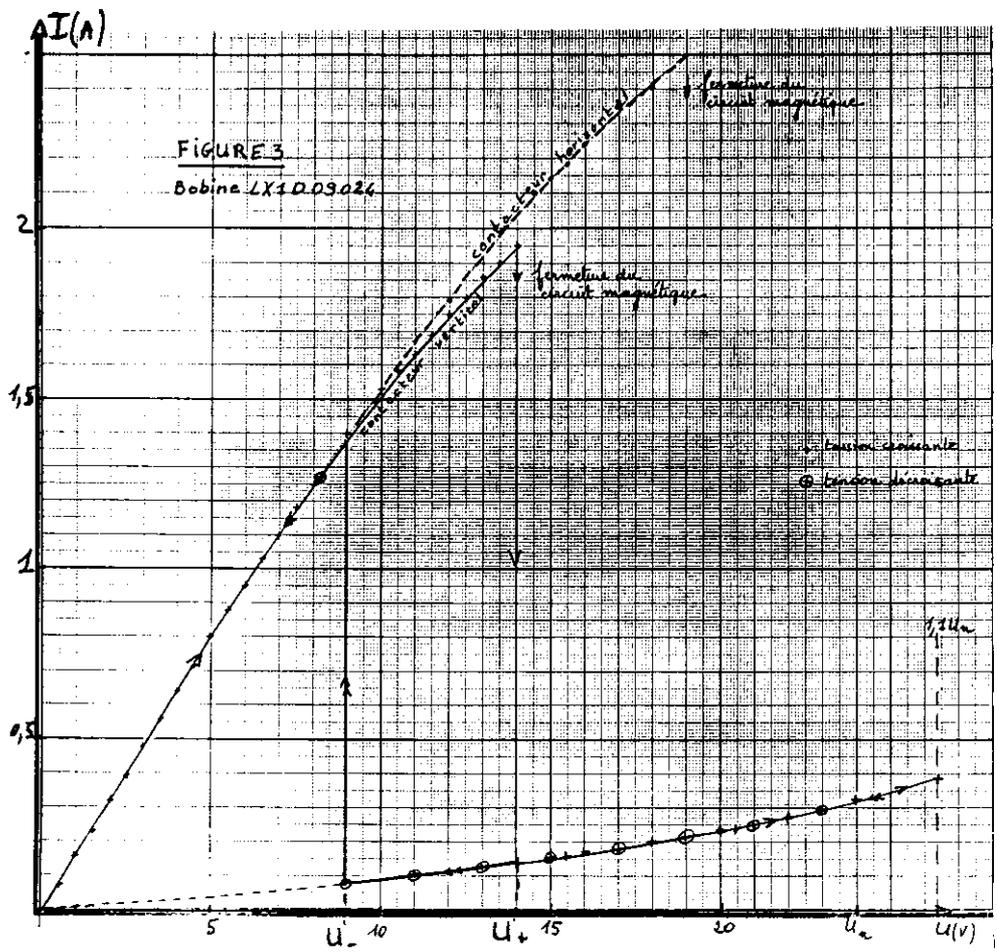


FIGURE 2

Bobine LX4D12024





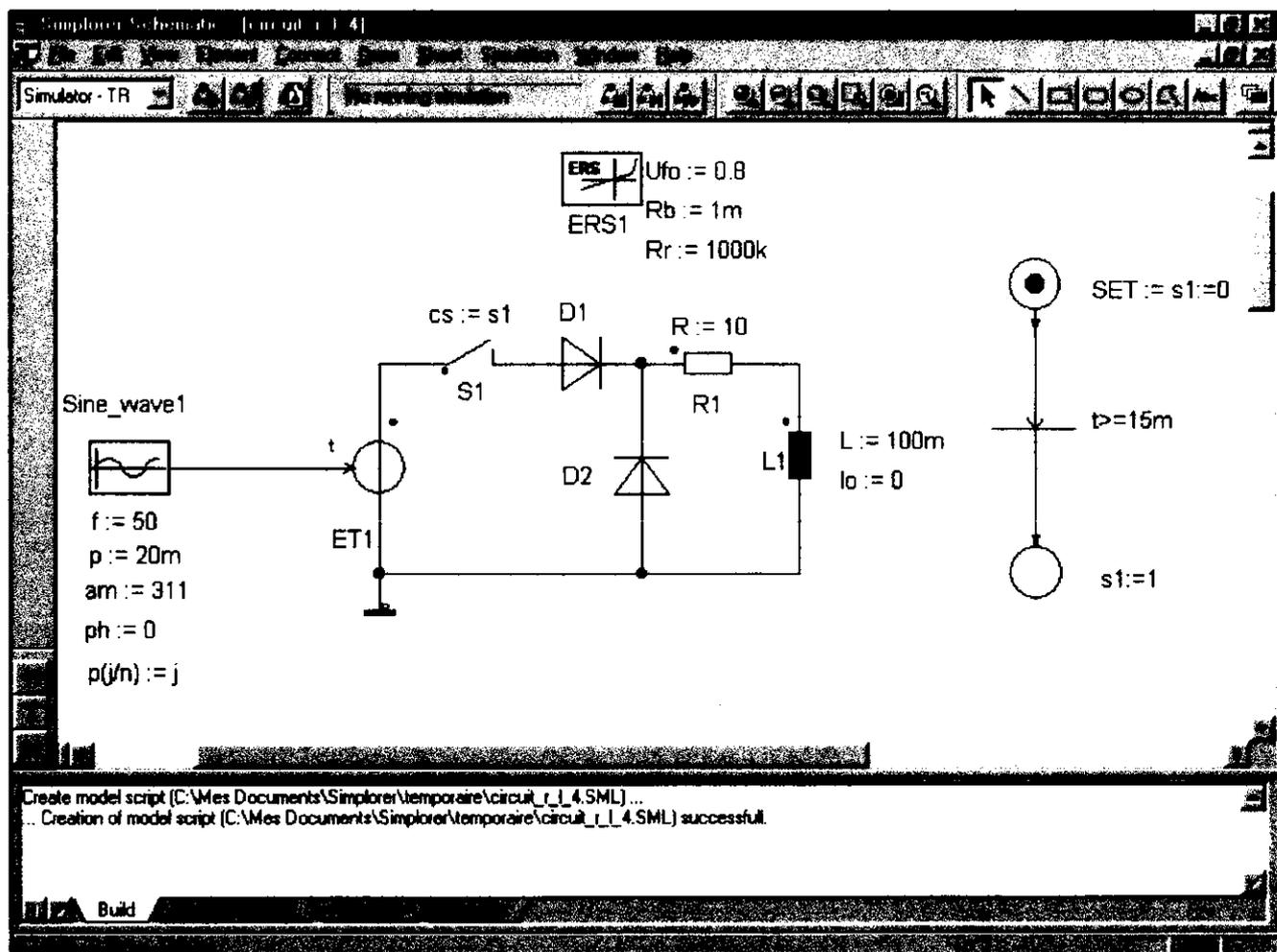
# SIMULATION ELECTROTECHNIQUE avec le logiciel SIMPLORER

Philippe LE BRUN  
Lycée Louis ARMAND  
94736 NOGENT sur MARNE

Le logiciel SIMPLORER permet la modélisation de systèmes hétérogènes à l'aide de circuits électriques, de blocs fonctionnels et de graphes d'état (système de représentation temporelle proche du GRAFCET). Chaque langage de description est associé à un simulateur autonome, l'échange d'informations logiques et énergétiques ainsi que la synchronisation entre simulateurs sont gérés par un algorithme dédié. La description des problèmes peut être conduite de manière interactive, à l'aide d'un éditeur graphique ou d'un éditeur de texte. La gestion des simulateurs est prise en charge par des modules externes lors de l'exécution de tâches de multi-simulation, d'étude de sensibilité, d'optimisation ou d'analyse fréquentielle par balayage. Les modèles de description, ainsi que certaines fonctionnalités destinées à faciliter l'analyse d'un problème de simulation, sont brièvement présentés ci-dessous.

## circuits électriques, graphes d'état et blocs fonctionnels

Les circuits électriques sont décrits à l'aide de composants discrets ayant des propriétés spécifiques (résistances (ci-dessous  $R1 = 10 \Omega$ ), capacités, inductances (ci-dessous  $L1 = 1 \text{ H}$  et  $I_0 = 0 \text{ A}$ ), éléments semi-conducteurs, sources indépendantes ou contrôlées (ci-dessous ET1 contrôlé par Sine\_wave1 de fréquence 50 Hz, de périodicité 20 ms, d'amplitude 311 V, de phase à l'origine 0 et périodique), composants non linéaires ou gérés par des expressions...). Lors de l'analyse de dispositifs à semi-conducteurs, plusieurs modèles, de complexité croissante, sont disponibles (interrupteur idéal (ci-dessous S1 dont l'état dépend de la variable binaire s1), modèle statique (ci-dessous D1 et D2 diodes caractérisées par ERS1 tension de seuil Ufo de 0,8 V

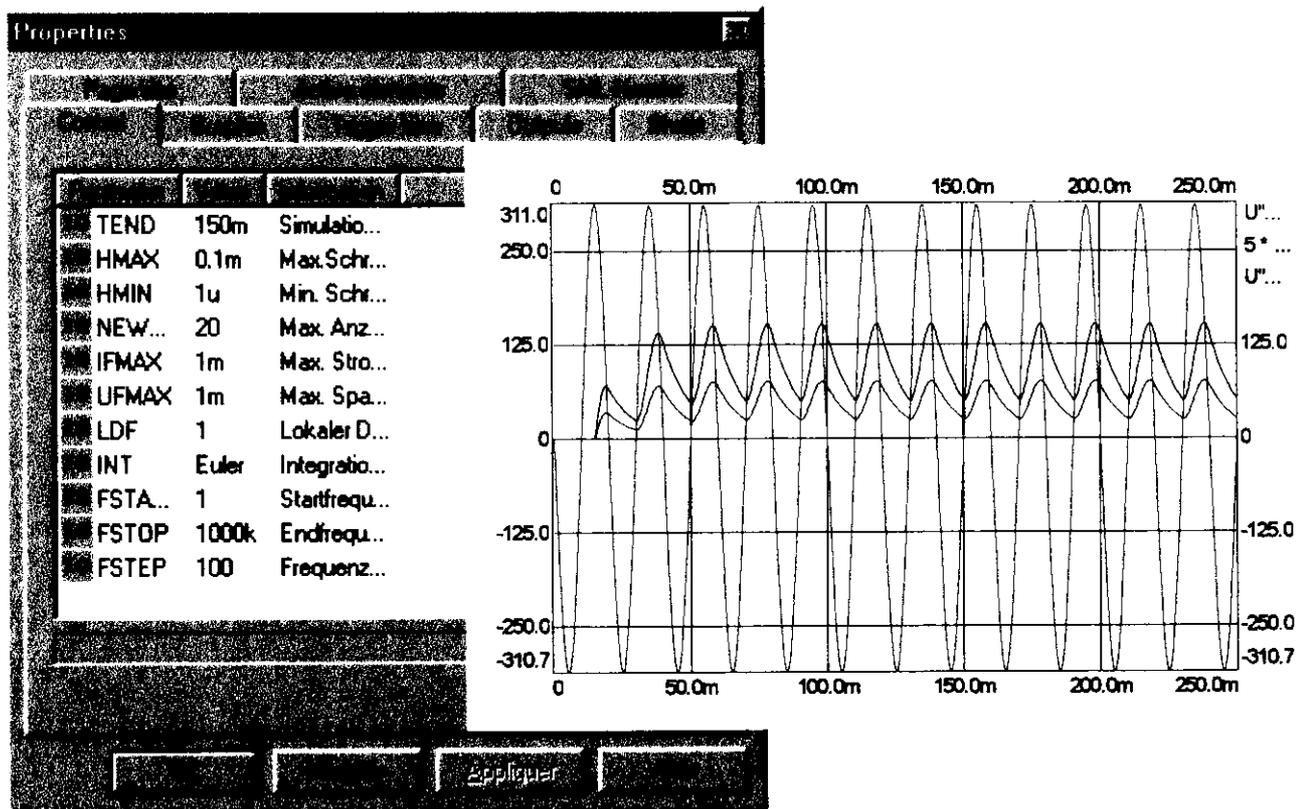


résistance à l'état passant  $R_b$  de  $1\text{ m}\Omega$  et résistance à l'état bloqué  $R_r$  de  $1000\text{ k}\Omega$ ) et dynamique). Par ailleurs, le logiciel comprend une bibliothèque de macro-composants (machines électriques, transformateurs, amplificateurs opérationnels, convertisseurs de fréquence...) que l'utilisateur peut compléter à l'aide de ses propres modules.

Les **graphes d'état** permettent d'effectuer diverses tâches en cours de simulation (génération de signaux de commande de semi-conducteurs (ci-dessus la commande de l'interrupteur S1 ouvert (0) jusqu'à  $t = 15\text{ ms}$  puis fermé (1) à partir de cet instant), observation du système, création de modèles non-linéaires ou hystérétiques...). Le comportement du système est décrit par un ensemble d'états caractérisés par des actions à exécuter et reliés par des connexions orientées. Les états actifs sont dits marqués. Le passage de la marque d'un état actif à l'état suivant a lieu dès que la condition correspondant à la connexion entre ces deux états est remplie (dépassement d'une valeur-seuil d'un courant, intervention de l'opérateur,...). Les actions associées à un état donné sont exécutées lorsque cet état devient actif. Elles peuvent être de différentes natures (fermeture d'un transistor, modification du comportement d'un composant, temporisation, affichage d'un texte à l'écran).

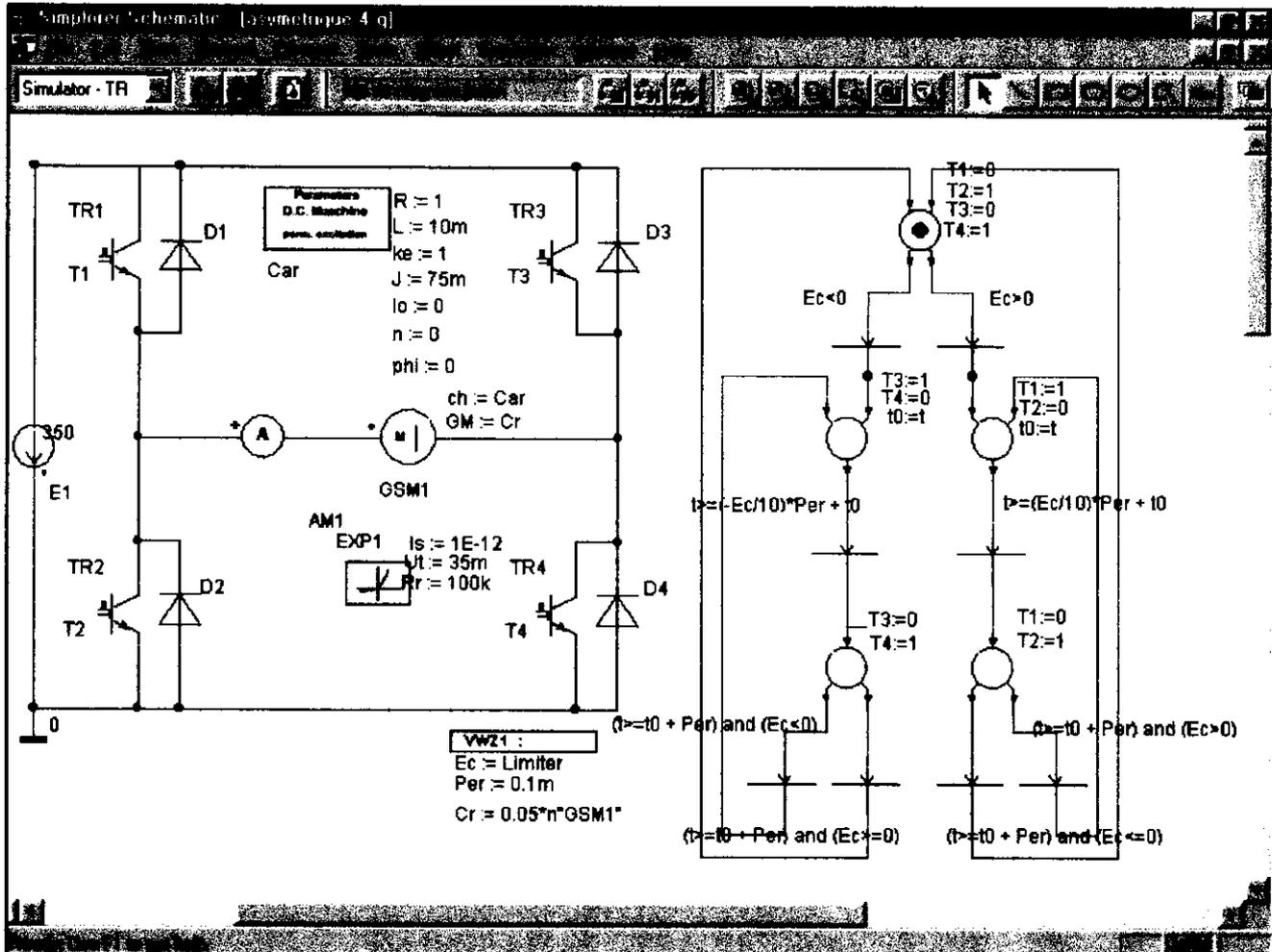
La description par **schéma-bloc** consiste en un arrangement de blocs définis par un comportement temporel ou une relation entre l'entrée et la sortie de chaque bloc. Elle est caractérisée par un transfert d'information unidirectionnel et par l'absence d'interactions entre blocs. Généralement appliquée à l'analyse de boucles de réglage analogique (ci-dessous les boucles d'asservissement de courant et de vitesse pour un hacheur 4 quadrants à commande asymétrique) et digital, elle est également bien adaptée lorsque l'analyse fonctionnelle est privilégiée.

Les paramètres de la simulation sont accessibles d'un clic de souris ; cela permet de choisir la durée de la simulation TEND, les pas maxi. et mini. HMAX ET HMIN, les erreurs maxi. sur les courants et sur les tensions IFMAX et UFMAX ainsi que les paramètres de l'analyse fréquentielle FSTART, FSTOP et FSTEP. Les résultats de simulation apparaissent dans des fenêtres qu'il est possible de paramétrer (couleurs échelles décalages zoom...) un module de traitement complémentaire permet d'effectuer un traitement mathématique des résultats (produit, somme, intégration, différentiation, puissance, XY, lissage numérique, FFT...) Voici ci-dessous les paramètres de simulation (fenêtre Properties) et un résultat de simulation.



L'intégration de langages de description basés sur des circuits électriques, des blocs fonctionnels et des graphes d'état dans un même environnement permet de créer un outil très pédagogique de modélisation de systèmes électriques hétérogènes. Les différentes parties du système peuvent être décrites à l'aide de modèles adaptés aux phénomènes physiques étudiés. Il est ainsi possible d'appliquer une description basée sur des circuits électriques lorsqu'une analyse fine est désirée, une approche par schéma-bloc lorsque l'analyse fonctionnelle se révèle plus appropriée et une approche par graphe d'état lorsqu'une approche temporelle est nécessaire.

