

## 17. Stockage de l'énergie

### 17.8 – Stockage électromagnétique

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Victor Aveline, M.ing.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Inductance et bobines
- Les matériaux supraconducteurs
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Application et état de l'art
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Inductance et bobines
- Les matériaux supraconducteurs
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Application et état de l'art
- Conclusion

# Introduction et objectifs

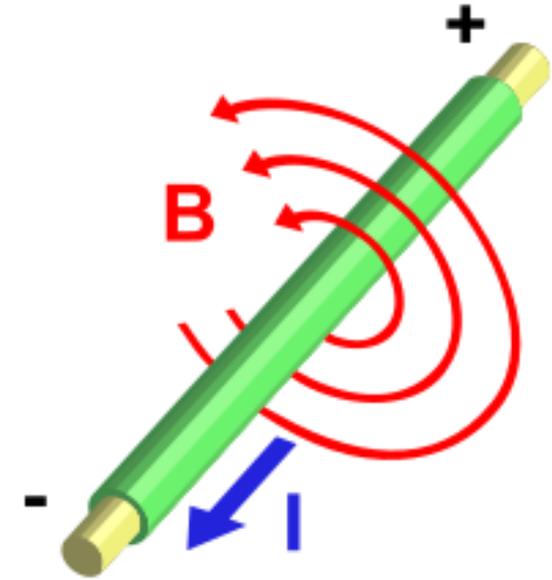
- Objectifs de cette présentation
  - Donner des bases en électricité sur les inductances
  - Comprendre l'intérêt des matériaux supraconducteurs
  - Comprendre comment fonctionne le SMES
  - Faire un état de l'art de cette technologie

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Inductance et bobines***
- Les matériaux supraconducteurs
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Application et état de l'art
- Conclusion

# Inductance et bobines

- Un **courant électrique** qui circule dans un conducteur entraîne la création d'un **champ magnétique** autour de ce conducteur;
- Réciproquement, la modification du champ magnétique dans lequel se trouve un conducteur crée une force électromagnétique (f.e.m.) dans ce dernier, qui s'oppose au courant jusqu'à l'équilibre du système;
- Le phénomène inverse se produit si le courant électrique est arrêté – le champ magnétique crée une force électromagnétique qui crée un courant dans le conducteur, qui s'oppose au champ magnétique jusqu'à l'équilibre du système;
- Il y a donc un **échange d'énergie** entre le champ magnétique et le courant électrique.



Lignes de champ magnétique autour d'un élément de longueur d'un fil parcouru par un courant électrique (Wikipédia)

# Inductance et bobines

- Cette opposition aux variations de courant (ou de champ magnétique) s'appelle l'auto-inductance;
- La relation fondamentale entre tension, temps et courant est donnée par :

$$u(t) = -L \frac{di(t)}{dt}$$

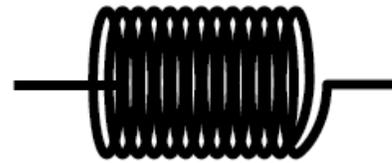
- $L$  est l'**inductance propre** du circuit (ou coefficient d'auto-induction), en Henrys (H). Elle ne dépend que du matériau et de la configuration géométrique du circuit, et est toujours strictement positive;
- Historiquement, ces notions ont été explorées au XIXème siècle par des précurseurs tels Oersted, Ampère, Faraday, Maxwell, Henry;

# Inductance et bobines

- Ces phénomènes sont très faibles dans des conducteurs normaux, mais peuvent être amplifiés en disposant le conducteur de façon à renforcer le champ magnétique.
- Une bobine est un composant électronique conçu pour exploiter le phénomène d'induction.



