

Les supraconducteurs : des propriétés aux applications électrotechniques

A. Rezzoug, J.P. Caron, J. Lévêque, D. Netter, B. Douine, K. Berger, E.H. Ailam

Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy

www.green.u-nancy.fr

Résumé : Les supraconducteurs constituent des matériaux d'avenir pour l'électrotechnique. Les bénéfices apportés dans les applications, ajoutés au gain de volume et de poids sont des atouts suffisants pour que l'on ne puisse pas faire d'impasse sur les études qui les concernent. L'article, loin de donner un panorama complet des applications actuelles et encore moins de celles de demain, souhaite simplement attirer l'attention sur un champ d'étude important pour les laboratoires et avec des développements industriels tout à fait acceptables. Des matériaux nouveaux et une cryogénie de plus en plus simple rendent de nombreuses applications possibles.

Mots clés – supraconducteurs, limiteurs, moteurs électriques, câbles électriques,

Introduction

Après avoir vécu des fortunes diverses, les supraconducteurs sont en passe de conquérir de façon significative le domaine de l'électrotechnique. S'il fallait retenir quelques dates et périodes on peut donner 1911 pour la première observation de la disparition de toute résistance mesurable du mercure en dessous d'une certaine température. Les années 60 ont vu les premières applications et suscité un grand enthousiasme dans le monde de l'électrotechnique. La croissance de la demande en énergie électrique dans les pays fortement industrialisés a mobilisé les efforts sur sa production, sa transformation, son transport et son stockage. La compacité annoncée a ouvert tout un champ d'application pour les moteurs de propulsion navale essentiellement.

Pendant ce temps là, les modèles théoriques avancent et permettent, dès 1957, l'interprétation des phénomènes observés. Malgré tous ces efforts, les problèmes de cryogénie tournante et la crise économique des années 70 contribuent à freiner les travaux, en France en particulier.

En 1986, la découverte de céramiques ayant une température de transition résistive nettement plus élevée que celles connues jusqu'alors fit le coup d'une bombe à travers le monde entier. Concernant les applications dans le domaine de l'électrotechnique, l'enthousiasme a d'abord été modéré compte tenu des propriétés physiques de ces matériaux. Depuis les procédés de fabrication ont nettement évolué et tout permet de croire que de nombreuses applications verront le jour industriellement dans un avenir proche.

L'article se propose de faire le point sur les potentialités des supraconducteurs, et sur les travaux et applications électrotechniques à travers le monde.

La bibliographie, loin d'être exhaustive, est repérée de la façon suivante [n] pour les ouvrages, thèses et revues, [m] pour les sites actifs internet pendant la rédaction de cet article.*

I- Propriétés

Les parties suivantes n'ont pas pour ambition de reprendre les théories développées ou en devenir, mais de passer en revue quelques propriétés des supraconducteurs. Il est nécessaire de les connaître, de faire ressortir les avantages et d'appréhender les difficultés lors de la mise en œuvre de ces matériaux [1*].

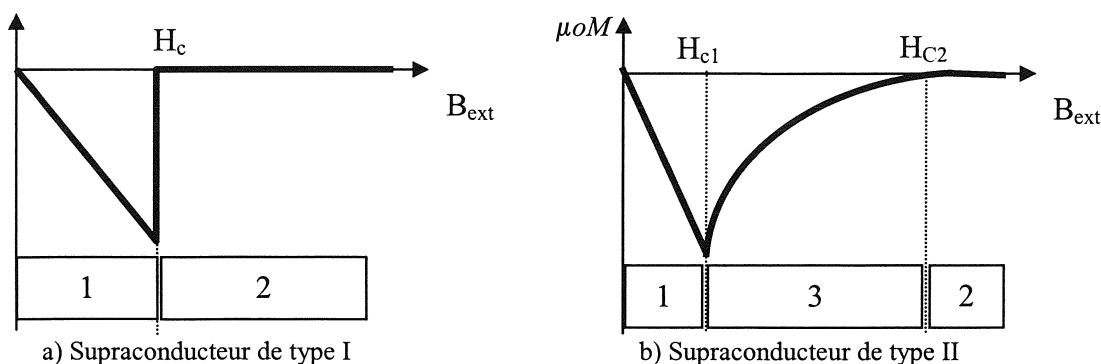


Figure 1 : Comportement d'un matériau supraconducteur.