**Exemple : Hacheur à commande asymétrique**

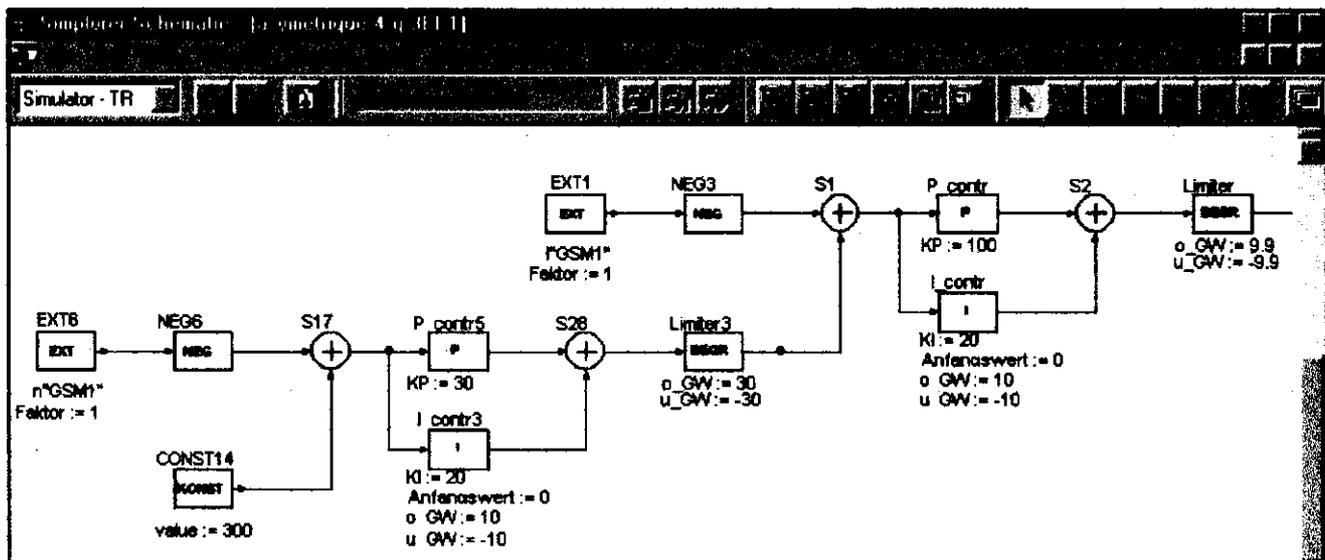


Le schéma électrique met en œuvre des semi-conducteurs D1 à D4 et TR1 à TR4 caractérisés par EXP1

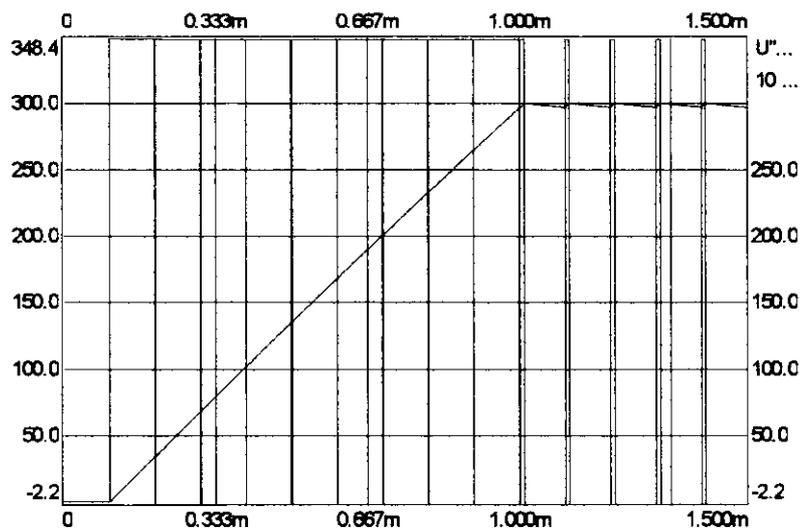
$$(i(t) = I_s(e^{\frac{v(t)}{U_t}} - 1) \text{ pour } v(t) \geq 0 \text{ et } i(t) = \frac{v(t)}{R_r} \text{ pour } v(t) < 0).$$

La commande des transistors TR1 à TR4 est faite respectivement par T1 à T4 (contrôle de type binaire 0 : transistor ouvert sinon transistor fermé). La machine à courant continu est caractérisée par sa résistance d'induit, son inductance, sa constante de FEM et son inertie; on devra également préciser le courant initial, la vitesse initiale et la phase initiale. La machine se voit imposer un couple de charge défini par la relation  $Cr = 0,05 \times n \times \text{GSM1}$ . Des appareils de mesures peuvent être placés sur le schéma comme cet ampèremètre mesurant le courant moteur.

Le graphe d'état utilise ici exclusivement des actions effectuées une seule fois à l'entrée dans l'état (T1=1 : fermeture de TR1, T2=0 : ouverture de TR2 et  $t_0=t$  : initialisation de la variable  $t_0$ ). Les transitions sont franchies lorsque l'expression associée est valide. La période du hacheur  $Per$  et la tension de commande  $Ec$  sont défini dans le bloc VWZ1. Limiter est la sortie du schéma fonctionnel réalisant les asservissements de courant et de vitesse.



Ci-dessus le schéma fonctionnel des asservissements du hacheur précédent. Le prélèvement des grandeurs observées se fait par un bloc EXT permettant la mesure des grandeurs du schéma électrique. La boucle de limitation du courant (fixée à 30 A) avec correcteur PI et limiteur à 99% du rapport cyclique donne les résultats ci-contre : Montée du courant dans la machine sous pleine tension puis limitation de celui-ci à 30 A (échelle 10) pendant la phase de montée en vitesse. La boucle de vitesse viendra ensuite positionner la consigne de la boucle de courant de sorte que couple moteur égale couple résistant à la vitesse désirée.



Cet exemple ainsi que d'autres (machine asynchrone en U/f, alimentation à absorption sinusoïdale, redressement commandé...) seront présentés durant la session POSTER des journées 3EI 1999 les 11 et 12 mars 1999.

Le produit SIMPLORER malgré quelques imperfections (plantage et quelques fonctions non implémentées dans la version 4.01) recèle un potentiel très intéressant dans le domaine de la simulation électrotechnique et me semble promis à un bel avenir dans nos section BTS électrotechnique.

Pour tous renseignements ou version d'évaluation

Société CEDRAT  
 M<sup>r</sup> Lionel GRAND  
 10, chemin de pré Carré – Zirst  
 38246 MEYLAN Cedex – France  
 email : [grand@cedrat-grenoble.fr](mailto:grand@cedrat-grenoble.fr)  
 tel : 04 76 90 50 45

LE BRUN Philippe  
 Lycée Louis ARMAND  
 136 Bd de Stasbourg  
 94736 NOGENT SUR MARNE  
 email : [Florence.Vadee@Wanadoo.fr](mailto:Florence.Vadee@Wanadoo.fr)  
 tel : 01 45 14 28 52

# UN VARIATEUR DE VITESSE POUR M.A.S. A CONTROLE VECTORIEL DE FLUX POUR QUOI FAIRE ?

**Patrick BRUNET et Jean Claude FORTIN**  
**LTEG Henri Brisson**  
**18100 VIERZON CEDEX**

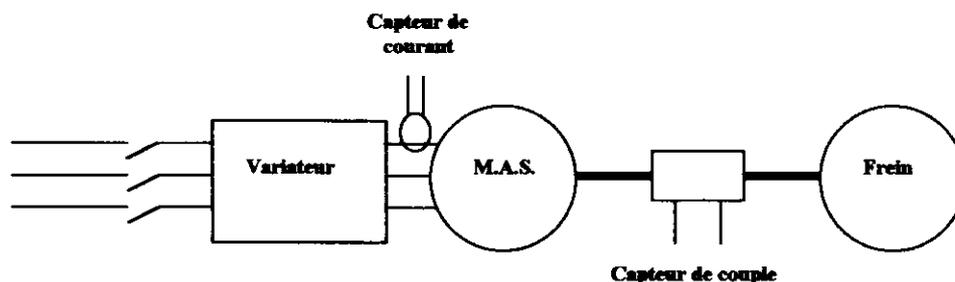
Tous les fabricants de variateur de vitesse, qu'ils soient industriels ou bien distributeurs de matériel à usage pédagogique proposent des variateurs pour machine asynchrone. Historiquement, sont apparus sur le marché des variateurs dit à «  $U/f = \text{constante}$  » et plus récemment les variateurs à contrôle vectoriel de flux avec ou sans capteur.

Aujourd'hui *contrôle vectoriel* fait mode et il faut être prudent car sous l'argument commercial se cache peut-être un convertisseur à  $U/f = \text{constante}$  amélioré...

Au-delà de cet aspect purement commercial, on peut se poser la question de ce que l'on peut présenter à des étudiants BAC+2 en Electrotechnique pour qu'au moins ils aient une idée des performances comparées des différents types de variateurs, ceci pour leur permettre de faire un choix judicieux de matériel en fonction de l'application à mettre en œuvre. Ainsi, s'il s'agit de démarrer tous les matins un moteur asynchrone sans faire varier sa vitesse le recours au contrôle vectoriel serait stupide !

La présentation théorique du variateur en  $U/f$  ne pose pas de problème à partir de la modélisation classique de la M.A.S. pour nos étudiants. Par contre, détailler la théorie du contrôle vectoriel de flux ne nous semble pas à la portée d'étudiants BAC+2 en tous cas dans le cadre habituel du programme de BTS Electrotechnique. Par contre, il est possible de mettre en évidence de façon expérimentale les performances comparées de plusieurs variateurs.

Les résultats expérimentaux présentés ci-dessous ont été obtenus à partir du schéma de principe suivant :



On dispose d'un réseau triphasé 220V/50 Hz .

Le moteur (CEGELEC) a une puissance nominale de 1.5 KW, un courant nominal de 6.4 A et une tension nominale de 220 V.

Le couple développé par le moteur est mesuré par un couplemètre « Torquemaster » dynamique de marque vibro-meter. Son étendue de mesure est de +/- 100 N.m. Il dispose de 2 sorties analogiques permettant d'obtenir :

- une image de la **vitesse de rotation** avec un facteur d'échelle de 10 V pour 10000 tr/mn,
- une image du **couple instantané** avec un facteur d'échelle de 5 V pour 100 N.m.

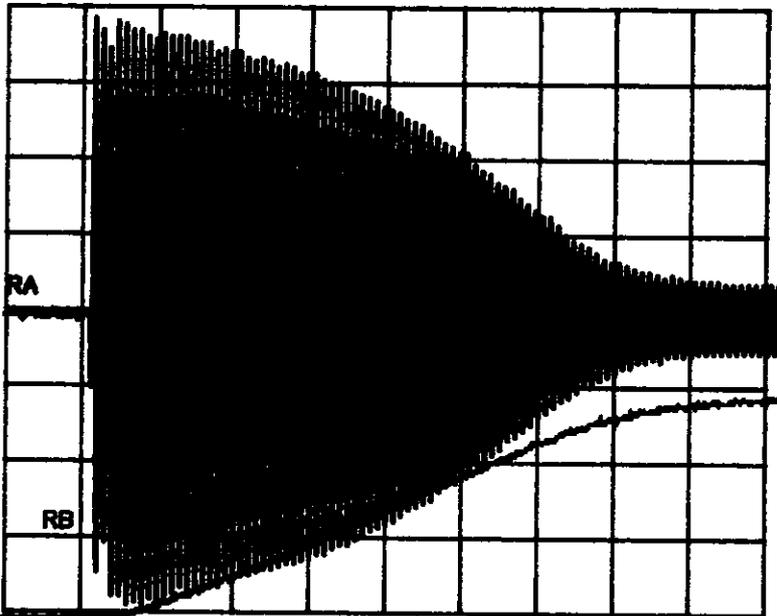
Il est installé entre le moteur et un frein à courant de Foucault utilisé ici uniquement en charge inertielle.

Enfin un **capteur de courant** permet de visualiser le courant fourni par le variateur avec un facteur d'échelle de 1 V pour 10 A.

# 1. DEMARRAGE DIRECT DU MOTEUR

Il est obtenu en fermant de disjoncteur de tête et en supprimant le variateur. On a limité par un autotransformateur la tension réseau à 190 V pour ne pas saturer le moteur.

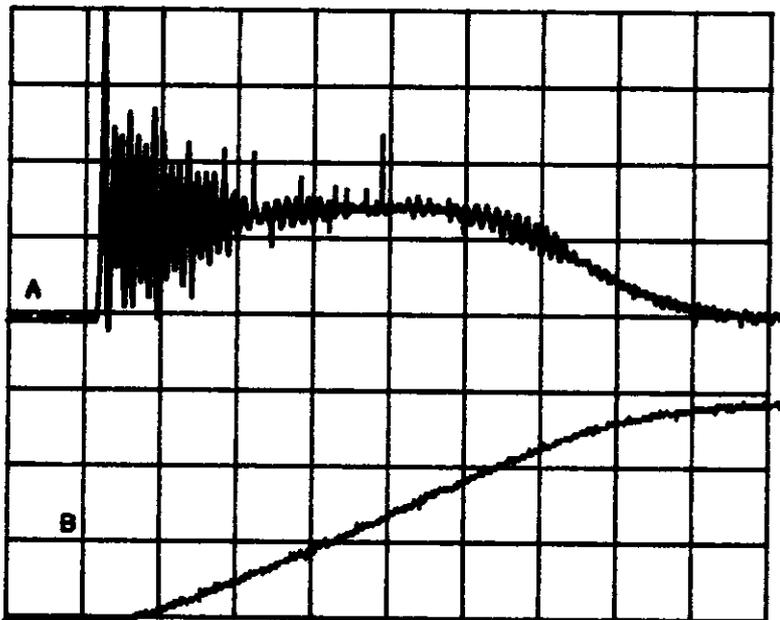
RA= 1 V RB=0.5 V RTB= 0.2 • RTD= 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du courant moteur (voie RA) et de la vitesse (voie RB).

On note le classique appel de courant lors de la mise sous tension du moteur (valeur instantanée maximale de 40 A environ). Il serait évidemment encore plus grand sous la tension nominale de 220V. La montée en vitesse est quasi linéaire au début du démarrage. La durée de mise en vitesse (environ 2 s) est déterminée par l'inertie totale autour de l'arbre de rotation le moteur n'étant pas chargé. La vitesse atteinte est proche de 1500 tr/mn (vitesse de synchronisme), le moteur étant à vide.

A=0.5 V B=0.5 V TB= 0.2 • TD= 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du couple instantané (voie A) et de la vitesse (voie B).

On note les oscillations du couple instantané lors de la mise sous tension pendant une durée de 0.6 s. Ainsi le couple instantané monte à 40 N.m alors que le couple nominal du moteur est de l'ordre de 10 N.m. Bien sûr, ces oscillations seraient encore plus importantes sous tension nominale.

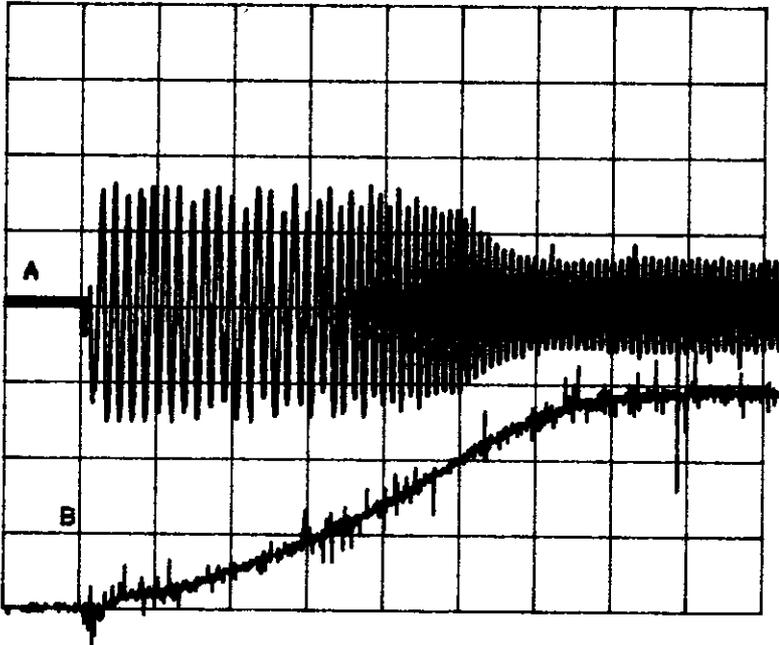
*Il est important de bien noter ces oscillations car le choix du couplemètre dynamique devra être fait à partir de celles-ci et non du couple nominal sous peine de destruction lors d'un tel démarrage.* (On pourra se reporter au numéro 1 de décembre 1994 de la revue 3EI pour justifier les oscillations de couple à partir du modèle du moteur).

A la fin de la phase de démarrage, le couple s'annule puisque le moteur n'est pas chargé.

## 2. DEMARRAGE AVEC UN VARIATEUR A $U/f = \text{constante}$

On utilise directement le réseau 220 V. Le variateur utilisé est un Varial VNTA de CEGELEC. La limitation de courant a été réglée à 150% du courant nominal de 6 A du variateur. Aucune rampe d'accélération n'a été imposée. La consigne de vitesse a été réglée à 1500 tr/mn.

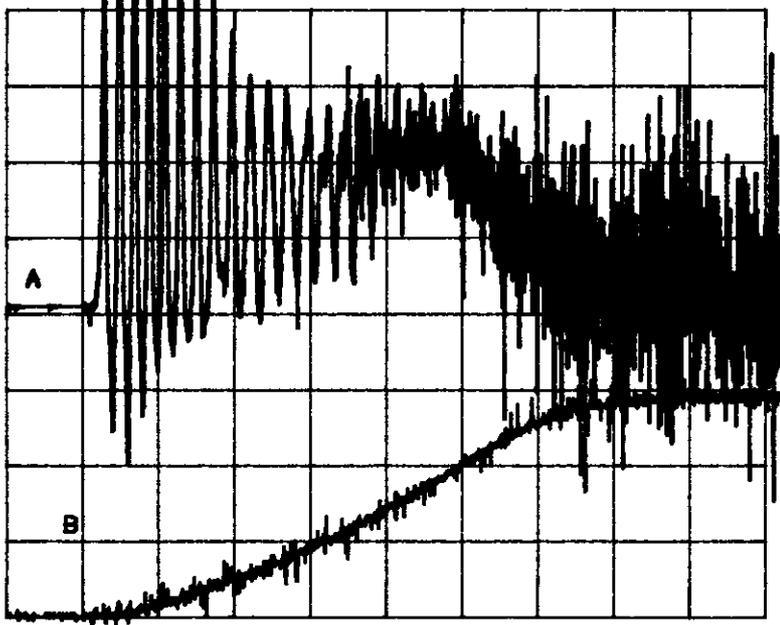
A= 1 V B=0.5 V TB= 0.2 s TD= 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du courant moteur (voie A) et de la vitesse (voie B).

L'appel de courant au démarrage est bien maîtrisé par le réglage de la limitation en courant du variateur. La montée en vitesse est un peu plus rapide que lors du démarrage direct car on fonctionne ici à tension nominale.

A=0.5 V B=0.5 V TB= 0.2 s TD= 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du couple instantané (voie A) et de la vitesse (voie B).