Inductance faible



Inductance élevée

→ plus de spires et noyau en matériau ferromagnétique

- On peut alors démontrer simplement que l'énergie emmagasinée dans la bobine traversée par un courant d'intensité  $I$  à l'instant  $t$  vaut :

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

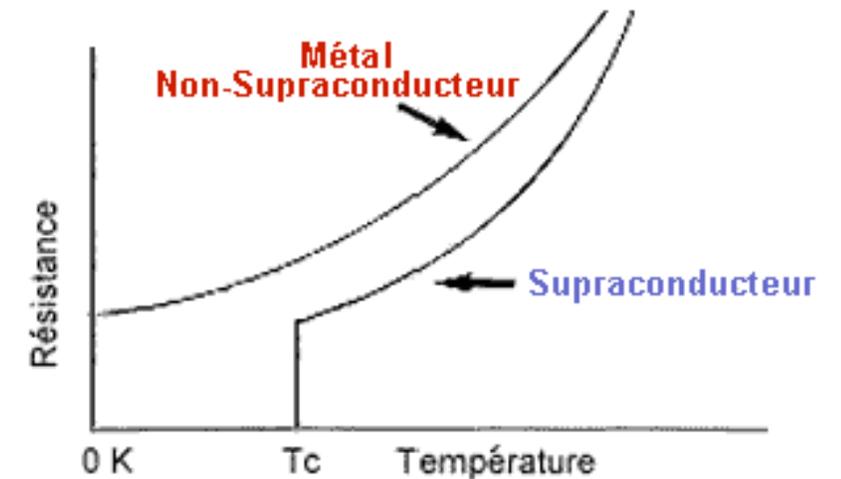
Plus la valeur de  $L$  est élevée,  
plus la capacité de stockage  
augmente

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Inductance et bobines
- ***Les matériaux supraconducteurs***
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Application et état de l'art
- Conclusion

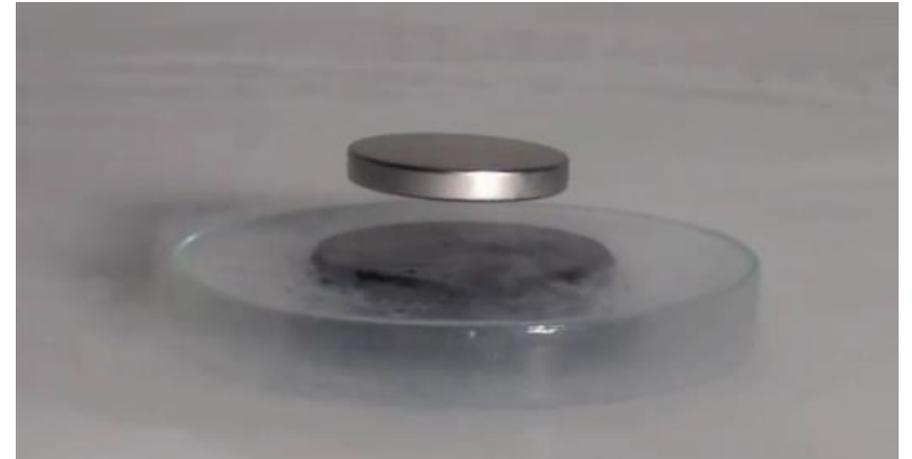
# Les matériaux supraconducteurs

- Certains matériaux peuvent présenter des caractéristiques de **supraconductivité** lorsque leur température baisse en-dessous d'un seuil critique. Il existe deux types de supraconductivité:
- La supraconductivité conventionnelle :
  - Pour des températures proches du zéro absolu.
  - L'explication est intimement liée aux caractéristiques quantiques de la matière. A très basse température, des interactions complexes se produisent entre les atomes et les électrons libres : c'est la théorie Bardeen Cooper Schrieffer (BCS) (1957).
- La supraconductivité non-conventionnelle : (découverte en 1986)
  - Pour des températures parfois au-dessus du point de liquéfaction de l'azote à 77 K.
  - La théorie BCS n'explique pas ce phénomène. C'est un des sujets les plus étudiés de la physique du solide, mais aucune théorie ne le décrit de façon satisfaisante.