Zone 1 : Etat supraconducteur (Résistivité nulle et effet Meissner)

Zone 2 : Etat normal

Zone 3 : Etat mixte (Résistivité nulle)

I.1 Propriétés magnétiques

Un matériau supraconducteur, refroidi sous champ magnétique B_{ext} , expulse les lignes d'induction. Le champ magnétique B à l'intérieur du matériau s'annule, cet effet est appelé effet Meissner et se traduit par l'équation : $\vec{B}_{ext} + \mu_0 \vec{M} = 0$ pour

$B_{ext} < \mu_0 H_c$, et \vec{M} étant l'aimantation du matériau. Cette propriété est observée pour une catégorie de matériaux dits de type I. La valeur de H_c , étant particulièrement basse, ne permet pas d'envisager d'application dans le domaine de l'électrotechnique. Une seconde catégorie de matériaux, dits de type II, présentent une transition moins brutale et continuent à avoir des propriétés électriques supraconductrices pendant la phase de décroissance de $|\mu_0 \vec{M}|$. Dans cette zone, délimitée

par H_{c1} et H_{c2} , on parle d'état mixte dans lequel le flux magnétique dans le matériau n'est pas nul. Cependant la répartition de ce flux n'est pas continue, le champ circule dans des tubes élémentaires appelés vortex et portant chacun un flux Φ_0 de valeur fixe : $2 \cdot 10^{-15}$ Wb.

La valeur de $B_{c2} = \mu_0 H_{c2}$ peut atteindre plusieurs dizaines de Tesla et permet d'envisager des applications dans le domaine de l'électrotechnique. Une attention particulière doit être prêtée au comportement du matériaux dans l'état mixte, car il correspond aux utilisations électrotechniques. Concernant la répartition des vortex eux-mêmes, on montre [1] que leur répartition n'est pas aléatoire mais se fait en général selon un pavage triangulaire. Si un courant extérieur est imposé, chaque tube de flux est soumis à une force de Lorentz, dont l'expression par unité de longueur est connue sous la forme $\vec{f} = \vec{J}_{ext} \wedge \Phi_0 \vec{u}$. S'il n'y a aucun « ancrage » des tubes, ils vont se déplacer [2*] globalement comme dans un milieu visqueux. Ce déplacement, à vitesse \vec{v} , est à l'origine d'un champ électrique $\vec{E} = -\vec{v} \wedge \vec{B}$, proportionnel à \vec{J}_{ext} et qui induit une dissipation d'énergie. On comprend alors que pour son utilisation un matériau doit être traité pour créer des sites d'ancrage de vortex. Il faut alors qu'il soit porteur d'impuretés ou/et de dislocations.

I.2 Propriétés électriques

Un modèle macroscopique permettant de lier la densité de courant au champ électrique est suffisant pour étudier les pertes, ce qui constitue un élément essentiel pour l'utilisateur. Tout d'abord il faut dire que la loi d'Ohm classique, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, n'est pas adéquate.

Pour les supraconducteurs à basse température critique, un modèle proposé par Bean (1962) s'appuie sur le fait que à température donnée, $|\vec{J}|$

ne peut prendre que 2 valeurs : 0 ou J_c appelée densité de courant critique. Ce modèle qui a l'avantage d'être très simple convient moins bien pour les supraconducteurs dits à haute température critique. Une loi empirique, dite loi « en puissance », traduit mieux le passage non brutal de l'état supraconducteur à l'état conducteur $E(J)$. On

écrit $E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n$, où E_c est appelé champ

critique et défini conventionnellement comme $E_c = 1 \mu V/cm$.

I.3 Pertes

Quand le matériau supraconducteur est traversé par un courant continu la présence du champ électrique conduit à des pertes volumiques $w_p = \int \vec{E} \vec{J} dt$.

Dans le cas où un supraconducteur est traversé par un courant alternatif, ou lorsqu'il est soumis à un champ extérieur variable, les vortex apparaissent, disparaissent, se déplacent et se réorganisent dans le temps. Toutes ces variations sont à l'origine de pertes de valeurs (à courant maximum donné) bien plus importantes que les pertes en courant continu [3], [4], [5]. Les problèmes posés par les mesures de ces pertes, ainsi que ceux posés par leurs modélisations, constituent un champ d'investigation pour de très nombreux chercheurs dans le monde.