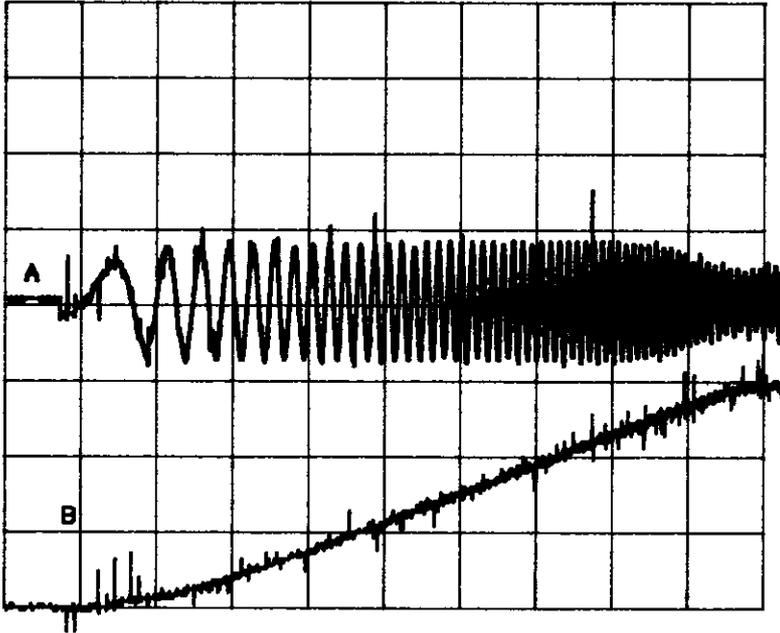
On note que les oscillations du couple instantané n'ont pas disparues bien au contraire. Le variateur à  $U/f = \text{constante}$  de par son principe (contrôle scalaire) *n'est pas apte à maîtriser le couple instantané*. Il faut que les régimes transitoires électriques aient disparu pour qu'il puisse convenablement travailler.

Le signal issu du couplemètre est parasité sur la dernière partie de l'oscillogramme. Nous pensons que ceci est dû au découpage MLI de la tension fournie par le variateur qui rayonne sur le câble du couplemètre (problème de CEM).

### 3. DEMARRAGE AVEC UN VARIATEUR A CONTROLE VECTORIEL DE FLUX

On utilise directement le réseau 220 V. Le variateur utilisé est un Variat VNTV de CEGELEC. La limitation de courant a été réglée à 150% du courant nominal de 6 A du variateur. Aucune rampe d'accélération n'a été imposée. La consigne de vitesse a été réglée à 1500 tr/mn. Le codeur incrémental installé en bout d'arbre du moteur doit être raccordé sur le variateur.

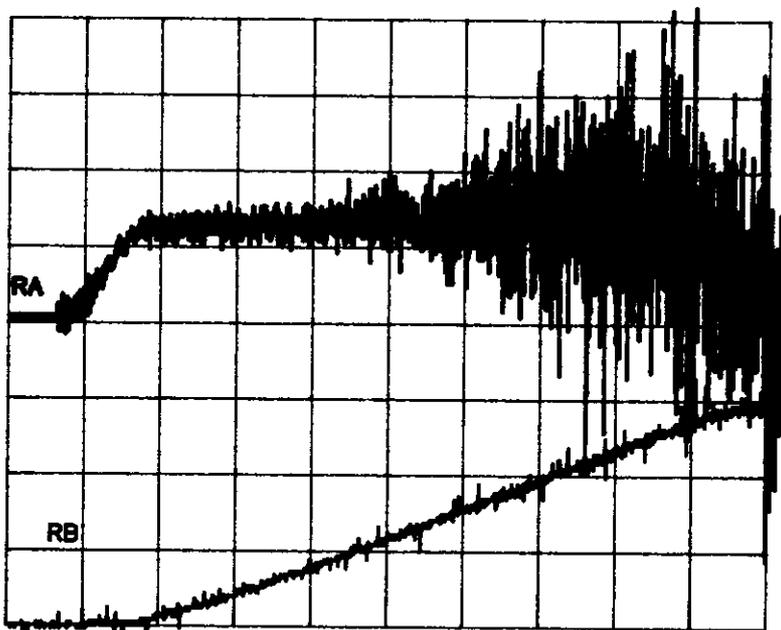
A= 1 V B=0.5 V TB= 0.2 s TD=- 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du courant moteur (voie A) et de la vitesse (voie B).

L'appel de courant au démarrage est maîtrisé et l'on peut noter l'évolution progressive de la fréquence délivrée par l'onduleur du variateur au cours du démarrage.

RA=0.5 V RB=0.5 V RTB= 0.2 s RTD=- 10



L'oscillogramme ci-contre représente l'évolution du couple instantané (voie RA) et de la vitesse (voie RB).

On note que les **oscillations du couple instantané ont cette fois disparues lors du démarrage**. Le contrôle vectoriel de flux permet donc de traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur précédent.

Le variateur à contrôle vectoriel de flux *est apte à maîtriser le couple instantané*. Bien sûr cela se « paie » puisque le codeur permettant de repérer la position du rotor du moteur doit être raccordé.

## 4. CONCLUSION

Nous n'avons pas abordé ici le cas des démarreurs de moteurs qui sont utilisés pour limiter l'appel de courant lors de la mise sous tension. Bien-sûr, ils ne sont pas faits pour contrôler le couple instantané.

**Les 3 relevés précédents mettent en évidence les spécificités de chaque famille de variateur de vitesse et les performances que l'on peut en attendre. Ils doivent permettre de décrypter les catalogues constructeur.**

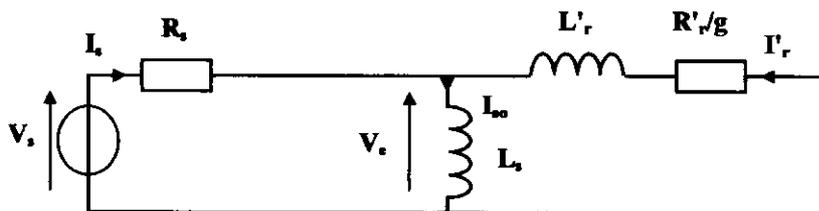
Prenons l'exemple de l'altivar 66 proposé par Schneider. Il s'agit d'un variateur de vitesse pour moteur asynchrone présenté avec 2 options.

Dans la version de base, le constructeur indique une « *gamme de vitesse de 1 à 20* ». Cela signifie que si la vitesse de synchronisme est de 1500 tr/mn, le constructeur garantit les performances de  $1500/20 = 75$  tr/mn jusqu'au synchronisme.

Il s'agit alors d'un variateur à  $U/f = \text{constante}$  qui possède plusieurs lois de commande en  $U/f$  suivant les applications souhaitées (couple constant ou variable). Y figurent également quelques améliorations possibles comme la *compensation « RI »* qui permet de ne pas négliger l'influence de la résistance statorique (\*) et la *compensation de glissement (\*\*)*. On parle alors de variateur à  $E/f = \text{constante}$ . Mais, il ne faudra pas lui demander de performances au-dessous de 75 tr/mn.

Toutefois, il existe une option dite « *SFVC* » : *sensorless flux vectoriel control* en Anglais ou *contrôle de flux sans capteur* en français, qui permet de faire passer la « *gamme de vitesse de 1 à 100* ». On pourra donc descendre jusqu'à 15 tr/mn. L'algorithme de commande de l'onduleur est plus complexe que dans le cas d'une commande en  $U/f$  classique, mais il n'est toujours pas question de demander du couple à l'arrêt c'est à dire à vitesse nulle.

Si l'application l'exige, on passera alors à l'altivar 66 à contrôle vectoriel *avec capteur* (il s'agit d'un capteur de position du rotor : codeur incrémental). La carte de commande doit alors être adaptée pour recevoir et traiter les informations du codeur. Dans ce cas la « *gamme de vitesse passe de 1 à 1000* ». Avec un tel produit, il est alors possible d'exiger du couple à l'arrêt, mais il aura fallu en payer le prix en rajoutant le codeur à la facture !



(\*) : La commande en  $U/f$  se justifie à partir du schéma équivalent classique de la machine asynchrone en négligeant la résistance statorique. Si l'approximation est bien justifiée à grande vitesse ( $R_s I_s$  négligeable devant la tension  $V_s$ ), elle ne l'est plus à petite vitesse puisque  $R_s I_s$  garde à peu près la même valeur alors que  $V_s$  est beaucoup plus faible ( $U/f = \text{cte}$ )

(\*\*) : La compensation de glissement permet de mieux maintenir la vitesse constante du moteur entre un fonctionnement à vide et un fonctionnement en charge. La fréquence de l'onduleur est alors supérieure en charge pour tenir compte du glissement.

# Evaluation du niveau de protection des varistances à Oxyde de Zinc , utilisées comme éléments de parafoudre.

**O.MOKHTARI    M.AZIZI**

C.R.E.S.T.O. Ecole Supérieure de Technologie Université Mohammed I

E-mail :mokhtari @ est .univ-oujda.ac.ma

BP.473 Hay El Qods OUJDA MAROC

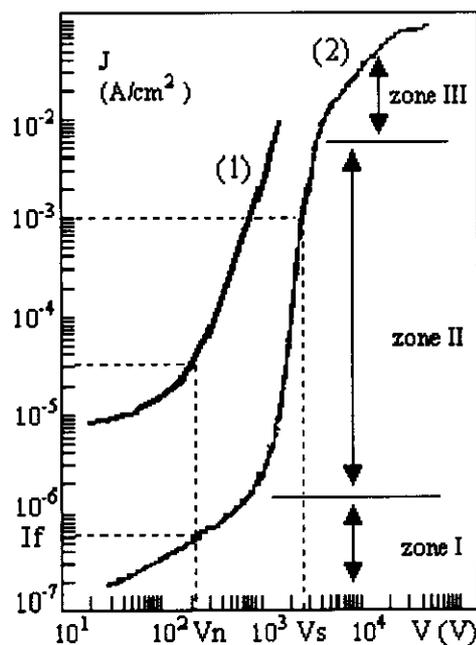
Fax : 212(06) 74 47 51

## INTRODUCTION

Une varistance est un dipôle dont la résistance décroît fortement au fur et à mesure que la tension augmente; ce matériau appartient à la classe des céramiques.

A l'origine ces varistances étaient composées essentiellement de carbure de silicium , mais depuis quelques années on utilise avantageusement les varistances à base d'oxyde de zinc .

La figure 1 donne le tracé de la caractéristique densité de courant-tension  $J$  (V) pour les deux types de varistances . Remarquons tout d'abord que les varistances à base d'oxyde de zinc présentent une caractéristique très abrupte dès que l'on dépasse la tension de seuil notée  $V_s$ . La valeur de le pente  $d\text{Log } J / d\text{Log } V$  peut atteindre et même dépasser 50 , ceci en fonction du procédé de fabrication utilisé .



(1) : Varistance au carbure de silicium

(2) : Varistance à l'oxyde de zinc

Fig.1 Caractéristiques courant-tension des deux types de varistances.

La caractéristique  $J(V)$  des varistances à base d'oxyde de zinc présente trois zones, comme le montre la figure 1.

Zone I : Région ohmique où la résistance reste pratiquement constante, la conduction dans cette zone varie exponentiellement avec la température car elle est de type thermo-électronique suivant la loi  $J = AT^2 \exp[-qV_b(V) / kT]$ , où  $A$  représente une constante,  $T$  la température,  $q$  la charge élémentaire,  $k$  la constante de Boltzmann et  $V_b$  la hauteur de barrière, localisée aux joints de grains dépend étroitement de la tension [ 1 ]. Le coefficient de température est alors défini comme étant le rapport  $\Delta V/V \times 1/\Delta T$ , sa valeur est négative et généralement inférieur à  $-5.10^{-2} / ^\circ C$ .

Zone II : Région à caractéristique non linéaire où la résistance chute brutalement, le courant est exprimé par la loi empirique  $J=kV^\alpha$ , où  $k$  représente une constante ( dépendant de la géométrie de la pièce et de la technologie utilisée ) et  $\alpha$  le coefficient de non linéarité. L'effet de non linéarité sera d'autant plus prononcé que la valeur de ce dernier coefficient sera élevée.

Zone III : Région de saturation dépendant essentiellement de la résistance des grains de ZnO, et donc du mode de dopage de ces grains. La résistance dynamique dans cette région reste à peu près constante.

Le tableau 1 [ 1 ] permet de faire la comparaison entre les principales propriétés de ces deux types de céramiques.

	ZnO	SiC
Structure	Polycristal	Polycristal
$J=f(V)$	Symétrique par rapport à l'origine	Symétrique par rapport à l'origine
Coefficient de non linéarité $\alpha = d \log J / d \log V$	25 à 50	3 à 7
$[1/\Delta T] \cdot [\Delta V / V]$	$< -0.05$	-0.1
Densité de courant de fuite	environ $10^{-7} A/cm^2$	environ $10^{-4} A/cm^2$
Temps de réponse	14 à 20 ns	700 à 900 ns

Tableau 1 : Principales caractéristiques des varistances à base d'oxyde de zinc et de carbure de silicium.

### Quelques définitions

On définit :

- La tension résiduelle  $V_r$  comme étant la tension restante aux bornes de la varistance lorsque celle-ci est soumise à une surtension ; pour simuler l'onde de foudre, la varistance est soumise à une onde de  $8\mu s$  de temps de montée et  $20\mu s$  de temps de descente (fig2), le courant absorbé pendant cet intervalle de temps est de  $5000A$  [ 2 ], on mesure ainsi  $V_r$ .

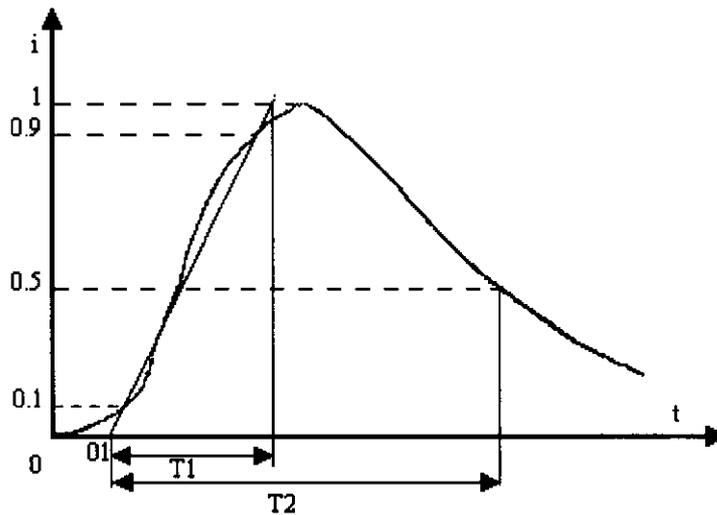


Fig. 2 Choc de courant normalisé 8/20 $\mu$  s .

- Le rapport  $V_r/V_s$  , comme étant le critère de qualité , il permet de connaître la surtension supportée par le dispositif à protéger pour une onde de courant donné , Pour les échantillons sur lesquels nous avons travaillé , ce rapport est compris entre 1.7 et 1.9 pour une onde 8/20 $\mu$ s et un courant de 5000 A .
- Le temps de réponse comme étant celui correspondant aux mécanismes de conduction propres aux semiconducteurs , on l'appelle aussi temps de réponse intrinsèque . Cependant ce temps de réponse se trouve modifié pour plusieurs raisons :
  - . Capacité parasite de l'élément dûe aux couches isolantes intergranulaires .
  - . Phénomène de "dépassement" apparaissant lorsque la varistance est soumise à une tension présentant un front de montée très rapide (fig . 3 ) et entraînant une pointe de tension dynamique supérieure de quelques % à la tension statique .
  - . Impédance du circuit extérieur à la varistance .

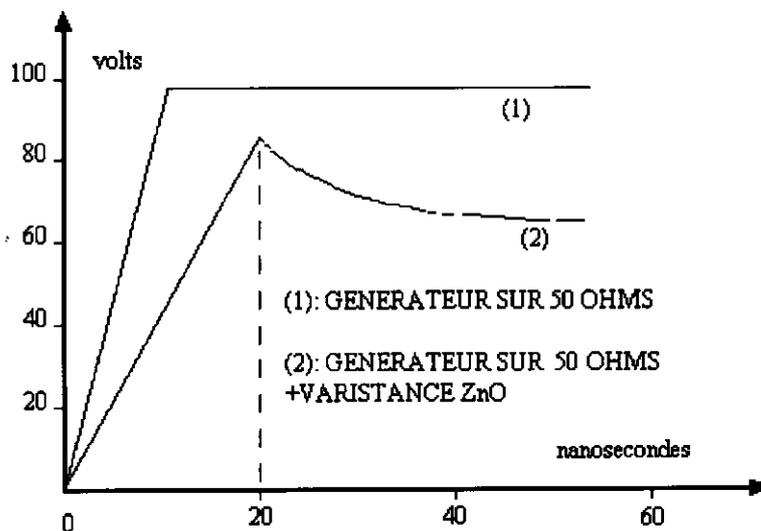


Fig.3 Temps de réponse d'une varistance à oxyde de zinc .

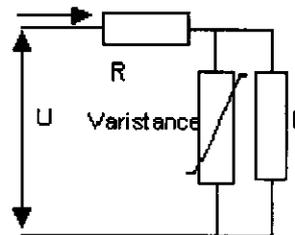
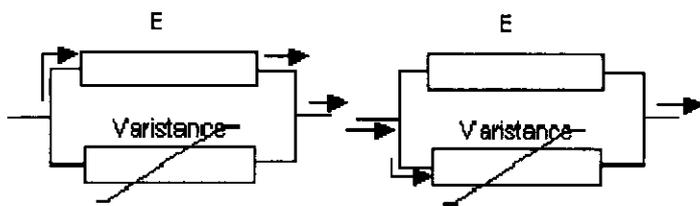
On distingue sur la courbe de la figure 1 un certain nombre de grandeurs intéressantes pour les applications qui sont :

- \* La tension de seuil notée  $V_s$  , pour laquelle la densité de courant est de  $10^{-3}$

ampères par  $\text{cm}^2$ .

\* Le courant de fuite noté  $I_f$  correspondant à la tension de service  $V_n$ , celle-ci peut être quelconque, néanmoins on la fixe généralement à  $0.8 \times V_s$  en régime continu, entre  $0.55$  et  $0.65 \times V_s$  en régime sinusoïdal.

Les varistances à base d'oxyde de zinc, principaux constituants des parafoudres, sont principalement utilisées comme éléments de protection de composants ou d'équipements électriques soumis à des perturbations électriques d'origine accidentelle ou de manœuvre [2]. La fonction protection est liée à la caractéristique non linéaire  $J=f(V)$  de la varistance. Cet élément est toujours monté en parallèle sur l'ensemble à protéger (fig. 4c). A l'état de repos la varistance présente une impédance élevée (plusieurs dizaines de mégohms) vis à vis de l'élément à protéger et ne modifie en rien les caractéristiques du circuit électrique (fig.4a). En présence d'un transitoire la varistance présente alors une impédance très faible (1 à 2 ohms) et court circuité l'élément à protéger (fig.4b).



## CONTRAINTES APPLIQUEES AUX MATERIELS ET DIFFERENTS TYPES DE SURTENSIONS

Les contraintes électriques appliquées aux matériels et installations ont des origines variées. Ces contraintes se caractérisent par des ondes de courant ou de tension dont l'amplitude est le plus souvent inversement proportionnelle à la durée. Les ondes de très grandes amplitudes sont généralement de courte durée [2].