# Les matériaux supraconducteurs

- Deux propriétés des matériaux supraconducteurs :
  - Une **résistance électrique nulle ou quasi-nulle**: pas de pertes d'énergie par effet Joule lors du passage d'un courant électrique dans le matériau. Elle permet ainsi de transporter de l'électricité sans pertes.
  - Un diamagnétisme parfait ou **effet Meissner**. Si un champ magnétique est appliqué à un supraconducteur, des courants se créent à la surface du matériau (sans apport d'énergie car il n'y a pas de pertes). Ces courants créent un champ magnétique qui compense exactement le champ magnétique extérieur à l'intérieur du supraconducteur. On dit alors qu'il y a **expulsion du champ magnétique**.



Lévitation quantique d'un aimant par effet Meissner  
[youtube.com/user/vulgarisation](https://youtube.com/user/vulgarisation)

# Les matériaux supraconducteurs

- Alliages couramment utilisés (synthétisés en laboratoire et très coûteux):
  - NbTi (niobium et titane), supraconducteur sous 9 Kelvin et résistant jusqu'à 15 teslas
  - Nb<sub>3</sub>Sn (niobium et étain), supraconducteur sous 18 Kelvin et résistant jusqu'à 30 teslas
- Ces matériaux ont permis de nombreuses applications :
  - La plus courante : les électroaimants. Pour l'IRM, les accélérateurs de particules (LHC du CERN), les trains à sustentation électromagnétique (Japon, Chine) et la fusion nucléaire par confinement magnétique (projet ITER en France, stade de la recherche).
  - Transport de l'énergie dans des lignes à hautes tension sans pertes (pour des grosses puissances).
  - Stockage de l'énergie avec les Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES).

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Inductance et bobines
- Les matériaux supraconducteurs
- ***Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)***
- Application et état de l'art
- Conclusion

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- Le SMES est une combinaison de la physique des bobines avec celle des matériaux supraconducteurs.
- Ce système consiste à injecter du courant dans une **bobine supraconductrice**, puis de court-circuiter cette dernière sur elle-même. **L'énergie y est donc stockée, à la fois sous une forme électrique et magnétique, et ce sans pertes énergétiques.**
- Pour maintenir son caractère supraconducteur, la bobine doit être refroidie en permanence par un système cryogénique. Ce système ne consomme que quelques kW de puissance.
- Le SMES est une source de courant, à l'opposé des supercondensateurs qui sont des sources de tension. Comme pour ces derniers, le SMES est essentiellement une **source d'énergie impulsionnelle ou transitoire** plutôt qu'un véritable moyen de stockage.

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- Composants :
  - La bobine supraconductrice
  - Le système cryogénique
  - Un système de conversion de l'énergie qui utilise un onduleur/redresseur pour transformer le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) et inversement, lorsque requis.
- Puissance cible : de quelques kW à quelques centaines de MW
- Inventé par le Français Ferrier en 1970.