II- Les matériaux

Compte tenu des difficultés liées aux matériaux eux mêmes et dont une partie des mécanismes a été décrite plus haut, les potentialités offertes par leurs applications sont jugées assez importantes pour justifier le développement de processus industriels complexes, propres à fournir des matériaux pour l'électrotechnique.

Pour les basses températures critiques, les matériaux utilisés se prêtent bien aux traitements mécaniques, on peut citer NbTi, Nb₃Sn.

Concernant les matériaux à haute températures critiques, les premiers composites, YBa₂Cu₃O_{7-x}, plus communément noté YBCO et (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ plus communément noté Bi-2223 et Bi-2212, se présentent in-fine sous forme d'une céramique difficile à manipuler. Un candidat plus récent, le diborure de magnésium, MgB₂, ouvre de nouveaux horizons pour une réalisation plus simple de câble.

L'ensemble de ces matériaux fait l'objet de progrès comme en témoignent les publications et congrès qui se tiennent sur le sujet.

Fils

Pour les BTC la diminution des pertes et la protection thermique passent par un processus permettant une subdivision des supraconducteurs, jusqu'à des diamètres inférieurs au μm par filament, la mise de ces filaments dans des matrices conductrices et le "torsadage" pour éviter les pertes par courants induits. Les alliages constituant ces matériaux permettent leur fabrication par tréfilage et étirage.

Même si les conducteurs HTC sont constitués de céramiques, les problèmes posés étant de même type, l'industrie développe des techniques de production de composites obtenus par assemblage de tubes contenant de la poudre (Oxyde Powder in Tube, OPIT) de précurseurs contenu dans une gaine d'argent. Le résultat est l'obtention de ruban de largeur de quelques millimètres et d'épaisseur submillimétrique. Plusieurs jours de recuit en atmosphère oxygénée sont nécessaires.

Une autre voie utilise des procédés par dépôt multicouches permettant l'obtention continue de rubans. Les techniques actuelles permettent d'obtenir des longueurs décamétriques avec des densités de courants critiques $J_c > 10^5 \text{ A/cm}^2$ à 77 K.

Massifs

Les propriétés des matériaux massifs, qui peuvent trouver des applications comme on le verra plus loin, font aussi l'objet de développements quotidiens. Ces matériaux sont constitués de domaines appelés grains, liés les uns aux autres par des joints de grain qui diminuent les caractéristiques supraconductrices sans que ce soit toujours rédhibitoire. Le diamètre des pastilles monograins obtenues peut atteindre 10 cm [6].

Comme on le constate à travers ce court paragraphe, le chemin à parcourir entre l'échantillon de laboratoire et le matériau destiné à une application industrielle est particulièrement difficile [7]. L'environnement cryogénique vient s'ajouter à ce constat pour expliquer que, malgré tous les efforts et moyens développés, le champ des applications reste encore largement en friche. Mais les caractéristiques offertes en termes de densité de courant [3*], de champ écarté, de faibles pertes, de temps de réaction à une transition de courant constituent des attraits assez importants pour que des scientifiques et des industriels y croient.

Face aux précédents il existe des matériaux encore sur les paillasse, comme les supraconducteurs organiques (Orsay 1981), les fullérènes (60 atomes de carbones formant une sphère et dopés), ou toujours en développement comme les phases de Chevrel avec lesquelles on réalise des multibrins mais qui posent des problèmes de stabilité.

III- Les applications

III.1 Limiteurs

C'est de notre point de vue l'application la plus caractéristique des supraconducteurs en ce sens que, s'appuyant sur la propriété intrinsèque du matériau à transiter au delà de I_c , l'on fabrique un dispositif capable de limiter la montée accidentelle d'un courant avec un temps de réponse largement plus faible que celui de tout autre dispositif existant. Les appareillages fabriqués utilisent aussi bien des matériaux à basse température critique que des matériaux à haute température critique. Un des problèmes posés par ce dispositif est le temps de recouvrement de sa fonction de limiteur après une première transition.

Réalisé en BSCCO ou en YBCO, sous forme massive ou en ruban, il doit limiter le courant à des valeurs de l'ordre de quelques I_n , avec un temps de réponse de quelques ms et avoir un temps de récupération de quelques secondes.