Ces contraintes sont habituellement classées en trois catégories :

- Les surtensions d'origine atmosphérique (coup de foudre).
- Les surtensions de manœuvre (ouverture et fermeture de circuits).
- Les surtensions temporaires (mise à la terre d'une phase).

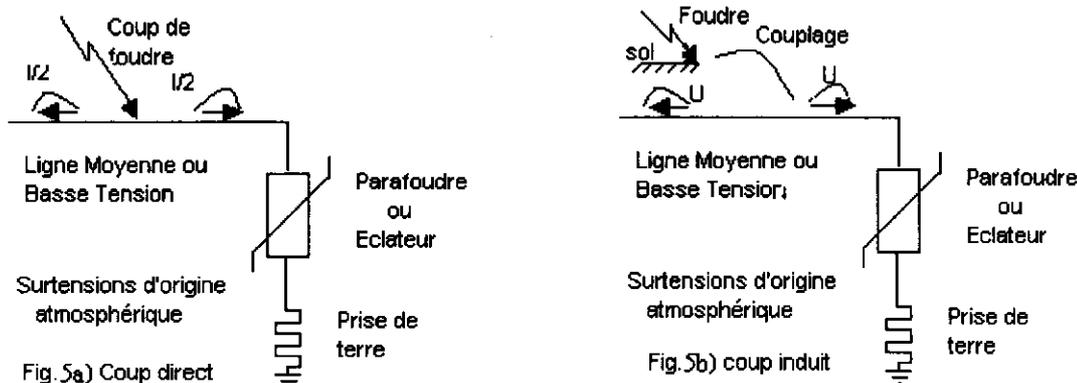
a) Les surtensions d'origine atmosphérique

Deux types de surtensions de foudre peuvent affecter une ligne ou une installation :

- \* le coup de foudre direct (fig.5a)
- \* le coup de foudre indirect (fig.5b) frappant le sol au voisinage immédiat de l'installation.

Dans le premier cas, le coup de foudre (fig.5a) entraîne une onde de tension dont la valeur instantanée est  $V(t)=Zi(t)/2$ . L'onde de courant associée est d'une amplitude de quelques kA à environ 100 kA, sa vitesse de croissance se situe entre  $10\text{kA}/\mu\text{s}$  et  $80\text{kA}/\mu\text{s}$  avec un spectre de fréquence s'étalant de 20 kHz à 1 MHz [2].

Dans le cas du coup de foudre indirect (fig 5b), l'écoulement du courant à la terre entraîne une élévation de potentiel aux bornes des installations. Ces surtensions peuvent atteindre quelques centaines de kilovolts sur le réseau M.T., prévu pour quelques dizaines de kilovolts.



#### b) Les surtensions de manœuvre.

Les changements de configurations électriques des réseaux de distribution (manœuvre d'interrupteurs ou de disjoncteurs) créent des régimes transitoires se traduisant par des surtensions plus ou moins élevées.

Les principales causes de ces phénomènes transitoires sont :

- les coupures de batterie de condensateurs.
- Les coupures de faibles courants inductifs ou magnétisants.
- La mise sous tension de ligne.

Les surtensions se caractérisent généralement par un échelon de tension d'une amplitude de 1 à 5 fois la tension normale, et d'une durée de quelques millisecondes ; leurs fréquences s'échelonnent entre 50 Hz et 200kHz [ 3].

#### c) Les surtensions temporaires.

Ces types de surtensions se manifestent essentiellement lors de la modification de la configuration du réseau d'alimentation ou lors d'un défaut à la terre. Ces surtensions sont généralement connues et par conséquent « faciles » à prévoir ; les niveaux d'isolement sont suffisants pour résister à ces contraintes. A titre indicatif le niveau d'isolement des matériels d'une installation est de  $2U+1000 = 1500V$  à 50Hz, entre toute partie active et la masse, U représente la tension aux bornes de l'installation.

Dans le cas d'un défaut, ces surtensions peuvent être générées de différentes façons et ont principalement pour origine [ 4 ] :

- 1- le réseau Moyenne Tension, par transmission directe ou par couplage entre les prises de terre.
- 2- le réseau Basse Tension, ou l'installation domestique elle-même.

## ELABORATION DU MATERIAU ET MESURES ELECTRIQUES

### \* Procédé de fabrication des varistances.

Le procédé de fabrication des varistances est semblable à celui utilisé pour la réalisation des céramiques. Les oxydes utilisés se présentent sous forme de poudres, celles-ci sont élaborées en fonction des pourcentages en masse suivants :

ZnO 97% ; Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.5% ; MnO<sub>2</sub> 0.5% ; Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 0.5% ; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.5% ; Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1%.

On procède à un mélange en phase humide afin que l'homogénéisation soit meilleure. La succession des différentes étapes du processus est résumée sur la figure 6.

Le préfrittage du mélange des oxydes, permet de doper le grain de ZnO ; il est réalisé à l'air ambiant à la température de 700°C, suivant un cycle bien défini. Au cours de cette opération

la poudre est plus ou moins agglomérée , ce qui nécessite un second broyage à sec pendant environ 10 heures.

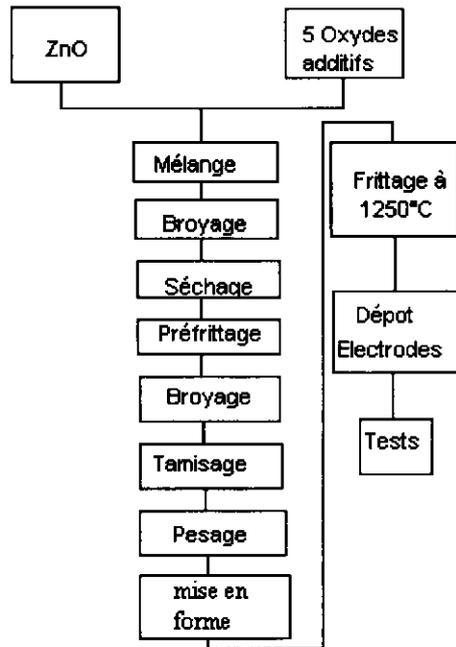


Fig.6 Procédé de fabrication des varistances à oxyde de zinc.

Les échantillons mis en forme à la presse , sont portés au four à une température dite de frittage ( ou de cuisson ) qui suit le cycle représenté sur la figure 7 .

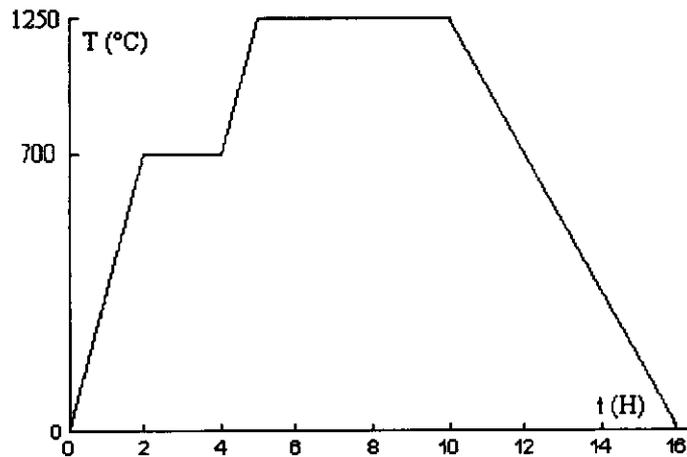


Fig. 7 Cycle de frittage des échantillons.

Le frittage ( ou cuisson des échantillons ) est une opération essentielle dans la fabrication des varistances , elle fait intervenir des transformations physico-chimiques complexes avec interaction des divers constituants . Il en résulte une structure de grains avec joints de grains (fig. 8 ) qui donne l'effet de non linéarité recherché.

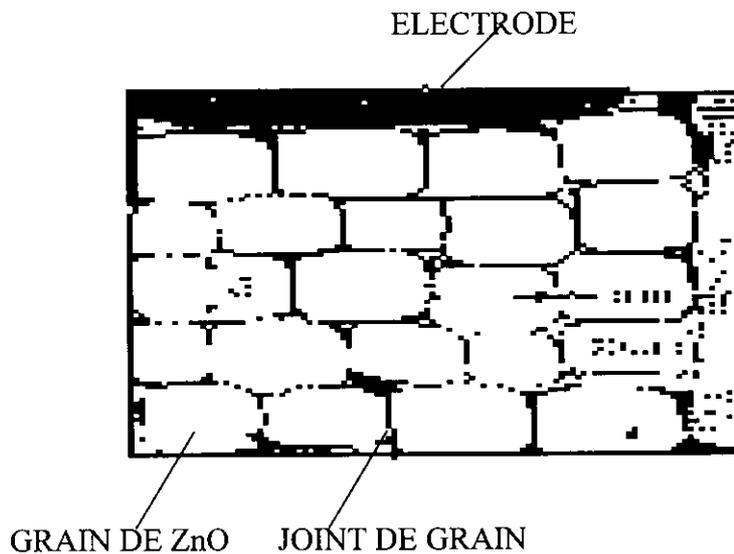


Fig.8 Coupe schématique d'une varistance à oxyde de zinc.

A la fin de l'opération de frittage les échantillons se présentent sous forme de disques de 2mm d'épaisseur et 40mm de diamètre.

• Détermination du niveau de protection.

Afin de déterminer le niveau de protection des varistances étudiées, différents essais ont été effectués.

. Essai en continu.

Les mesures en courant continu ont été réalisées grâce à un banc d'essai automatique (fig.9). Ces essais nous ont permis de tracer les caractéristiques courant-tension. L'organe principal du dispositif expérimental est constitué d'un ordinateur qui commande une alimentation programmable 0-600V ; 0-1.5A , le calculateur relève le courant traversant l'échantillon par l'intermédiaire d'un électromètre programmable et la tension à ses bornes à l'aide d'un voltmètre . Le calculateur mémorise les couples de données V et I et les traite afin de les restituer sur une imprimante thermique . Le banc automatique est utilisé pour des tensions n'excédant pas 600V.

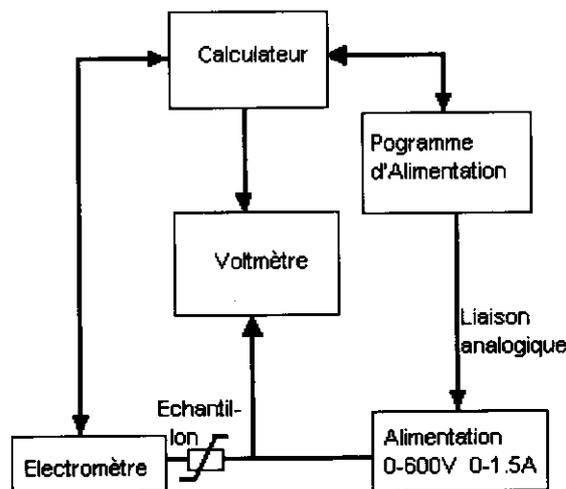


Fig.9 Schéma du dispositif de mesure automatique des caractéristiques J(V) en continu.

. Essai en courants forts.

Afin d'approcher le plus possible la valeur réelle de l'onde générée par la foudre, les valeurs de  $R_c$  et de  $C$  du dispositif utilisé (fig.10) sont calculées de telle manière à obtenir une onde de courant de  $8\mu s$  de temps de montée et  $20\mu s$  de descente à mi-hauteur.

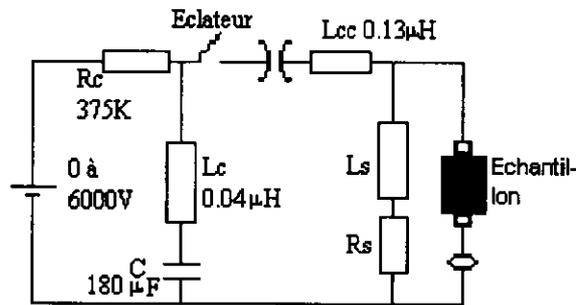


Fig.10 Schéma du générateur de choc onde 8/20µs.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

- on charge la capacité  $C$  au travers de la résistance de charge  $R_c$ .
- On décharge cette même capacité  $C$  dans un deuxième circuit  $R, L$  comportant l'échantillon, pour le calcul du courant dans la varistance, cette dernière est considérée comme une résistance en parallèle sur une capacité. La résolution de ce courant a été faite numériquement en utilisant le logiciel "PSPICE". Pour une décharge d'environ 1800 ampères, l'allure de la tension  $V(t)$  (fig.11) ainsi obtenue présente une forme arrondie, ceci est dû à la non linéarité prononcée de la courbe  $J(V)$  de la varistance.

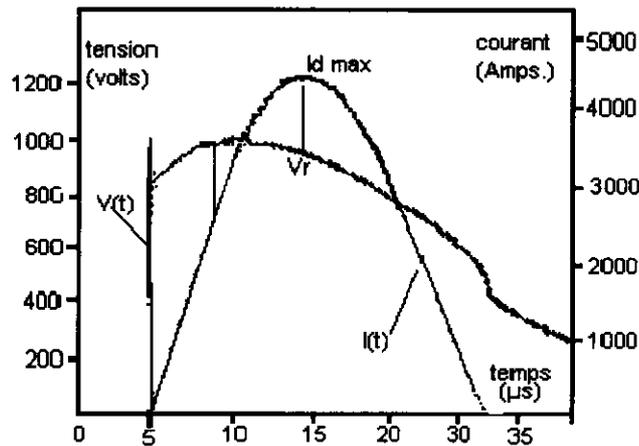


Fig .11 Onde de courant 8/20µs et tension résiduelle résultante.

Plus le coefficient de non linéarité est important plus la tension résiduelle  $V_{rmax}$  est faible et plus le niveau de protection est meilleurs.

Le niveau minimal de protection est obtenu en considérant uniquement le critère de vieillissement, on a alors :

$NP=1000\text{ V à }5\text{ kA et }I_F=1.8 \cdot 10^{-5}\text{ A à }25^\circ\text{ C.}$

La figure 12 donne l'allure de la courbe résultant des mesures effectuées et le résultat par simulation, évaluant ainsi le niveau de protection à 5 kA en onde de courant 8/20µs.

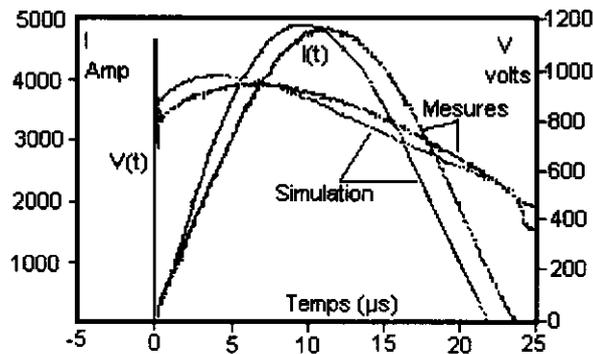
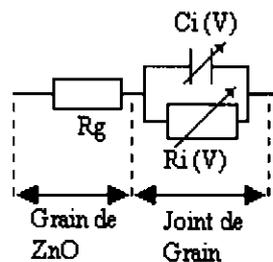


Fig.12 Niveau de protection à 5kA ,  
mesure et simulation.

**Remarque:** La simulation a été faite sur E.M.T.P. en prenant comme schéma équivalent de la varistance le modèle suivant:



Où : $R_g$  représente la résistance dynamique du grain de ZnO ,  $R_i$  et  $C_i(V)$  respectivement la résistance et la capacité du joint de grain , ces deux éléments varient à la fois avec la tension et la température . Nous remarquons que l'écart relatif entre les valeurs et celles obtenues par simulation reste faible .

### EXEMPLE D'APPLICATION

- \* Commutation d'un transistor sur charge inductive.  
Le circuit étudié est représenté sur la figure 13.

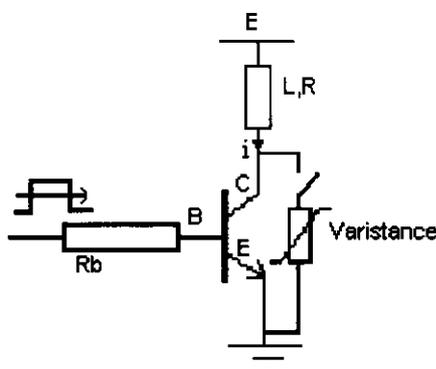


Fig.13. Schéma d'un transistor en  
commutation.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

On envoie un train d'impulsions sur la base du transistor à étudier ; lorsque le créneau est à son niveau haut , le transistor se trouve à l'état saturé , et se met alors à conduire ; la tension entre collecteur et émetteur est  $V_{ce}=0.6V$ . Au moment où le niveau du créneau tombe à zéro , toute l'énergie emmagasinée dans l'inductance se trouve brutalement

restituée à travers le transistor provoquant ainsi une surtension aux bornes collecteur-émetteur.

Si le transistor fonctionne près de la tension maximale ( $V_{CE0max}$ ) indiquée par le constructeur, il risque d'être détérioré. L'écrêtage des surtensions peut être réalisé en plaçant une varistance entre collecteur-émetteur.

Mise en équation.

- Etat saturé :

$$V_{ce}=0 \text{ et } E=Ldi/dt + Ri$$

La varistance est court-circuitée par le transistor, et le courant qui le traverse est de la forme :  $i = E/R (1-\exp(-(R/L)t))$ .

Ou  $E = 34\text{volts}$ ,  $R = 70 \text{ ohms}$ ,  $L = 0.8\text{H}$ .

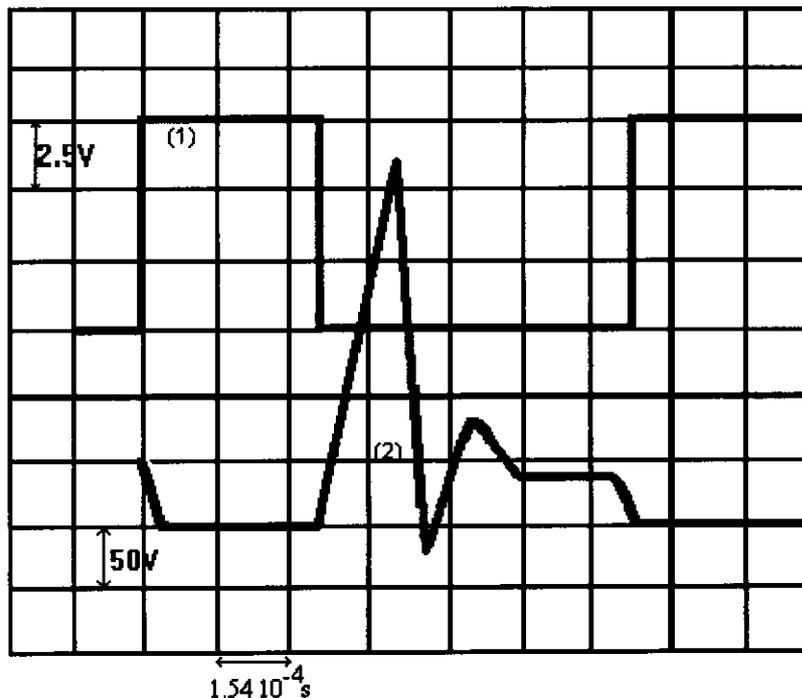
La fréquence de commutation est de l'ordre de 1kHz. Au bout de la demi-période de conduction du transistor, le courant atteint la valeur  $i_s=0.021\text{A}$  et l'énergie stockée dans la bobine est égale à :

$$W=1/2 Lis^2 \text{ soit } W = 0.173 \text{ milli-Joules}$$

- Etat bloqué :

Lorsque le transistor se trouve à l'état bloqué, toute l'énergie stockée dans l'inductance se trouve restituée à la varistance par claquage ; la surtension étant répétitive la varistance risque de perdre rapidement ses performances initiales par échauffement. Pour cela, il est souhaitable de la surdimensionner, afin que la surtension apparaissant à ses bornes ne soit pas intégralement écrêtée, l'échauffement de la varistance se trouve ainsi atténuée.