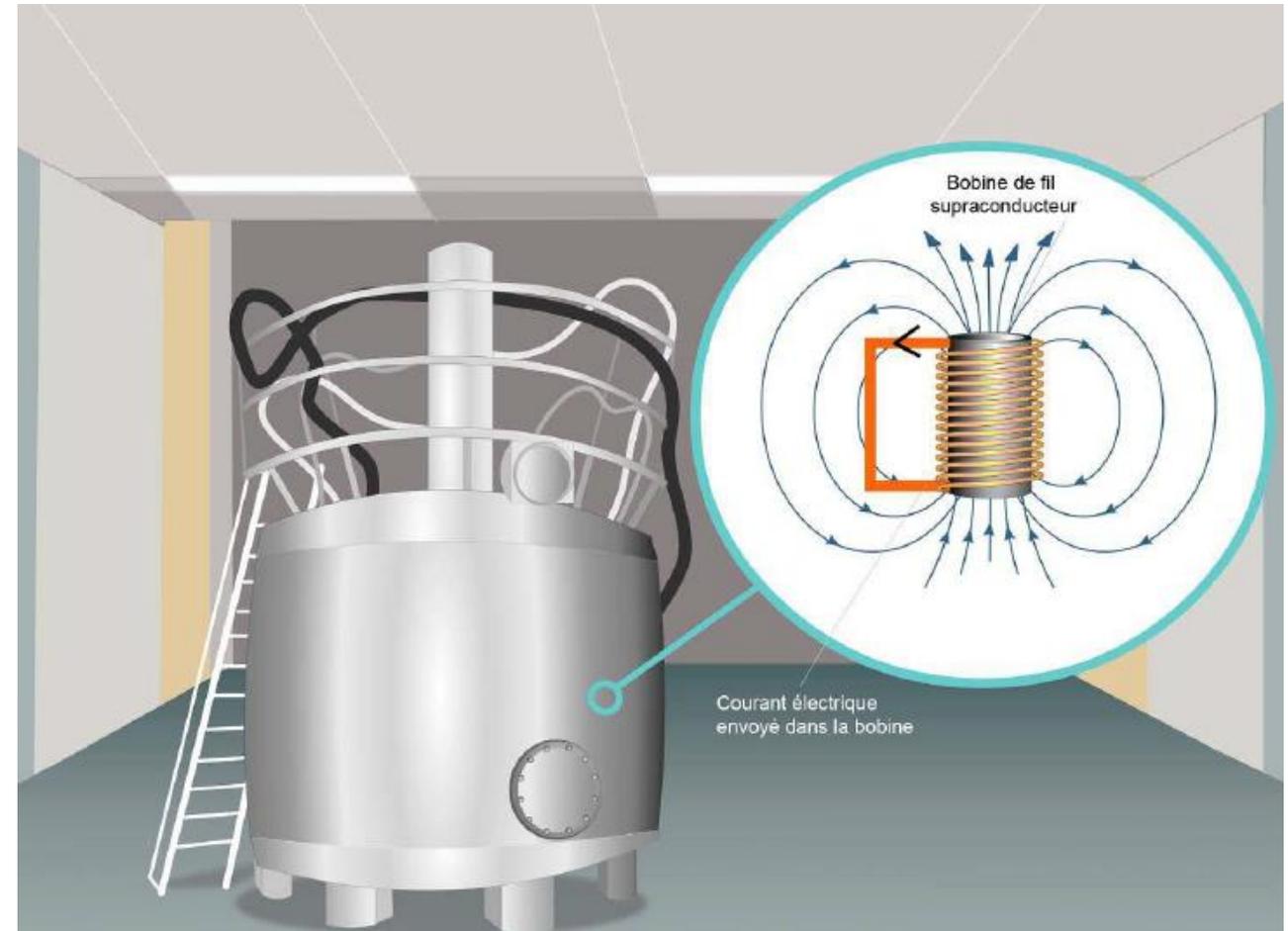


Schéma d'un SMES, ©CEA

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- **Avantages :**
  - L'énergie peut être délivrée extrêmement rapidement (20 ms);
  - Le rendement de conversion est de l'ordre de 97% (les seules pertes à court terme sont au niveau des convertisseurs électriques);
  - Le nombre de cycles peut être très élevé : durée de vie de 20-30 ans;
  - Très peu de pièces en mouvement mécanique : grande fiabilité du système (hormis le système de refroidissement).