Les européens mènent des travaux assez importants pour être salués, avec à titre d'exemples la réalisation d'un démonstrateur ayant les caractéristiques suivantes : 1 kV, 100A, 90K [6]. De nombreux autres projets sont présentés dans [8]. Le projet ABB constitue une première implantation dans une centrale hydraulique (10 kV, 1MVA, 77K, B-2212) à Glarus en Suisse. A travers le monde tous les pays où il existe une activité dans les supraconducteurs ont leur programme sur les limiteurs.

III.2 Machines tournantes

Les gains attendus sur la masse, la taille et le rendement sont assez importants pour qu'un intérêt soutenu soit accordé aux machines supraconductrices. Les applications attendues vont de la propulsion de navires à la production d'électricité.

Les applications des supraconducteurs pour la réalisation de machines électriques sont nombreuses et peuvent conduire à des structures très originales. On peut utiliser les conducteurs pour créer un champ inducteur sans pertes par effet Joule dans l'enroulement. Si ce type d'application a fait partie des premières investigations concernant les machines alternatives, l'arrivée de matériaux à haute température critique a suscité de nouveaux développements. On peut citer le moteur synchrone d'American Superconductor dont l'inducteur, réalisé en B-2223, fonctionne à 30K. Le rendement de cette machine est de 97,7% 3.8 MW-6,6 kV. SIEMENS pour sa part a essayé un moteur de 400 kW. Les gains obtenus sont dus non seulement à la valeur du champ magnétique inducteur mais aussi à un plus grand taux de remplissage en cuivre dans un stator sans fer [9]. Bien d'autres travaux existent avec ce type de machine.

A l'instar de machines à réluctance à rotor laminé ou à pans coupés, on peut imaginer de mettre des lames de supraconducteur massif ou des blocs sur les côtés du rotor pour canaliser le champ à travers le rotor d'une machine. On peut citer, pour illustrer ce principe, un projet (Oswald project [10]) de moteur à réluctance de 150 kW avec des lames en YBCO au rotor refroidies à 77K.

En dernier lieu des machines de conception originale, avec concentration et distribution de flux à l'aide d'une distribution spatiale de pastilles supraconductrices peuvent être développées dans le futur. Un dispositif rotorique de ce type a été testé dans notre laboratoire [11].

III.3 Paliers magnétiques

Un supraconducteur massif en YBCO permet la réalisation de paliers à sustentation magnétiques autostables, ne nécessitant aucun réglage de courant, comme c'est le cas dans des dispositifs existant, [3*], [4*], [5*]. Nous avons tous en tête l'expérience de l'aimant flottant sur une pastille supraconductrice. On peut se servir d'un tel système comme palier de moteurs (supraconducteur ou pas) ou pour des volants de stockage d'énergie tournant à des vitesses élevées « Flywheels » (16 000 trs/mn). Au Japon, un tel système d'une énergie de 10 kWh est déjà réalisé, et un projet de recherche et développement d'une unité de 100 kWh est soutenu par le « New Energy and Industrial Technology Development Organization » depuis l'an 2000. Le contrôle inertiel des satellites, où la diminution de volume et de poids est une notion importante, offre une autre voie d'application pour ces dispositifs [12].

III.4 Transformateur

Les transformateurs utilisant des enroulements supraconducteurs à haute température critique permettent des gains de poids et de rendement substantiels, quand on les compare à des systèmes conventionnels [6*], [7*], [8*].

Depuis quelques années, plusieurs projets de développement de transformateurs utilisant des supraconducteurs à haute température, ont été lancés en Europe, aux U.S.A. et au Japon.

Après avoir testé avec succès un transformateur de laboratoire de 100 kVA, la société Siemens a développé un transformateur monophasé de 1 MVA destiné à être embarqué dans les systèmes de traction électrique. Les caractéristiques de ce transformateur sont les suivantes : supraconducteur : AgMg-sheathed Bi2223, 50 Hz, 25 kV / 2x1,5 kV, refroidi à l'azote (66K - 1,5 bars). Aux U.S.A., un prototype de transformateur de puissance 5 / 10 MVA est en cours de réalisation.

D'autres laboratoires travaillent à la conception et la réalisation d'un transformateur toroïdal sans fer, ce qui réduira encore les pertes dans ces machines

électriques. Un autotransformateur de 100 MVA fait aussi l'objet d'étude au Japon [12].