La figure 14 donne la forme de la surtension apparaissant aux bornes du transistor, nous remarquons que pour une tension d'alimentation  $E=30\text{V}$ , nous avons une surtension de l'ordre de 300 volts.



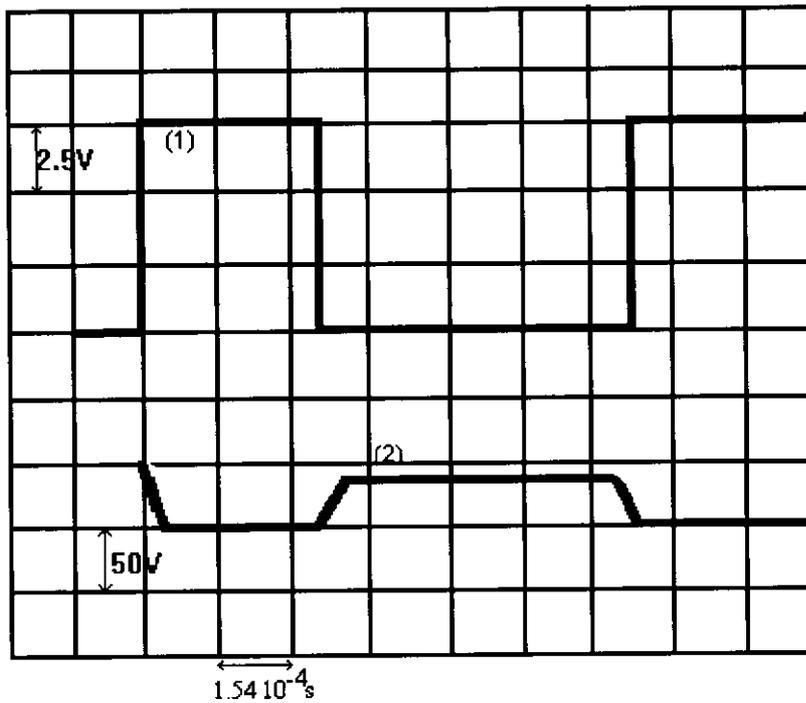
a) sans varistance

(1): signal de commande de base

(2): tension collecteur-émetteur

Fig.14a) Formes de la tension Vce et du signal de commande.

La varistance utilisée pour la protection a une tension de seuil  $V_s=34$ volts.



b) avec varistance

Fig.14b) Formes de la tension  $V_{ce}$  et du signal de commande.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

L'étude du niveau de protection, a été faite sur des échantillons vierges, il faudrait aussi tenir compte des phénomènes de vieillissement ainsi que la dégradation du composant. En effet, cette dégradation est d'autant plus accentuée que le phénomène transitoire est répétitif, elle se traduit par une élévation de la température de la varistance, modifiant ainsi ses caractéristiques de départ. Afin d'éviter l'emballement thermique il serait préférable pour les applications M.T. de mettre un éclateur en série avec la varistance.

## BIBLIOGRAPHIE

[ 1 ] : O. MOKHTARI

« Contribution à l'étude de la stabilisation des varistances à base d'oxyde de zinc sous contraintes électriques »

Thèse de doctorat de troisième cycle Université Paul Sabatier Toulouse, Mars 1986

[ 2 ] : Gilles PENCHENAT

« Contribution à l'étude des dispositifs de protection à base de varistances à l'oxyde de zinc et d'éclateurs pour installation basse tension »

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M. en Electrotechnique, Université Paul Sabatier Toulouse, Avril 1992

[ 3 ] : Ch. LEDOUX

« Appareils de protection contre les surtensions »  
Techniques de l'Ingénieur D.670-D.671.

[ 4 ] : M. GAIN

« Surtensions sur les réseaux de distribution » GSTE 4&5 (1989)

Une journée sur les composants inductifs s'est déroulée le 29 septembre 1998. Cette journée a été organisée par le groupe 13 de la SEE, avec la participation très active de Daniel SADARNAC.

Le matin a été consacré aux exposés de Messieurs Keradec et Nuns. Le premier sur la modélisation des transformateurs, le second sur un transformateur destiné au chauffage par induction.

L'après-midi un exposé sur l'évolution des bobinages a été fait par Daniel Sadarnac. Puis Michel Perelle a montré quelques cas d'utilisation de composants bobinés pour la conversion d'énergie. Enfin quatre ateliers ont été organisés sur les sujets suivants :

Modélisation, spécifications, caractérisation,  
les matériaux magnétiques,  
fuites magnétiques et capacités,  
l'enseignement.

Voici les comptes-rendus de ces ateliers

## **MODELISATION, SPECIFICATION, CARACTERISATION**

Compte rendu effectué par Patrick Bastard

Les premiers échanges ont concerné la définition d'un modèle : " un modèle doit permettre d'expliquer les phénomènes observables. "Il existe plusieurs façons d'établir un modèle ; on peut partir des lois physiques et en déduire un modèle ou bien observer, faire des mesures et déduire un modèle comportemental. Bien que comportemental, ce modèle doit permettre les explications physiques.

Un modèle universel et complet qui pourrait décrire le comportement d'un élément dans toutes les configurations dans lesquelles il est utilisé, serait trop complexe et lourd et imposerait une spécification abondante et la mesure de nombreux paramètres ; un modèle reconnu par tous les fabricants doit permettre une spécification claire mais peut être associé à des conditions de fonctionnement, donc d'application limitée . Il doit permettre le choix et le diagnostic.

Les modèles utilisés le plus fréquemment en électromagnétisme ne tiennent pas compte des non-linéarités des circuits magnétiques ; mais il existe des modèles permettant de simuler ces non-linéarités : description du cycle d'hystérésis , modèle de Preisach-Néel qui donnent de bons résultats dans des conditions précises.

*Quelques remarques :*

- souvent, sur tous les paramètres donnés par le constructeur, seuls quelques uns sont d'utilisation courante,
- lorsqu'un phénomène apparaît ou devient intéressant, une recherche commence pour comprendre et modéliser afin de pouvoir contrôler (besoin).

### **Modèles thermiques**

Les plus gros problèmes (non-résolus) rencontrés dans la fabrication des transformateurs sont des problèmes thermiques, (points chauds et gradients de température )problèmes d'autant plus importants qu'ils concernent la sauvegarde des transformateurs. Un modèle thermique devrait permettre de savoir si dans des conditions d'alimentation et de charges données, la température du transformateur est redescendue à la valeur souhaitée en un temps donné et si éventuellement il est le siège de points chauds.

Contrairement à l'étude des modèles électriques qui fait intervenir des éléments localisés, l'étude des phénomènes thermiques, qui sont des phénomènes de propagation, fait intervenir des éléments répartis. La méthode de simulation utilisée est la méthode des éléments finis (et elle est onéreuse).

Les mesures faites pour établir un modèle sont difficiles voire impossibles et les modélisations sont jusqu'à présent ou bien grossières ou bien valables dans des cas d'études simples.

*quelques remarques :*

- il serait intéressant de connaître l'évolution en température d'un système pour prendre en compte l'évolution des paramètres électriques et magnétiques en fonction de la température.
- le bon sens et le savoir-faire sont encore les meilleurs alliés dans ce domaine.

### **Modèles CEM**

Le comportement des systèmes utilisant des transformateurs vis à vis des perturbations conduites peut être décrit et prévu grâce aux modèles déjà utilisés en H-F.

Pour les perturbations rayonnées les mesures sont faites sur un système complet (alimentation à découpage) et il n'existe pas de modèles des différents composants qui permettraient de prévoir le comportement de l'ensemble.

Pour l'instant la C.E.M est assurée de façon empirique avec l'aide du bon sens... physique bien entendu. La modélisation deviendra peut-être nécessaire si les normes deviennent plus sévères.

### **Caractérisation, spécification**

Les spécifications touchent les différents éléments d'une fabrication : matériau → composant → système assemblé.

Elles doivent donner :

- les limites d'utilisation
- décrire le comportement
- préciser les tolérances

L'industriel donne les paramètres qui satisfont les plus gros clients; un paramètre semble devenir primordial et prioritaire : c'est le prix .

Aux spécifications sont associées des méthodes de mesures, qui sont normalisées.

La plupart des mesures permettant de spécifier un circuit magnétique (pertes, résistivité, perméabilité...) font référence à une modélisation et à des conditions d'utilisation, ce qui limite leur exactitude :

- les pertes sont mesurées en régime sinusoïdal et les ondes utilisées dans les convertisseurs sont trapézoïdales.
- $\mu$  est déduit de la mesure de L en supposant que B est uniforme sur la section du circuit ce qui est une approximation.

*remarque:*

Les propriétés diélectriques du matériau sont très importantes car elles influencent beaucoup la valeur des pertes. L'existence d'un champ électrique entre les grains provoque des courants par capacité .

## **COMPTE RENDU DE L'ATELIER « MATERIAUX MAGNETIQUES »**

Deux compte rendus ont été réalisés. Un par Pierre Henrard, le second par Gérard Delavier.

### **Compte rendu de Pierre Henrard**

Après un sondage réalisé auprès de chaque participant visant à cibler leur principal centre d'intérêt en matière de matériaux magnétiques, il est ressorti que les applications utilisant des ferrites (applications hautes fréquences) ont remporté un gros suffrage des voix, même si une bonne partie des participants est quand-même venue avec l'intention d'obtenir des informations plus générales. Enfin on notera l'intérêt tout particulier de certains participants pour les nouveaux matériaux magnétiques (nanocristallins).

Après une présentation des caractéristiques et des propriétés physiques des principaux matériaux magnétiques utilisés en haute fréquence, une liste de leurs diverses applications possibles fut établie. Celle-ci sera certainement d'une grande utilité pour l'utilisateur novice venu chercher des informations générales...

Les progrès attendus dans les années à venir dans le domaine des matériaux furent ensuite abordés. Dans le domaine des ferrites par exemple, le seul progrès à espérer est la réduction des pertes massiques. En effet, les ferrites étant des céramiques, il reste un certain nombre de degrés de liberté dans leurs procédés de fabrication et sur lesquels il est encore possible de jouer: dosage des différentes poudres, utilisation de différents liants, températures de frittage, etc... Pour les nanocristallins, le réel progrès attendu est de trouver un moyen de découper ce matériau de manière à lui trouver un marché plus vaste (inductances, transformateurs de forte puissance...). Dans ce cas, ils pourraient devenir un sérieux concurrent pour les circuits en fer-silicium utilisés pour des applications fonctionnant dans le domaine de l'audible. En effet les nanocristallins possèdent de faibles coefficients de magnétostriction par rapport à ceux des matériaux en fer-silicium. Il est cependant à noter que les nanocristallins sous leur forme actuelle (tores) sont certainement une réponse efficace aux problèmes de compatibilité électromagnétique (selfs de mode commun).

Les besoins des utilisateurs furent enfin soulevés. En effet ceux-ci se font de plus en plus pressants. Par exemple certains utilisateurs éprouvent des difficultés à s'approvisionner en ferrites de type planar. Une réponse est que le marché propose actuellement les « pots RM bas profil » qui constituent un bon compromis pour ce qui est de l'encombrement. D'autres souhaitent voir les formes de ces circuits encore évoluer. Enfin certains utilisateurs se plaignent de la difficulté à trouver des réponses techniques auprès des fabricants faute d'interlocuteur. Une solution alors proposée aux utilisateurs est la participation à des congrès tels qu' EPE ou PCIM au cours desquels ils seront certains de trouver les réponses à leurs problèmes en contactant les divers exposants venus présenter leurs produits.

### Compte rendu de Gérard Delavier

Cet atelier rassemblait des fabricants et des utilisateurs de circuits magnétiques ainsi que quelques professeurs, Les utilisateurs ont fait part de leur souhait d'actualiser leurs connaissances sur les nouveaux matériaux magnétiques ; la diminution des volumes et l'optimisation des composants apparaissant comme les contraintes prioritaires,

Sur proposition de M, Jean Marie PETER, animateur de cette séance, il fut décidé d'essayer de répondre à trois questions :

- quels matériaux utiliser en vue de réduire le poids, le volume et les pertes dans un circuit magnétique;
- quels sont les nouveaux matériaux disponibles sur le marché, ainsi que ceux susceptibles d'être commercialisés dans un avenir proche;
- quels sont les besoins des utilisateurs ?

M. BONNAL proposa de dresser une liste des matériaux disponibles en énonçant leurs caractéristiques principales :

Matériaux magnétiques	Induction maximale	perméabilité $\mu_r$	T °C max	Coût	fréquence
Ferrites Mn-Zn T <sub>frittage</sub> =1350 °C	300 à 500 mT	1000 à 10 000	200 à 250 °C	-	10 kHz-1 MHz

Ferrites Ni-Zn-Cu T <sub>frittage</sub> =900 °C	200 à 400 mT	10 à 700	100 à 590 °C	?	1 MHz- 500 MHz
Poudres de fer (matériaux à entrefer réparti)	1,5 T	30 à 100	125 à 150 °C	-	50-500 kHz
nanocristallins	1,3 T	500 000 à 1 000 000	400 à 450 °C	+	1 à 200 kHz
Fer carbonyl	1,5T	8 à 20	125 à 150 °C	+	0 à 200 Mhz

A cette liste peuvent être ajoutés les ferrites EMI, matériaux à fortes pertes utilisés pour l'absorption des parasites.

#### *Domaines d'applications*

- Ferrites Mn Zn : inductances d'absorption, inductances, transformateurs,
- Ferrites Ni Mn Cu : inductances radio 15 MHz"100 MHz,
- Ferrites EMI : radio et réalisations d'inductances CMS,
- Poudres de fer : inductances de filtrage en continu et en alternatif,
- Nano cristallins ; selfs en mode commun, capteurs de courant (économiquement intéressantes au delà de 50 kHz)..

#### *Progrès à envisager dans les dix prochaines années dans le domaine des ferrites :*

- Diminution des pertes dans le matériau. La fréquence demeurera limitée pour la forte puissance par les pertes dans le cuivre des bobinages.
- Les limites des dimensions des circuits en ferrite ont pour origine la force de pression nécessaire dans l'opération de frittage.

#### *Choix de matériaux et de circuits :*

Le choix d'un matériau et d'un circuit est la conséquence de compromis; la CEM est souvent l'un des critères de ce choix. Les industriels utilisateurs de ces matériaux souhaitent une évolution de la géométrie des produits présents sur le marché afin de mieux répondre aux contraintes liées à la technique CMS et aussi résoudre des problèmes de CEM.

Les composants magnétiques sont des produits élaborés grâce au savoir-faire de plusieurs fabricants ce qui pose parfois quelques problèmes.

Enfin les bruits engendrés par les matériaux sont parfois à l'origine du choix d'un produit; les matériaux nano-cristallins sont peu bruyants.

## **FUITES MAGNETIQUES ET CAPACITES**

Compte rendu réalisé par Alain Cunière

### **Les fuites magnétiques:**

Il est nécessaire de les limiter pour accroître les fréquences de découpage. Elles adoucissent la commutation d'amorçage des interrupteurs de puissance mais durcissent celle de blocage (plus de pertes, surtension). De plus, le champ dans le cuivre augmente et donc les pertes. Dans les flyback, il faut éviter la présence de cuivre près de l'entrefer.

Dans certaines applications ce n'est pas tant leur présence mais la reproductibilité de leur valeur qui gêne. Aussi, lorsqu'elle est utilisée, il est préférable de réduire au maximum celle du transformateur et d'ajouter une self externe, mais au prix d'un composant supplémentaire. La géométrie PLANAR se prête bien à la reproductibilité mais on loge moins de spires dans une fenêtre donnée tout en augmentant les capacités parasites. Un industriel conseille pour la réalisation du transformateur de stabiliser le travail du bobinier pour garantir l'usage d'un

même isolant, d'une même tension de fil, d'éviter la sous-traitance et le changement de personne lors de bobinages "à la main".

Pour le chauffage par induction, le problème des fuites se pose différemment. En France, les transfo sont alimentés par commutateur de courant avec condensateur au primaire de compensation du réactif. Le transfo est donc alimenté en sinusoïdal et le problème des fuites se pose en termes de chute de tension interne (quelque 100V pour un transfo de 3MVA). Il faut donc les réduire au maximum.

#### **Les capacités parasites:**

C'est le problème des transfo en HT. Il faut imaginer des bobinages dont les conducteurs les plus influencés aient des potentiels qui se suivent au mieux pour éviter les courants capacitifs. Des écrans entre primaire et secondaire peuvent être intercalés mais il faut veiller à ce que leur connexion à un potentiel fixe soit la plus courte possible sinon, par induction leur potentiel varie.

En mesure, on cite le problème de transfo de courant 1000A/300kHz  $\phi$  interne de 10mm et  $\phi$  externe de 200mm, pour lesquels un nombre de spires important au secondaire (plusieurs couches) déterminent avec le conducteur primaire des couplages capacitifs tels que le simple déplacement du tore autour de ce conducteur modifie l'amplitude et la phase de la mesure. Plusieurs participants cautionnent l'usage de deux transfo de courant en cascade en limitant de 30 à 50 spires, le nombre de spires par secondaire et en une seule couche.

Certains suggèrent d'éviter la mise à la terre d'une borne secondaire des transfo de puissance. Les capacités parasites déterminent des boucles de courant et portent certaines parties du transfo à un potentiel dangereux. Il est préférable de travailler en mode flottant.

#### **Caractérisation de ces imperfections:**

Des logiciels existent dans la gamme 50 Hz à 20 kHz. Ensuite, il faut établir un partenariat avec un laboratoire équipé d'un mailleur 3D. On peut espérer prochainement des mailleurs automatisés pour réduire les coûts en personnel d'étude.

L'utilisation d'impédancemètres reste un luxe. De plus, pour les transfo de forte puissance, ils ont tendance à mesurer l'impédance des câbles de liaison. Ces appareils restent sophistiqués à l'usage et rendent douteuse l'exploitation des mesures.

#### **Conclusion:**

On observe des phénomènes difficiles à caractériser. De plus, leur reproductibilité n'est pas garantie. L'importance du savoir-faire en matière de bobinage est essentiel.

Actuellement, pour beaucoup d'entreprises une caractérisation précise passe par un partenariat avec un laboratoire de recherche.

#### **ATELIER ENSEIGNEMENT**

Compte rendu effectué par Bernard Multon

D'une façon générale, l'enseignant, et par la même occasion ses élèves, est confronté à la difficulté de l'accroissement du nombre des thèmes à aborder dans sa discipline (du moins en a-t-il l'impression). Cela se traduit par un enseignement trop superficiel et non satisfaisant, en outre, les volumes horaires de travaux pratiques, trop dévalorisés, se réduisent progressivement. Les remèdes proposés sont de recentrer les enseignements sur ce qui semble constituer un ensemble de valeurs sûres, nous les avons identifiées pour les composants magnétiques :

- l'électromagnétisme sans utiliser les équations de Maxwell avec des expériences simples (démonstrations du professeur, simulations par éléments finis puis travaux pratiques). La notion de flux total doit être démythifiée une bonne fois pour toute (il y a vraiment un problème à ce niveau dans le système français : le terme anglais « flux linkage » est sans

ambiguïté). Les notions d'énergie stockée et convertie ainsi que celles de pertes sont fondamentales ;

- les propriétés élémentaires des matériaux ferromagnétiques et, surtout, une ou plusieurs modélisations simples (saturation brutale...) ainsi que les lois physiques régissant les pertes magnétiques. Les caractéristiques des principaux matériaux usuels (du fer silicium aux ferrites) ;

- l'inductance (dispositif de stockage d'énergie) et le transformateur (transfert d'énergie) : leur fonctionnement, leurs modèles (les plus simples possibles), leurs pertes et surtout leurs différences fondamentales.