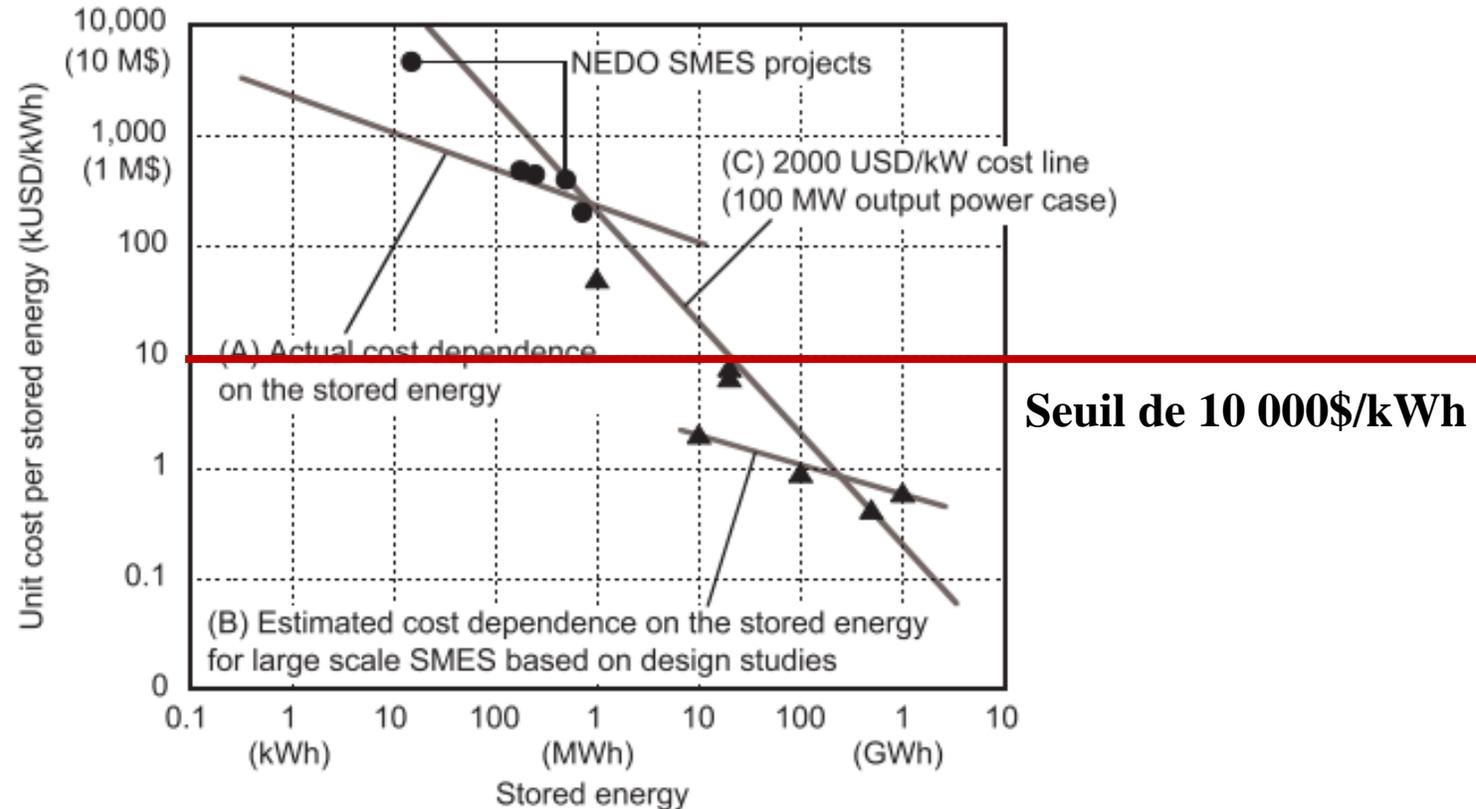
# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- **Inconvénients :**

- Dissipation d'énergie: quelques jours pour les supraconducteurs non-conventionnels;
- Densité massique d'énergie très faible : 0,003 Wh/kg;
- Densité volumique d'énergie très faible : les bobines deviennent vite très grandes;
- Très coûteux et donc peu concurrentiel : CAPEX de 100-500 €/kW au minimum, et OPEX élevé en raison du système cryogénique (même si peu consommateur d'énergie);
- Ondes électromagnétiques : besoin d'une forme de confinement;
- Limites magnétiques: les caractéristiques des supraconducteurs non-conventionnels changent sous des champs magnétiques dépassant un certain seuil;
- Contraintes mécaniques dues aux forces de Lorentz (induites par le champ magnétique).