III.5 Lignes

Concernant les lignes de transport de l'électricité, il s'agit pour le moment de développer des liaisons décamétriques pour des tronçons de réseau souterrains urbains et/ou pour des sous stations. On peut citer, à titre d'exemple, le projet Sumitomo d'un câble B-2223 triphasé 66 kV/ 1kA sur 30 m avec des pertes de 0,5W par mètre et par phase [9*], [10*].

On peut profiter de ce moment de l'exposé pour dire que la dérégulation va s'accompagner d'une réorganisation du réseau avec la mise en place d'éléments plus puissants dans des infrastructures existantes (locaux, conduits). L'introduction de dispositifs supraconducteurs permet de répondre à ce problème. D'où l'intérêt qui lie les câbliers et les compagnies d'électricité comme par exemple ABB/EDF/ASC.

III.6 Aimants

Actuellement, et sûrement pour longtemps, le monde des aimants pour la physique est le plus gros consommateur de supraconducteurs. Aussi nous ne ferons que citer quelques exemples. Les problèmes posés par ces dispositifs relèvent non seulement de l'électromagnétisme (pour engendrer des dizaines de Tesla pour certaines applications) mais aussi de la mécanique de précision ou de la mécanique des fluides.

- Aimants d'accélération : on peut citer les premiers dipôles et le quadrupôle réalisés respectivement dans le CERN et le FERMILAB dans le cadre du projet LHC. Il s'agit d'aimants délivrant quelques Tesla, parfois avec des gradients très élevés (215 T/m) et refroidis à 1,9K. Les conducteurs utilisés, Nb₃Sn, peuvent supporter des densités de courant dépassant les 2500 A/mm². Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) mobilise une communauté très large sur le calcul et la réalisation des aimants.

- Solénoïdes : ils intéressent de nombreux laboratoires, on peut citer une bobine (NbTi) produisant un champ de 4,1T dans un trou de 430 mm de diamètre (Il existe aussi des aimants à 30 T!). On peut mettre dans cette catégorie des solénoïdes destinés au chauffage par induction et permettant un grand gain sur les pertes.

- Aimants pour l'imagerie médicale : c'est sûrement l'application la plus populaire. Il s'agit d'obtenir des champs de 0,5 à 4 Tesla avec une grande précision sur l'uniformité du champ (10 ppm).

Les méthodes développées pour l'élaboration des aimants destinés à l'imagerie médicale peuvent largement trouver des utilisations dans l'industrie.

La liste est loin d'être close, on peut citer les applications à la séparation magnétique des matériaux qui combine la production de champ

élevé dans un espace large et de gradient de H^2 fort localement [13]

III.7 Stockage

Comme on le sait un des grands challenges concernant l'énergie électrique est son stockage. Parmi les possibilités potentielles, les bobines supraconductrices sont de bonnes candidates.

On peut citer deux utilisations aboutissent à des dispositifs de conception différente :

- La réalisation de lanceurs électro-magnétiques nécessite un destockage rapide de l'énergie [14],[15].

- Un stockage et destockage lent de l'énergie sont mis en œuvre dans les dispositifs de régulation du réseau.

Conclusion

Loin de faire le tour de la question, cet article est plutôt destiné à montrer les voies de recherche et de développement qui mettent en jeu les supraconducteurs pour l'électrotechnique. L'arrivée de nouveaux matériaux mais aussi de moyens de refroidissement plus pratiques (cryocoolers)

ouvrent de nombreuses perspectives aux chercheurs et doivent trouver leur développement à travers une mobilisation industrielle plus importante. La combinaison d'un ensemble de dispositifs supraconducteurs permet déjà à des trains à sustentation magnétique de battre des records et à des bateaux sans hélice de naviguer, dans ce dernier cas il reste bien sûr des progrès à faire. L'arrivée de matériaux nouveaux permet de rêver à des applications ne nécessitant pas une cryogénie compliquée qui freine les applications, il faut noter que des progrès significatifs ont déjà été faits dans le domaine. Nous n'avons parlé que d'électrotechnique, les applications en électronique, plus particulièrement aux transistors (à effet de champ, à flux de vortex) sont aussi à considérer ... parce que souvent l'interrupteur de puissance n'est pas loin. Enfin les considérations technico économiques fixent la barrière à franchir pour une utilisation plus importante de dispositifs supraconducteurs. Un indicateur courant est le coût par kAm, le cuivre se situant à 10\$/ kAm, le tableau suivant [16] constitue la fin de notre article.