- divers contextes d'utilisation de ces composants pour bien comprendre la variété des contraintes auxquelles ils sont soumis.

En ce qui concerne la succession des étapes d'enseignement, les avis sont divergents selon que l'expérience doit arriver avant ou après la théorie... De toute façon, il doit y avoir imbrication et il est même hautement préférable que le même enseignant assure les cours et les TP.

Il faut bien choisir les travaux pratiques (les plus proches du cours et des indispensables TD associés) de façon à appréhender, par la mesure, à la fois les grandeurs magnétiques et électriques (mesures d'inductions par sonde à effet Hall, de flux total par intégration de tension...). Les outils de simulation tels que ceux utilisant les éléments finis peuvent constituer un complément extrêmement efficace (expérience à l'IUT de Nantes) à condition qu'il y ait un couplage étroit avec les manipulations expérimentales. En cours, l'enseignant se doit de montrer des objets (composants magnétiques) et leurs constituants.

A de rares exceptions près, l'objectif des formations n'est pas de « produire » des concepteurs (c'est une spécialité qui s'acquiert en fin de cycle d'études ou dans l'entreprise : qui, dans l'enseignement, sait comment on conçoit un condensateur électrolytique ?).

Un dernier problème inhérent à l'enseignement des disciplines technologiques est leur présence à tous les niveaux du système éducatif (du collège à l'école d'ingénieur), au niveau élémentaire, les élèves ne comprennent pas, puis ils ont le sentiment de redits et, finalement, se démobilisent. Il faut donc trouver des contenus aux enseignements technologiques compatibles avec le niveau scolaire associés à des objectifs précis (l'un d'eux étant de donner le goût à la discipline) et à une progression adaptée aux scolarités longues afin de ne pas déflorer le sujet et de ne pas faire fuir les bons éléments.

Pour susciter plus de motivation de la part des étudiants, pour un domaine que nous savons passionnant, il faut redévelopper leur autonomie par, au moins une fois, un travail personnel approfondi de recherche d'information, de conception et de réalisation d'un « projet ». En effet, un enseignement de base associé à une telle expérience d'approfondissement constitue une solide formation. Ainsi, sortis du système scolaire, les anciens élèves seront parfaitement capables de s'adapter aux nouvelles situations. Il n'est ainsi pas nécessaire de donner trop de détails et de trop charger les contenus des programmes (cela dépend bien entendu du niveau d'étude et de spécialisation de la formation).

Enfin, il faudrait réécrire un livre court allant à l'essentiel et sans erreurs... Il existe un numéro spécial de Science et Vie sur l'électromagnétisme qui, paraît-il est très recommandable.

# QUELLE MOTORISATION POUR LE VEHICULE ELECTRIQUE : SYNCHRONNE A ROTOR BOBINE OU A AIMANTS ?

Alain LEVY

THOMSON CSF / AUXILEC BP 53 78401 CHATOU Cedex FRANCE

## 1 - INTRODUCTION

Le développement des véhicules à propulsion électrique est très fortement lié à l'optimisation du trinôme " Performance - Autonomie - Coût ".

Dans ce contexte, l'évolution des batteries et des moteurs électriques constitue le défi technologique identifié par tous.

Nous parlerons plus particulièrement du **groupe de propulsion**, sachant bien sûr que les sources d'énergie font l'objet par ailleurs de travaux décisifs pour l'avenir de la traction électrique.

Les machines asynchrones et les moteurs à courant continu "classiques" (collecteur et balais) ont largement contribué au "démarrage" du véhicule électrique. Ceci résulte de la grande diffusion industrielle de ces machines et au caractère "mature" de ces technologies qui, si elles séduisent par un coût de production raisonnable, démontrent vite leurs limites en termes de rendement et de compacité... dégradant inéluctablement les performances ( brio...) et l'autonomie.

Les machines "**synchrones autopilotées**" apportent des solutions à ces problèmes de rendement et de compacité.

Pour cette famille de groupe moto-propulseur, nous proposons dans cet article de décrire et comparer les machines à "**aimants**" et les machines à "**rotor bobiné**".

## 2 - RAPPEL DESCRIPTIF

Le groupe moto-propulseur est essentiellement constitué d'une machine synchrone triphasée associée à un onduleur-redresseur ( six interrupteurs en pont ), voir figure 1 .

Le stator de la machine ( partie fixe externe ) comporte les enroulements des trois phases dont la commutation électronique sur la source à courant continu est assurée par le pont de puissance. le champ statorique ainsi produit et réparti judicieusement dans l'entrefer réagit avec le champ d'induction produit par le rotor de manière à créer le couple de rotation.

Les instants et durées des commutations sont en partie déterminés par l'information de position du rotor de la machine. C'est cette boucle de contrôle qui donne le qualificatif d'autopiloté à ce type de moteur ( lien identique avec la commutation électromécanique du collecteur et balais d'une machine à courant continu classique ).

Deux techniques sont possibles pour créer le champ inducteur au rotor :

**Rotor bobiné** : les masses polaires du rotor sont des électro-aimants alimentés en courant continu par l'intermédiaire de 2 contacts tournants ( bagues et balais ). La valeur de l'induction peut varier par action sur le courant d'excitation, en particulier la valeur nulle est possible, rendant la machine inerte.

**Rotor à aimants** : les masses polaires sont des aimants permanents, généralement de type Néodyme-Fer-Bore. la valeur de l'induction est fixe.

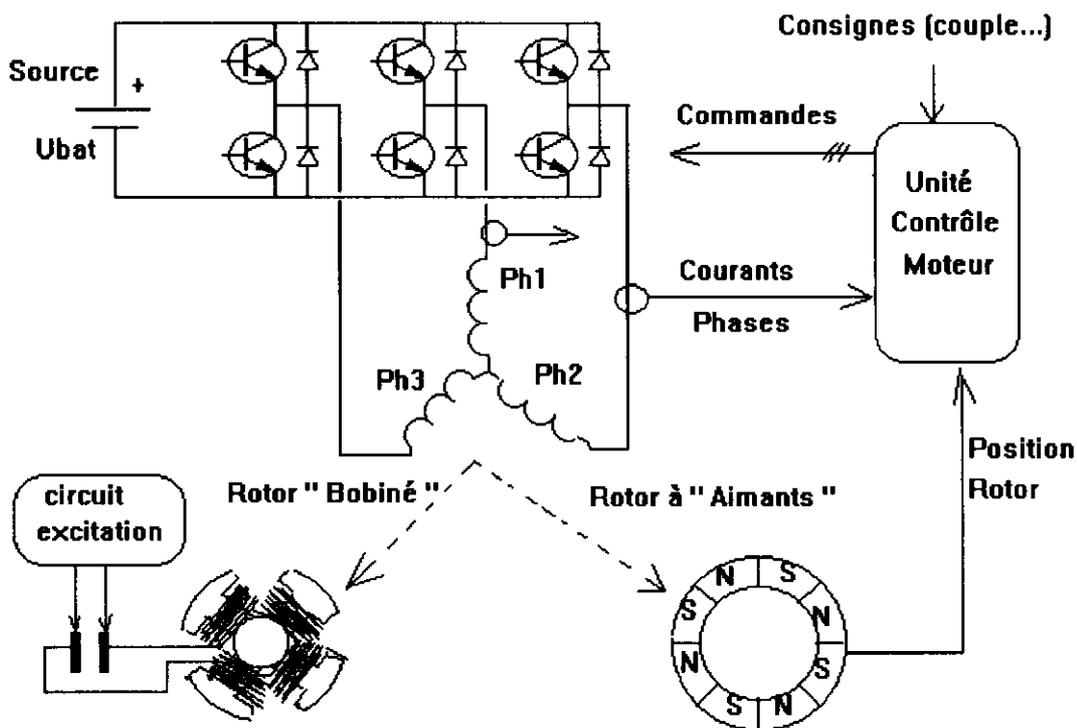


Fig. 1 - Structure groupe moto-propulseur à moteur synchrone

### 3 - CARACTERISTIQUES COMPAREES

#### 3.1 - Encombrement / Masse

Les aimants permettent d'avoir un rapport couple / masse très avantageux, en effet : d'une part, la section active des aimants est très réduite comparée à l'électro-aimant équivalent et d'autre part on peut facilement réaliser un nombre de pôles important ( 8 à 12 pôles et même plus ). L'augmentation du nombre de pôles de la machine permet de réduire les sections de passage du flux ainsi que les "chignons" (têtes de bobinage en bout de stator) : Tout ceci se traduit par un gain très sensible en encombrement et masse.

Les contraintes d'industrialisation ( faible coût ) liées à la réalisation d'un rotor bobiné font qu'il est difficile d'envisager un nombre de pôles supérieur à quatre . De ce fait, en considérant les éléments précédemment développés, il est clair que le bilan puissance massique donne l'avantage à la machine à aimants. L'écart de masse est de l'ordre de 30 % entre les deux types de moteur.

Le boîtier électronique quant à lui peut être considéré comme identique en termes de masse et d'encombrement, le circuit d'excitation étant peu significatif par rapport au reste des circuits de commande et de puissance.

### ***3.2 - Thermique***

Les pertes générées au stator sont identiques pour les deux types de machine. Il en est autrement au niveau du rotor : le rotor bobiné est évidemment le siège de pertes par effet Joule qu'il est nécessaire d'évacuer . Le rotor à aimants est aussi soumis à des pertes par courants de Foucault induits par les harmoniques des courants de phases non nécessairement sinusoïdaux purs. On maîtrise et contient ce phénomène en "soignant" les formes de courant (par exemple : action sur les algorithmes de commande ).

L'impact sur le circuit de refroidissement est différent selon le type de machine et le fluide choisi. On peut dire que la machine à rotor bobiné se prête mieux à un refroidissement par air que la machine à aimants dont il faut absolument protéger l'entrefer de l'intrusion de particules magnétiques.

Le refroidissement par eau sera préféré dans le cas de la machine à aimants.

### ***3.3 - Fiabilité / Sécurité de fonctionnement***

La simplicité de construction du rotor à aimants ( pas de bobinage, pas de contacts tournants..) va dans le sens d'une fiabilité accrue pour ce type de machine, par contre les possibilités de désaimantation ( échauffement excessif combiné à défluxage important ) réduisent cet avantage. La fiabilité du moteur à aimants passe par la maîtrise des phénomènes de désaimantation ( qualification des aimants et de la machine dans son environnement ainsi que dans toutes les configurations de fonctionnement ).

La sécurité de fonctionnement suscite souvent des inquiétudes dès lors qu'il s'agit de machines à aimants permanents; en effet, en cas de perte de contrôle du système de commande, le moteur se comporte en alternateur dont on ne peut, par essence, couper l'excitation. Ceci se traduit par l'apparition de tensions élevées aux bornes du pont de puissance qu'il convient de maîtriser. Ceci s'effectue par un dimensionnement correct des composants, sachant en outre que des modes de fonctionnements spécifiques ( modes dégradés ) gèrent la régulation de la tension redressée dans ce cas en maintenant un couple parasite voisin de zéro.

En cas de court-circuit de phases, le couple de freinage engendré ne doit jamais conduire à une situation catastrophique pour le véhicule ( embardée ). Il se trouve que les machines utilisées pour des rapports de défluxage importants ont une forte impédance interne limitant ainsi très fortement les valeurs des courants de court-circuit.

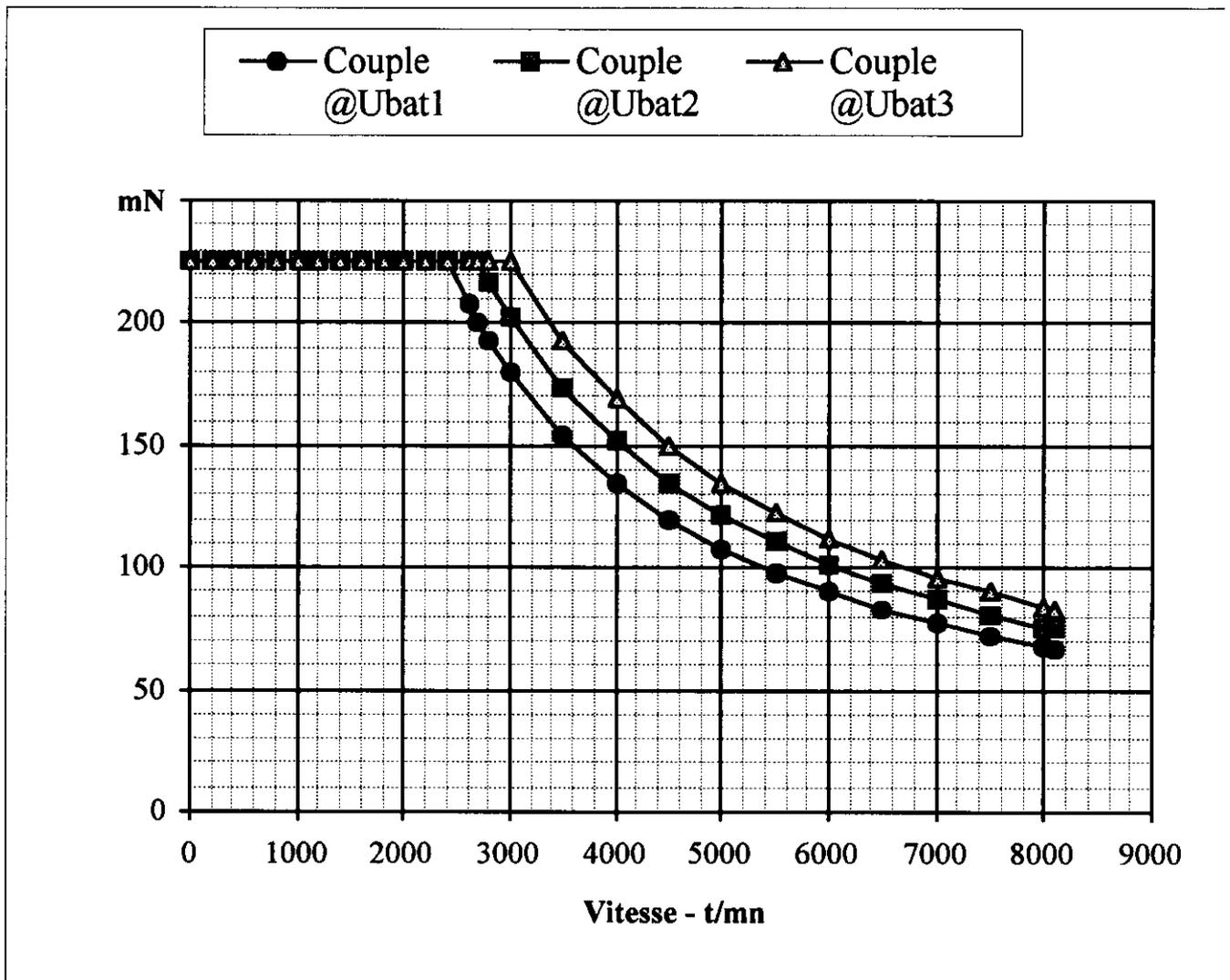


Figure 2 - Caractéristiques couple / vitesse

### 3.4 - Principe de commande

Le profil couple / vitesse des groupes de propulsion électrique est généralement conforme à la courbe représentée figure 2 . Un quadrant est représenté, par convention il s'agit de la marche avant en moteur, la représentation se fait dans les trois autres quadrants pour les modes générateurs (freinage en récupération ) et marche arrière.

On distingue une zone de fonctionnement à couple constant de la vitesse nulle à une vitesse dite " de base " . Dans cette zone, le réglage du couple est défini par l'angle de phase entre courants stator et forces électromotrices (par exemple en utilisant la transformée de Park) et par la valeur moyenne de la tension appliquée. Cette valeur moyenne est obtenue par découpage de la tension batterie ( Modulation de Largeur d'Impulsion ) .

Au-delà de la vitesse de base, le système fonctionne à puissance constante. La force électromotrice est supérieure en module à la tension de batterie : on accède à cette zone en défluxant la machine. Ceci s'opère de manière différente selon le type de machine :

### Moteur à aimants :

la seule action possible est de créer une composante d'induction qui s'oppose à celle produite par les aimants : on agit sur le déphasage des courants stator par rapport aux forces électromotrices générées, les tensions appliquées sont au maximum en amplitude ( tension batterie ) . c'est le fonctionnement "pleine onde".

### Moteur à rotor bobiné :

Au réglage d'angle précédent s'ajoute une action sur le bobinage inducteur par réduction du courant d'excitation, donc diminution directe du flux d'induction.

C'est ce paramètre supplémentaire de réglage qui permet d'optimiser la dépense d'énergie aux faibles charges à haute vitesse, avec un impact favorable sur le rendement global.

## **3.5 - Rendement**

Le rendement du groupe de propulsion est exprimé par le rapport entre la puissance mécanique disponible sur l'arbre de sortie moteur et la puissance électrique en entrée du convertisseur de puissance.

Les courbes d'iso-rendement sont représentées dans les figures 3 et 4 pour les deux types de machines. Nous nous intéressons ici à comparer les différences de gradient de couple entre les deux motorisations, autrement dit la répartition des zones de meilleur rendement dans le plan couple-vitesse. Les valeurs des rendements obtenus dépendent de beaucoup de paramètres. Aussi, la comparaison entre les deux machines, toutes deux réalisées et essayées, est à modérer compte tenu des tensions d'alimentation et puissance maximale différentes.

Nous constatons que la machine à aimants présente de très bons rendements près des puissances maximales et au voisinage des vitesses moyennes. Aux faibles puissances et à grande vitesse, le rendement se dégrade du fait de l'énergie nécessaire pour défluxer les aimants.

La machine à rotor bobiné, si elle présente en valeur maximale absolue un rendement légèrement inférieur à celui de la machine à aimants, donne par contre un gradient plus faible de répartition de couple en fonction de la charge et de la vitesse . Son domaine d'exploitation est plus étendu, on peut mieux contrôler les pertes grâce à l'action sur le courant d'excitation.

## **3.6 - Coûts de fabrication**

Les études d'industrialisation de ces types de motorisation n'ont pas révélé de différences significatives entre les deux technologies au niveau des coûts de production série.

Nous dirons simplement qu'il existe une flexibilité moindre en ce qui concerne le choix du nombre de pôles qui se limitera à quatre pour le rotor bobiné; Au-delà les coûts de production deviennent prohibitifs.