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

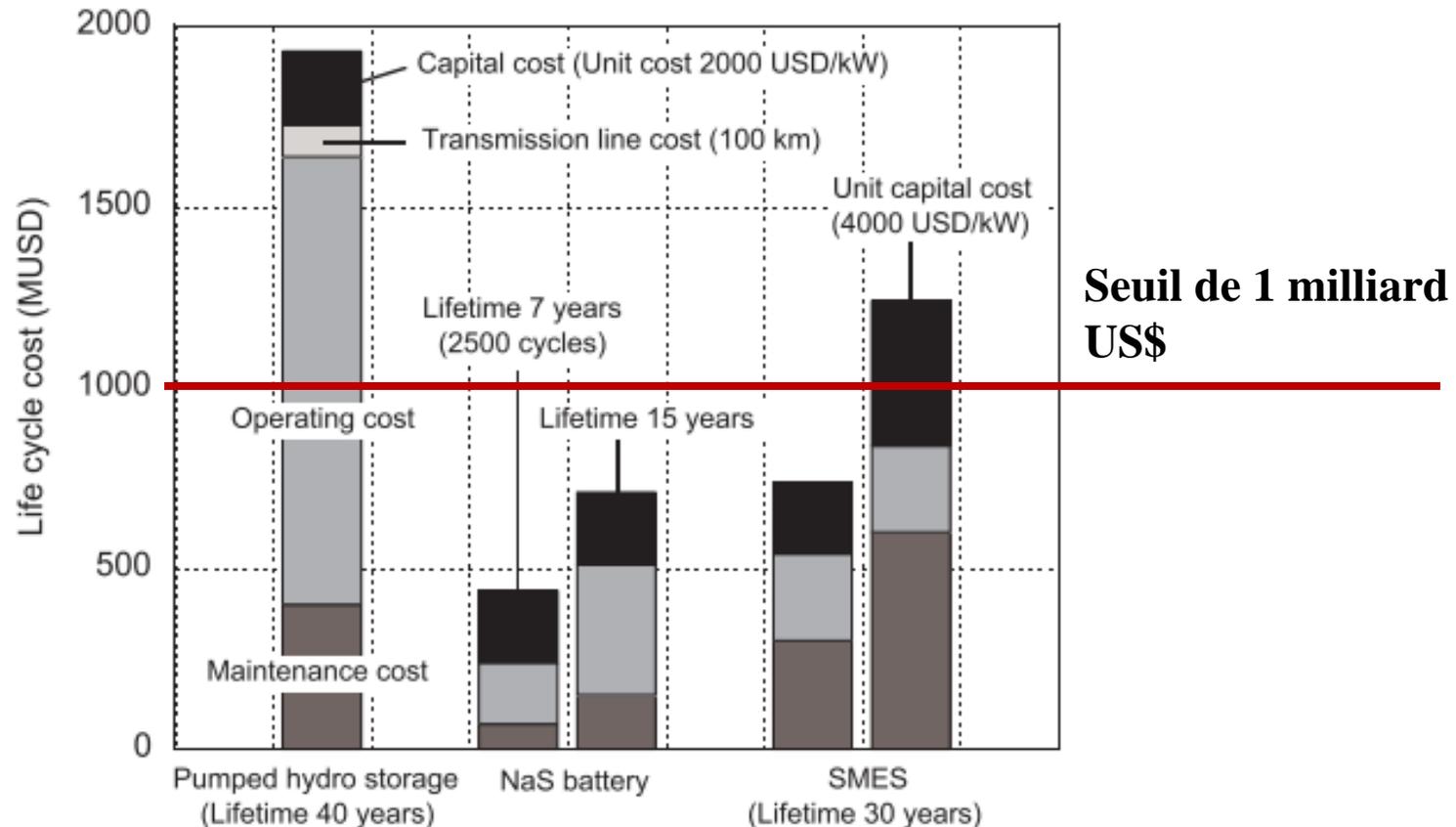
- Évolution des coûts :



Estimation des coûts du SMES en fonction de l'énergie emmagasinée  
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20, 1373-1378, 2010