Application	Quelques objectifs à atteindre pour que les applications soient viables					
	Jc(A/cm ²)	Champ(T)	Temp (K)	Ic(A)	Long. (m)	Coût(\$/kAm)
Limiteur de courant	10 ⁴ à 10 ⁵	0,1 à 3	20 à 77	10 ³ à 10 ⁴	1000	10 à 100
Moteur (1000 cv)	10 ⁵	4 à 5	20 à 77	500	1000	10
Moteur (125cv)	1,5.10 ⁴	1 à 2	30	100	300	10 à 100
Générateur (100 MVA)	10 ⁵	4 à 5	20 à 50	> 1000	1000	10
SMES (1 MWh)	10 ⁵	5 à 10	20 à 77	10 000	1000	10
Câble de transport	10 ⁴ à 10 ⁵	< 0,2	65 à 77	100 par fil	100	10 à 100
Transformateur	10 ⁵	0,1 à 0,5	65 à 77	10 ² à 10 ³	1000	< 10

Références :

- [1] LEVY Laurent-Patrick, Magnétisme et supraconductivité – CNRS éditions EDP Sciences 1998
- [2] KITTEL Charles, Physique de l'état solide – DUNOD 1998
- [3] DOUINE Bruno, Etude des pertes dans les supraconducteurs à haute température critique, Thèse de l'Université Henri Poincaré 7 nov. 2001
- [4] VINOT E., Modélisation des supraconducteurs HTC Application aux pertes AC, Thèse de l'INPG 2000
- [5] KLUTSCH Isabela, Modélisation des supraconducteurs et mesures, Thèse de l'INPG 26 septembre 2003
- [6] BUZON Didier, Limitation de courant à partir de matériaux supraconducteurs, Thèse INPG 30 septembre 2002
- [7] IEEE on Applied superconductivity juin 2003-Part III (Applied superconductivity conference-Houston 4-8 août 2002)

- [8] J. LEVEQUE, A. REZZOUG , A new kind of superconducting limiter Superconductor Science and Technology, Vol. 15, 2002
- [9] Swarn S. Kalsi, Development status of superconducting rotating machines, IEEE PES meeting New York 27-31 janvier 2002
- [10] B. Oswald & al, Superconducting reluctance motors with YBCO bulk material, IEEE Tran. Appl. Supercond. Vol 9, no2 1999
- [11] MASSON Philippe, Etude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs, Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale, Thèse de l'UHP, 17 décembre 2002
- [12] IEEE on Applied superconductivity juin 2003- Part II (Applied superconductivity conference- Houston 4-8 août 2002)
- [13] SIDO N. M., MAILFERT A., COLTEU A., Magnetic percolation and filtration efficiency of a high gradient magnetic separator 17th International Conference on Magnet Technology (MT 17), Genève, 24-28 Septembre 2001- IEEE Trans. on Mag.
- [14] NETTER Denis, Etudes théoriques et pratiques des phénomènes liés à la transition des bobines supraconductrices en régimes de décharge impulsione, Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy1, 10 janvier 1997
- [15] PICAUD Vincent, Contribution à l'étude d'une alimentation impulsione supraconductrice Intérêt des conducteurs à haute température critique, Thèse de l'Université de Franche Comté 18 décembre 2002
- [16] David Larbalestrier & al, High Tc superconducting materials for electric power applications, Nature volume 414- 15 novembre 2001
- [17] HO TAM FOU Sandra, Modélisation des dispositifs supraconducteurs application à la lévitation magnétique, Thèse de l'Université Paris XI, 6 octobre 2000
- [1*] www.Lema.phys.univ-tours.fr
- [2*] www.fys.kuleuven.ac.be/vsm/vortex/pp/vortex10.htm
- [3*] www.kepri.re.kr/sfes/paper/po24.pdf
- [4*] www.lim.polito.it/ISMST6/pdf/ISMST6.117.pdf
- [5*] www.kepri.re.kr/sfes/paper/po25.pdf
- [6*] <http://eii.unex.es/aes/ASC2002/Trafo.pdf>
- [7*] <http://www.gasandoil.com/goc/features/fex80976.htm>
- [8*] <http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news/103799319061.html>
- [9*] www.sei.co.jp
- [10*] www.tepco.co.jp