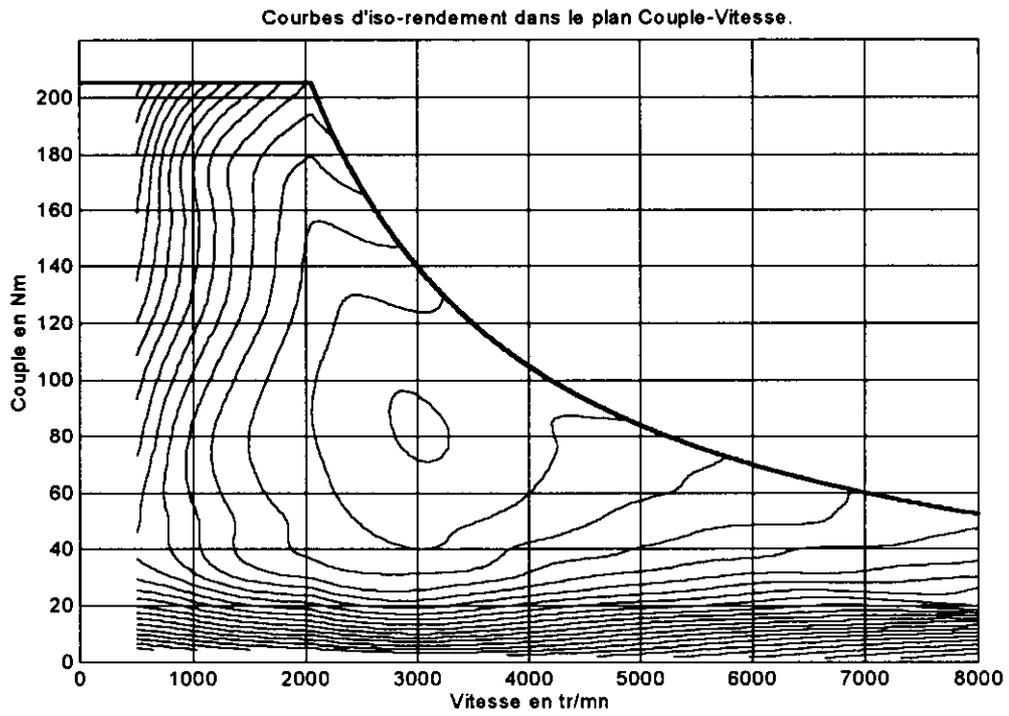


Figure 3 - Machine à aimants . Cartographie des rendements

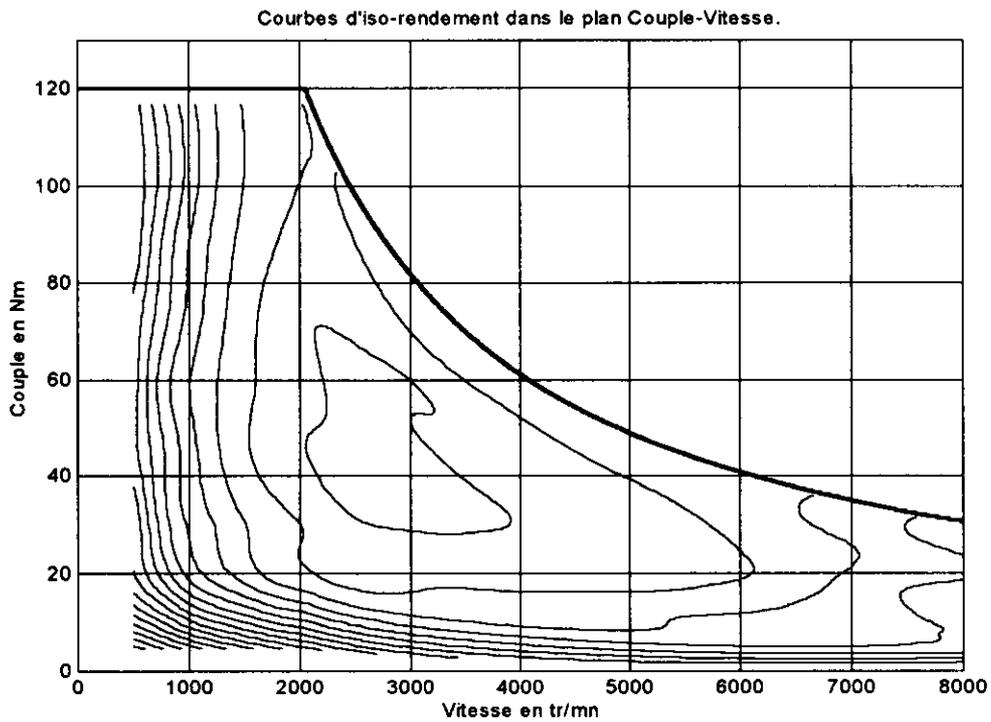


Figure 4 - Machine à rotor bobiné - Cartographie des rendements

## 4 - CONCLUSION

Nous avons comparé deux groupes de propulsion à moteur synchrone autopiloté de technologies différentes : rotor bobiné et rotor à aimants . Ces solutions nous semblent les mieux appropriées pour une application en traction électrique. Le choix reste difficile compte tenu de leurs complémentarités ( compacité pour l'aimant, zone de bons rendements plus étendue pour le bobiné... ). La solution de synthèse se trouve-t-elle peut-être dans la machine *Hybride* qui comprend un rotor à la fois bobiné ( bobinage simple avec pôles à "griffes")et à la fois muni d'aimants ... Nous pourrions espérer cumuler les avantages des deux types de machine, mais sans doute aussi les inconvénients ... à suivre.

Alain CUNIERE  
Lycée Pierre de Coubertin  
chaussée de Paris  
77100 Meaux

E-mail : [lycee.coubertin.genie.elec@Wanadoo.fr](mailto:lycee.coubertin.genie.elec@Wanadoo.fr)

A l'initiative de l'équipe pédagogique de la section BTS, les étudiants du lycée de Meaux se sont rendus récemment dans le Pas de Calais visiter la station EDF IFA 2000. Ce site unique au monde assure depuis 1985 un échange de puissance de 2000MW avec l'Angleterre par câble sous-marin ensouillé.

Les pages qui suivent présentent le site essentiellement pour évoquer les caractéristiques technologiques de l'installation dont on peut voir tous les éléments constitutifs depuis l'arrivée double en 400 kV jusqu'aux départs en 270 kV continu.

La visite se déroule en trois actes.

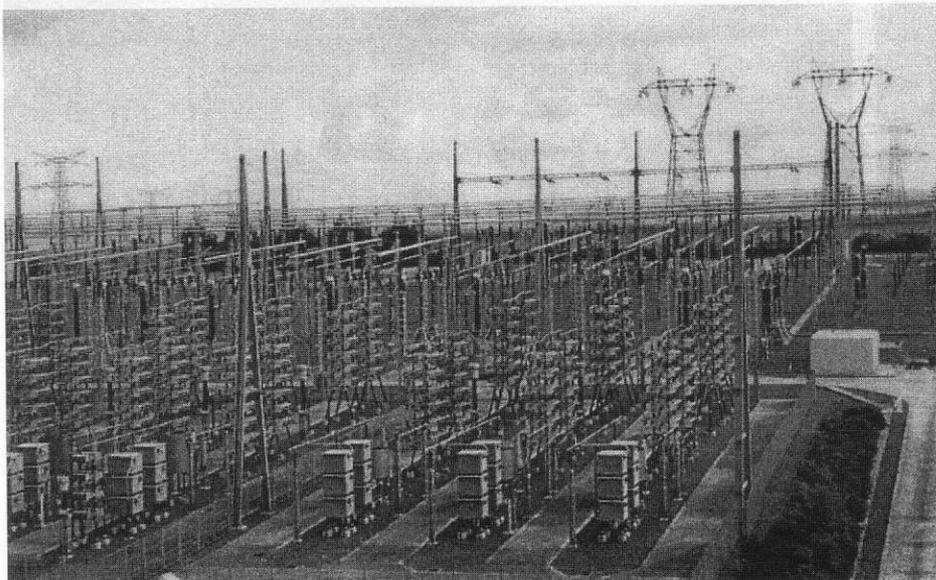
- ) une vidéo conférence d'excellente qualité présente l'installation
- ) des maquettes commentées par un ingénieur IFA permettent de se représenter les différentes parties de l'installation
- ) une visite du site transposée à l'échelle 1 tout ce qui a été dit.

Convaincue de l'intérêt pour nos étudiants de cette visite, la revue 3E.I a contacté les responsables du site afin d'envisager la parution dans ce numéro d'une information sur les possibilités de visite du site. EDF nous ayant autorisé à cette parution, les coordonnées de la personne à contacter pour un rendez-vous sont les suivantes :

### **Monsieur MAZINGARBE, ingénieur IFA au 03-21-85-09-27**

EDF précise toutefois qu'il n'existe aucune structure d'accueil spécifique et que ces visites ne sont réalisables qu'en fonction des disponibilités de Monsieur MAZINGARBE.

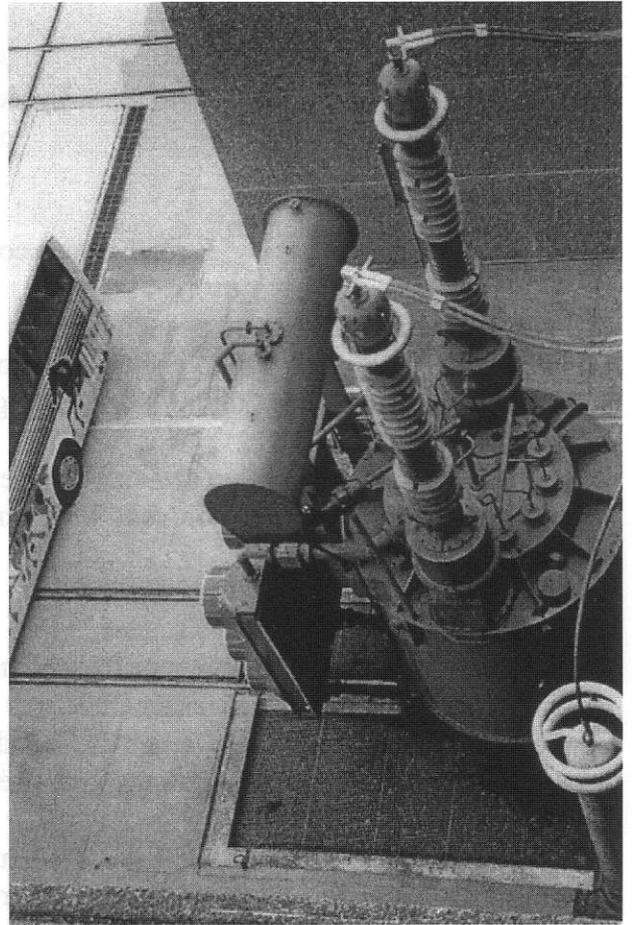
Nous exprimons nos plus vifs remerciements à Monsieur J. MERLEN, responsable de la zone des mandarins pour son accueil et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer ainsi qu'à Madame MASSARD pour les aspects administratifs du déplacement.



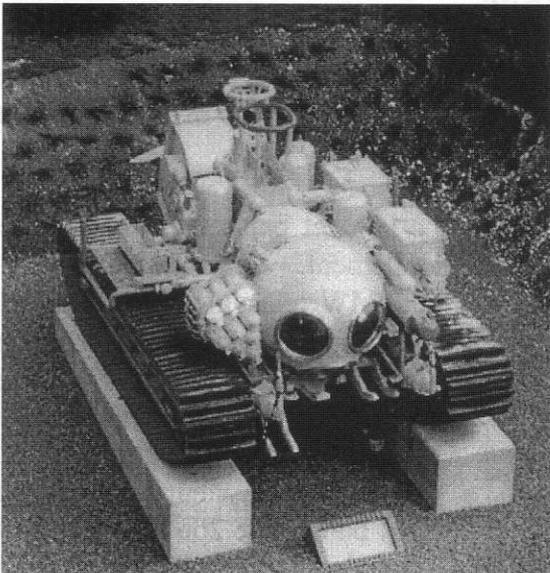
Le site est partagé en deux unités totalement indépendantes de 1000MW chacune. On distingue sur la photo une unité avec en arrière plan l'arrivée en 400 kV et au premier plan une partie des 600 MVAR de filtres constitués de 32 châssis condensateurs comprenant 3064 boîtiers de 200 kVAR-5.8 kV à fusibles internes. Au tout premier plan, ce qui pourrait passer pour des *ruches* sont en fait les résistances d'amortissement des filtres. Derrière ces résistances, on aperçoit des cylindres abritant les inductances d'accord des filtres.



Une des quatre salles abritant un pont dodécaphasé de 500MW. Chacune des trois tours protège quatre fonctions thyristors.

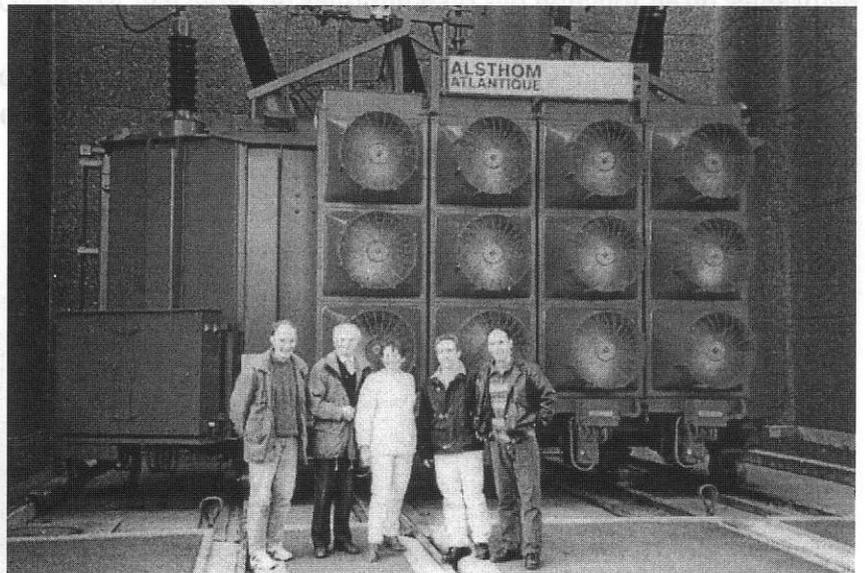


Vue d'une des quatre inductances de lissage. Le bus donne l'échelle...  
Sur la droite, on distingue un pont diviseur permettant une mesure réduite de la tension continue de 270 kV.



Le LIMULE, robot français créé pour le creusement des tranchées et l'ensouillage des câbles.

Sur la photo de droite, vue d'un des 13 transformateurs monophasés de 206 MVA.



des profs réchauffés par des pertes Joule

# STATION DE CONVERSION D'ENERGIE IFA2000

## PRINCIPES GENERAUX

### POURQUOI UNE LIAISON ELECTRIQUE FRANCE/ANGLETERRE ?

Elle permet un secours mutuel lors :

- ⇒ d'aléas de consommation dus aux variations climatiques
- ⇒ de la perte d'une unité de production
- ⇒ d'un sous équipement de production en cas de mauvaise prévision de la croissance de la consommation.

Elle permet de réduire la puissance de réserve et permet de tirer parti des décalages entre les pointes de consommation de chaque pays.

Elle permet des échanges économiques lorsque le coût de production de l'énergie varie selon la période et la nature du parc de production (fuel, gaz en Angleterre et nucléaire, hydraulique en France).

### COMMENT ?

A priori, la distribution d'énergie alternative présente des avantages majeurs tels que :

- ⇒ l'utilisation de transformateurs pour élever les tensions produites et faciliter le transport de l'énergie (câbles moins lourds)
- ⇒ la coupure du courant alternatif est plus aisée de part le passage naturel par 0 du courant.

### MAIS

- ⇒ la coordination et la stabilité des contrôles en fréquence et en phase de plusieurs alternateurs connectés sur un même réseau est une chose délicate lorsque l'on veut réguler un échange d'énergie
- ⇒ les réseaux concernés par l'échange sont nécessairement de même fréquence
- ⇒ les câbles présentent des effets capacitifs entre eux et avec la terre. Il en résulte des courants réactifs de circulation avec pour conséquence :

**génération de réactif par les alternateurs  
accroissement du courant efficace dans les câbles**

- ⇒ pertes et surcoûts d'autant plus importants que la ligne est longue.

### ET LE CONTINU ?

le transport en courant continu paraît plus approprié puisqu'il supprime les courants réactifs mais hélas sa génération par machine à courant continu et l'impossibilité d'élever la tension ont limité son usage à des cas particuliers justifiant l'investissement dans une station de conversion alternatif/continu et continu/alternatif.

- ⇒ d'un côté, il y a surcoût des terminaisons par la présence des convertisseurs et des transformateurs
- ⇒ d'autre part, en alternatif les courants capacitifs, les chutes de tension inductives, l'accroissement des pertes joules par effet de peau, conduisent à des câbles beaucoup plus onéreux que pour le transport en courant continu. Il existe donc une **distance critique** à l'avantage du transport par courant continu.

Cette distance varie de 500 à 800 km en lignes aériennes. Par exemple, lorsque des centrales hydrauliques sont éloignées des zones de consommation.

Cette distance varie de 30 à 50 km pour les câbles. Par exemple, pour des liaisons sous-marines ou urbaines lorsque la vue des pylônes est prohibée.

Enfin, l'interconnexion par courant continu entre 2 réseaux très puissants permet une facilité de réglage par la commande des convertisseurs statiques tout en garantissant la stabilité et l'indépendance de ces mêmes réseaux.

Pour conclure, il aura fallu attendre la maturité du thyristor inventé par GENERAL ELECTRIC en 1961 pour voir concrétiser des idées pourtant très anciennes. Ainsi, en 1906 pour la première fois en France, une liaison à courant continu de 20MW relia les villes de MOUTIERS et LYON grâce à des génératrices à courant continu en série et débitant un courant constant.

### *L'ELECTROTECHNIQUE DANS TOUTE SA PUISSANCE...*

## STATION DE CONVERSION D'ENERGIE IFA2000 PRINCIPES GENERAUX

### CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE ELEMENTAIRE (500MW).

Son principe repose sur la mise en série de 2 redresseurs d'ordre 6 (ondulation de 6 arches/période de la tension redressée). Les 2 réseaux redressés sont déphasés de  $30^\circ$  par le jeu des couplages étoile/triangle des secondaires, ainsi:

la tension totale redressée de 270 kV est d'ordre 12; donc moins de difficultés à lisser le courant.

on montre que si le rapport de transformation étoile/étoile est  $m$  ( $400\text{kV}/\sqrt{3}/118\text{kV}/\sqrt{3}$ ) et le rapport étoile/triangle est  $m/\sqrt{3}$  ( $400\text{kV}/118\text{kV}$ ), alors au primaire et pour chaque phase, l'allure des courants composés des 2 secondaires est exempt d'harmoniques 5, 7, et les premiers harmoniques sont théoriquement aux rangs 11 et 13.

**Concernant les transformateurs utilisés, le choix d'EDF était à faire entre:**

- 3 transfos monophasés à double secondaire de 206MVA, soit  $S=618\text{MVA}$ .
- 2 transfos triphasés (secondaires étoile/triangle) de 309MVA, soit  $S=618\text{MVA}$ .