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- Évolution des coûts :



Comparaison du coût sur l'ensemble du cycle de vie de diverses technologies.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Inductance et bobines
- Les matériaux supraconducteurs
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- ***Application et état de l'art***
- Conclusion

# Applications et état de l'art

- Deux configurations principales sont à l'étude : celles des **solénoïdes** et des **tores**.
- La configuration **toroïdale** génère un champ de fuite faible, voire nul, ce qui favorise son utilisation dans les zones où les champs magnétiques sont problématiques (zones habitées, par exemple).
  - Inconvénients : la densité d'énergie stockée est plus faible et son encombrement est donc souvent plus important.
- La conception **solénoïdale** est plus facile à réaliser et permet une densité d'énergie plus grande
  - Inconvénients : fort champ de fuite qui nécessite généralement un blindage magnétique, non-uniformité des contraintes dans le bobinage rendant le dimensionnement plus délicat.

# Applications et état de l'art

- **Applications**

- Régulation et stabilisation des réseaux et intégration des EnR. Un SMES est une source de courant constante et agit comme un élément de protection face aux perturbations du courant issus des sources de production;
  - En anglais, on parle de ***FACTS (Flexible AC Transmission System)***
- Protection d'éléments sensibles face à des pertes de puissances ou de tension;
  - En anglais, on parle de système ***UPS (Uninterruptible Power Supply)***
- SMES de petite taille pour des véhicules électriques (étude théorique);
- En tant que source de forte puissance, par exemple pour un canon électromagnétique.

# Applications et état de l'art

- **Systemes existants pour des applications FACTS**

- 1980 : Première démonstration réussie et concluante d'un SMES intégré à un réseau par la Bonneville Power Authority, 8,3 kWh. Opération pendant 1 an, soit plus de 1 million de cycles réalisés. Stoppé car des solutions alternatives ont été choisies. Maintenance sur les convertisseurs et du réfrigérant importante ;
- Année 1980 : lancement d'un programme de développement pour un grand SMES par la *Strategic Defense Initiative (SDI)*. Projet **SMES ETM** (*Engineering Test Model*). Objectif : concevoir et construire un SMES de 20-30 MWh pour une puissance de 400/1 000 MW. La SDI fut abandonnée en 1993, et le projet avec. La bobine aurait fait 130 m de diamètre pour 7,5 m de haut;
- En 2000 : installation de 6 unités de 2 MW par la compagnie **American Superconductor (AMSC)** à des emplacements stratégiques du réseau proche de Winston-Salem, en Caroline du Nord.