Le choix d'EDF s'est porté sur les transfos mono pour 3 raisons:

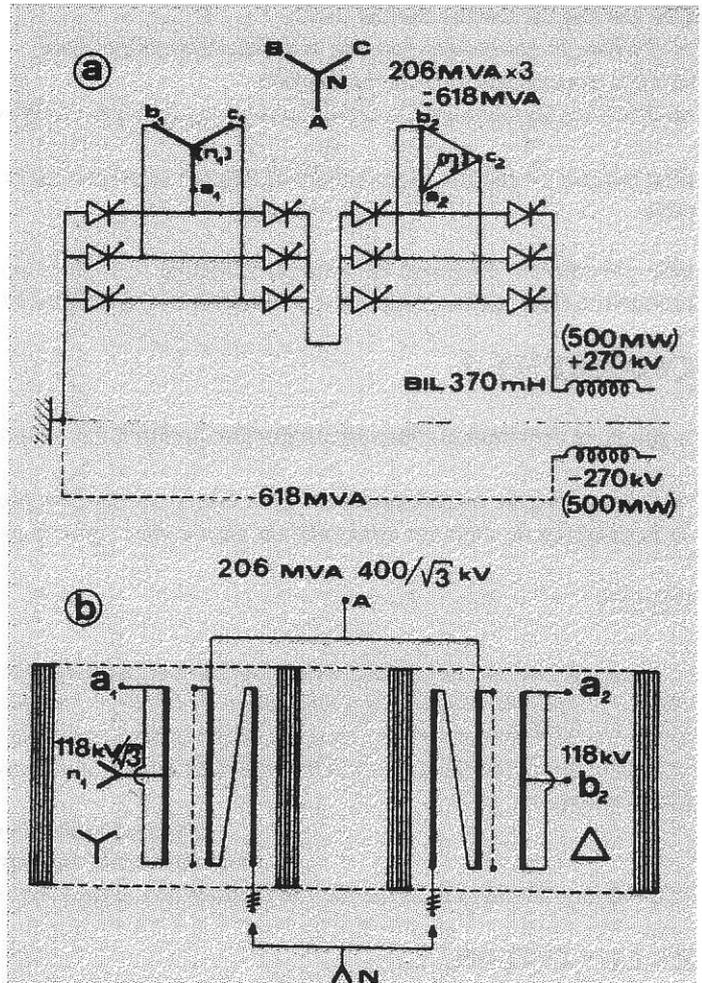
- 1) dans un cas un seul transfo mono de secours est nécessaire et pour l'autre cas 2 transfos sont nécessaires.
- 2) poids total avec transfos mono:  
 $185\text{ tonnes} \cdot (4 \cdot 3 + 1) = 2405\text{ tonnes}$   
 $273\text{ tonnes} \cdot (4 \cdot 2 + 2) = 2730\text{ tonnes}$
- 3) EDF était dans l'impossibilité de transporter par train les transfos triphasés car hors gabarit et le transport routier restait délicat à mettre en oeuvre.

**Concernant les convertisseurs d'énergie, le choix d'EDF s'est porté sur:**

Deux ponts de graëtz sont enfermés dans trois tours aéroréfrigérées de 13 m de haut, 10 de large, 2.5 de profondeur et pesant 40 tonnes. Chaque tour abrite 4 thyristors en série mais en fait, ce ne sont pas 4 thyristors qui sont enfermés mais  $4 \cdot (96 \cdot 2) = 768$  composants. Chaque fonction thyristor résulte de l'association de 2 branches parallèles de 96 thyristors en série.

Chaque thyristor a un diamètre de 77 mm de caractéristiques 4500V/1350A à  $70^\circ\text{C}$  et est commandé par fibre optique avec redondance.

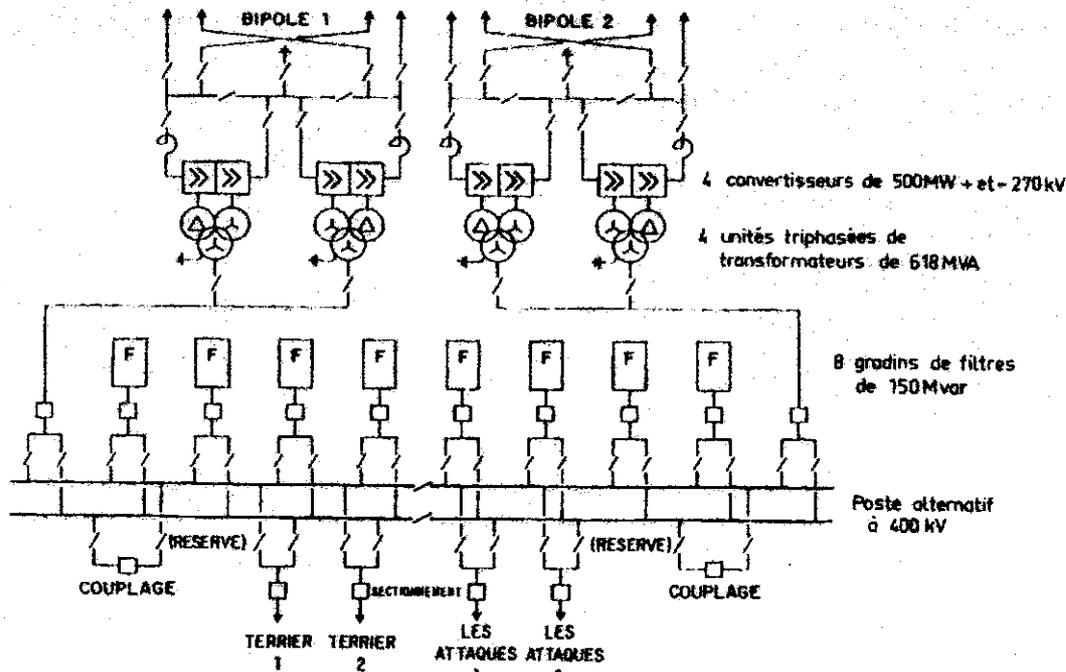
Au total  $4 \cdot (3 \cdot 768) = 9216$  thyristors ont nécessité pour leur commande 200 km de fibre optique pour les quatre unités de 500MW.



**L'ELECTROTECHNIQUE DANS TOUTE SA PUISSANCE...**

# STATION DE CONVERSION D'ENERGIE IFA2000 PRINCIPES GENERAUX

## CONFIGURATION DE LA STATION IFA2000



### 2 stations indépendantes de 1000MW chacune.

Chaque station est équipée de 2 transfos de 618 MVA et de 4 convertisseurs statiques alimentés sous 118kV. Par rapport à la mise à la terre, 2 tensions de  $\pm 270\text{kV}$  sont appliquées aux lignes continues de 1852A.

Au total, 8 câbles de  $970\text{mm}^2$  en cuivre isolés au papier imprégné transportent chacun 250 MW. La disposition par paires a pour but de minimiser le champ magnétique perturbateur pour les navires et rayonné par un câble.

L'originalité essentielle de cette liaison réside dans l'ensouillage des câbles en 4 tranchées distantes de 1000m de 1.5m de profondeur et 0.60m de large et pour 45 km de longueur. L'ensouillage s'est imposé naturellement après l'échec d'une première liaison IFA160 de 160MW datant de 1961, à redresseurs à vapeur de mercure et câbles déposés.

Les avaries fréquentes consécutives aux accrochages de chaluts a conduit à l'abandon de son exploitation.

Les ondulations d'ordre 12 de la tension redressée ont nécessité une self de 0.37H pour chacun des 4 départs continus.

En redresseur, l'angle nominal de retard à l'amorçage est de  $15^\circ$ . C'est peu mais nécessaire pour la régulation de la puissance et pourtant suffisant pour nécessiter une batterie de 8 filtres fournissant 1200MVAR à puissance nominale de 2000MW. En onduleur, l'angle de garde nominal est de  $18^\circ$ .

#### Transformateurs

Puissance monophasée	: $2 \times 103 \text{ MVA}$
Tension côté réseau alternatif	: $400 \text{ kV}/\sqrt{3} \pm 10 \% (\Delta)$ en charge
Tension côté valves	: $118 \text{ kV}/\sqrt{3} \pm 1 \% (\Delta)$ en charge $118 \text{ kV} \pm 1 \% (\Delta)$
Réactance principale	: 22 %
Réactance entre enroulement de valve	: $> 42 \%$
Masse du colts principal	: 185 t (sans huile)
Masse en ordre de marche	: 256 t

#### Bobines d'inductance de lissage

Courant continu nominal	: 1 852 A
Inductance	: $350 \text{ mH} < L < 390 \text{ mH}$ , pour $I < 2 220 \text{ A}$ $L > 260 \text{ mH}$ pour $I = 7 000 \text{ A}$
Tension continue maximale	: 277 kV
Masse du colts principal	: 74 t (avec huile)
Masse en ordre de marche	: 86 t

**L'ELECTROTECHNIQUE DANS TOUTE SA PUISSANCE...**

# STATION DE CONVERSION D'ENERGIE IFA2000

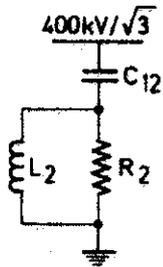
## PRINCIPES GENERAUX

### FILTRAGE DES HARMONIQUES POUR:

l'élimination des harmoniques 11 et 13 contenus dans les courants côté réseau 400kV.

la compensation du réactif dû au déphasage du fondamental des courants, si le retard à l'amorçage est non nul .

a - Filtre d'ordre 2



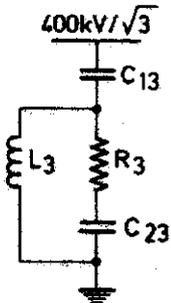
Puissance réactive triphasée 150Mvar

$$C_{12} = 3,18 \mu\text{F}$$

$$R_2 = 234 \Omega$$

$$L_2 = 27,8 \text{ mH}$$

b - Filtre d'ordre 3



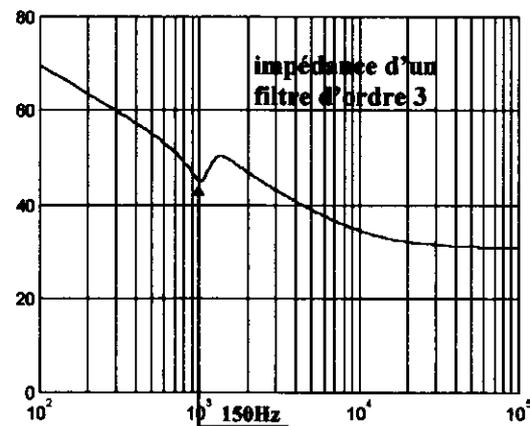
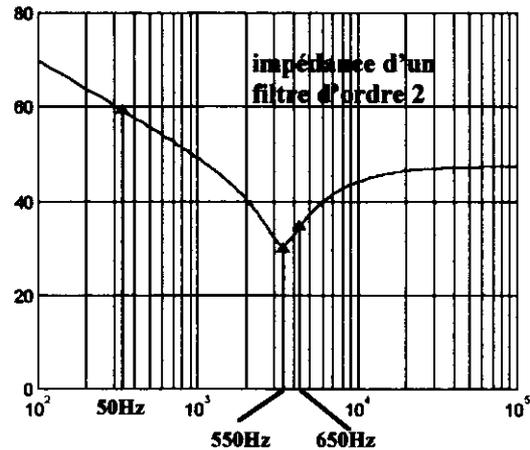
Puissance réactive triphasée 150Mvar

$$C_{13} = 3,25 \mu\text{F}$$

$$C_{23} = 9,55 \mu\text{F}$$

$$R_3 = 35 \Omega$$

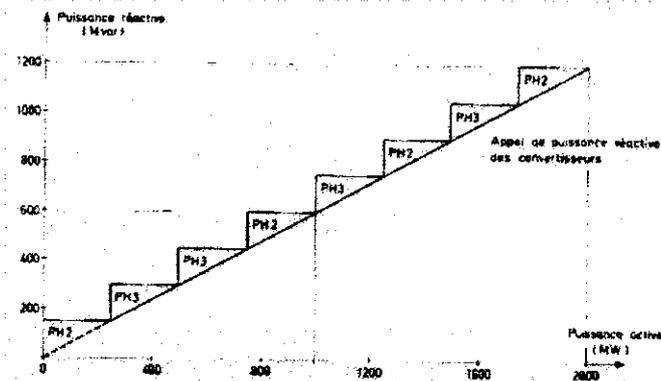
$$L_3 = 74,3 \text{ mH}$$



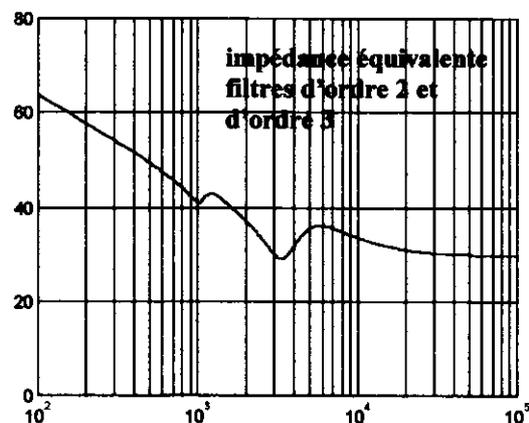
**PRINCIPE:** 4 filtres d'ordre 2 de puissance unitaire de 150 MVAR à 50Hz. La courbe d'impédance montre un minimum pour les harmoniques 11 et 13 et une

asymptote à 234 Ω pour les harmoniques de rang supérieur.

4 filtres d'ordre 3 de puissance unitaire de 150 MVAR à 50Hz. La courbe d'impédance montre un minimum pour l'harmonique 3 non caractéristique mais néanmoins présent en pratique.



commutation des huit gradins de filtres (0 à 1200MVAR) selon de la puissance P échangée.



courbe d'impédance de deux cellules d'ordre 2 et d'ordre 3 connectées en parallèle.

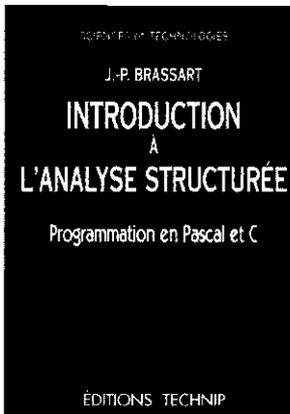
**L'ELECTROTECHNIQUE DANS TOUTE SA PUISSANCE...**



# ÉDITIONS TECHNIP

27, RUE GINOUX, 75737 PARIS CEDEX 15 • FAX 01 45 75 37 11 • TÉL. 01 45 78 33 80

## *Nos Nouveautés*

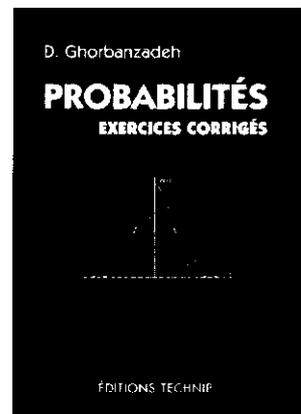


### **INTRODUCTION À L'ANALYSE STRUCTURÉE Programmation en Pascal et C**

Des outils simples et efficaces pour le programmeur débutant.  
J.-P. Brassart. *Broché*, 16 x 23, 120 p. **170 F**

### **PROBABILITÉS Exercices corrigés**

Enfin un recueil d'exercices originaux pour les étudiants de second cycle en économie ou formation d'ingénieur. D. Ghorbanzadeh.  
*Broché*, 17 x 24, 288 p. **170 F**



### **LE RADIO-AMATEUR Préparation à l'examen technique.** Manuel de référence Cette nouvelle édition entièrement révisée d'un ouvrage à succès présente, entre autres, six cents problèmes avec solutions. Elle met l'essentiel de la technique radio-amateur à la portée de tous. O. Pilloud. *Broché*, 17 x 24, 544 p. **270 F**

### **LES CONVERTISSEURS STATIQUES Méthodologie causale de modélisation et de commande**

J.-P. Hautier, J.-P. Caron. *Relié*, 16 x 24, 320 p. **290 F**

### **INTRODUCTION À LA THÉORIE DU SIGNAL ET DE L'INFORMATION**

Une présentation rigoureuse des techniques de traitement du signal, illustrée par des exercices corrigés abordant des situations concrètes souvent liées à des applications industrielles.

F. Auger. *Broché*, 16 x 23, 416 p. **290 F**



## 3EI'99 SUPELEC les 11 et 12 mars 1999

Journées de l'enseignement de l'électrotechnique et de l'électronique industrielle.

### CONTROLE ET COMMANDE DES SYSTEMES ELECTROTECHNIQUES

Comité d'organisation présidé par Jean FAUCHER (LEEI-ENSEEIH), président du club 13-SEE :  
MM. BOUCHER P. et DUMUR D. (SUPELEC, serv. auto.), CARON J.P. et HAUTIER J.P. (L2EP, Lille),  
MEUNIER M. (SUPELEC, serv. EEI), TRIGEASSOUS JC (LAI, ESI de Poitiers).  
Mme LE BIHAN M. Michèle, MM. BOUCHER F., DELAVIER G. (Animateurs du Cercle 13.01-SEE)

Quelle démarche adopter pour réaliser la commande d'un système électrotechnique ?

- **Analyser** : la commande d'un système ne peut se faire qu'à partir d'une analyse rigoureuse, sans ambiguïté, des relations de cause à effet régissant le comportement de l'objet à commander.
- **Identifier et modéliser** : la modélisation en vue de la commande est une étape obligatoire d'adaptation du problème posé aux outils de l'automatique dont on dispose.
- **Concevoir la stratégie de commande**.
- **Simuler** : simulation des modèles de commande utilisée comme aide au réglage de ces commandes; simulation des modèles de connaissance pour construire des modèles de commande, mais aussi pour tester avec réalisme le comportement de l'objet associé à sa commande.

Ces journées d'études seront menées sous trois formes :

#### Conférences plénières :

- Présentation générale de l'analyse d'un système en vue de réaliser sa commande répondant à des objectifs précis.
- Identification, modélisation, simulation de modèle, comparaison avec la réalité.
- Méthodes de l'automatique appliquées aux systèmes électrotechniques.
- Exploitation de la simulation dans le domaine industriel.
- Structures et calculs de commandes appliquées à des exemples industriels.

#### Ateliers : (durée totale 4h 30)

Trois thèmes d'études seront développés au cours de ces séances de travail en groupes réduits:

- régulation dans une alimentation à découpage; (1h 30)
- commande en vitesse d'une charge entraînée par machine à courant continu associée à un hacheur; (1h 30)
- commande en vitesse d'une charge entraînée par une machine asynchrone associée à un convertisseur de fréquence. (1h 30)

Pour chacun de ces thèmes, l'étude comportera trois étapes :

- analyser, comprendre, caractériser;
- identifier, modéliser, simuler le modèle, comparer avec la réalité;
- rechercher la structure et calculer les commandes.

#### Session "POSTERS" :

Présentation de thèmes d'études, de travaux expérimentaux, de matériels industriels et pédagogiques.

## Inscriptions

à effectuer à la SEE, auprès de madame LE BRUN  
tel : 01 44 49 60 15 fax : 01 44 49 60 44

Les professeurs des lycées techniques et PRAG, dont les inscriptions ne sont pas prises en charge par les MAFPEN bénéficient d'un tarif spécial 400 F TTC. (Le montant comprend la participation aux sessions, le recueil des actes, les déjeuners). Ils doivent retourner la copie de ce bulletin d'inscription, dûment rempli

**impérativement avant le 5 février 1999**

à la SEE, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de la SEE, à l'adresse suivante :  
SEE, Madame Solange LE BRUN (3EI'99),  
48 rue de la Procession, 75 724 PARIS CEDEX 15

Nom.....Prénom.....

Adresse.....

Etablissement d'exercice.....