# Applications et état de l'art

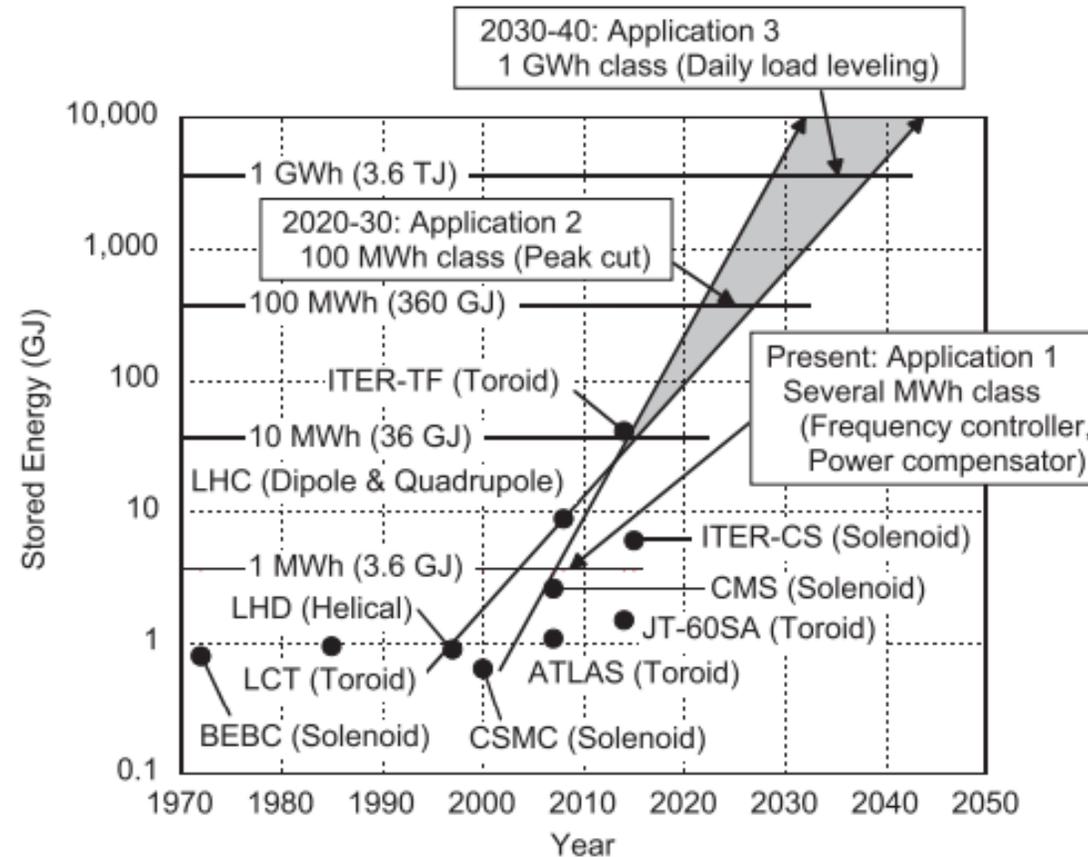
- **Systèmes existants pour des applications UPS**
  - Un des premiers en 1973 pour une usine de production d'ammoniac ;
  - Un système de 1,4 MVA / 2,4 MJ au Brookhaven National Laboratory (USA) couplé avec une source de rayonnements synchrotron ;
  - Plusieurs au Japon, dont un de 5 MW / 7 MJ pour une usine de cristaux liquides.
- Plusieurs prototype de petite taille pour de la R&D, de 10 kJ à quelques MJ (France, Allemagne, France, Chine, Corée, USA)
- Il apparait que des SMES avec une grande capacité énergétique, de 100 MWh à 1 GWh, pourraient présenter des bobines de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres. Insensé à construire si tel est le cas.

# Applications et état de l'art

- Jusqu'à 2008, les plus gros prototypes (plusieurs centaines de kJ) avaient été réalisés à Grenoble, au département Matière Condensée - Basses Températures de l'Institut Néel avec l'aide de partenaires comme la DGA et Nexans.
- Unité de 10 MW aux USA pour la stabilité du réseau électrique
- SMES de 5000 MW -> bobine de 1600 m de diamètre
- SMES de 1 GWh -> bobine de 160 km de diamètre!

# Applications et état de l'art

- Sommaire des progrès et projections jusqu'à 2050:



IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20, 1373-1378, 2010

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Inductance et bobines
- Les matériaux supraconducteurs
- Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
- Application et état de l'art
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Le SMES est, en théorie, un excellent moyen de stocker de l'énergie avec un excellent rendement. La durée de vie du système est très longue;
- Ce n'est pas un moyen de stocker de l'énergie de manière journalière: ces applications servent avant tout pour la stabilité des réseaux;
- Mais c'est un système trop cher et avec une densité énergétique trop faible (et un taux d'encombrement trop important pour de grandes capacités);
- De plus, il demande des matériaux rares et difficiles à synthétiser: l'impact environnemental est donc non négligeable.

# Bibliographie/médiagraphie

- <http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php?p=supra-materiaux>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Diamagn%C3%A9tisme#Supraconductivit%C3%A9>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_Meissner](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Meissner)
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Supraconductivit%C3%A9>
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-effet-meissner-16223/>
- <http://www.supraconductivite.fr/en/index.php?p=applications-electricite-smes>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting\\_magnetic\\_energy\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage)



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

