

17. Stockage de l'énergie

17.9 – Stockage mécanique inertiel

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

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la présentation
- Histoire des volants d'inertie
- Volants d'inertie
- Applications diverses
- Applications pour des centrales de stockage
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Histoire des volants d'inertie
- Volants d'inertie
- Applications diverses
- Applications pour des centrales de stockage
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Les volants d'inertie utilisent le principe d'une masse tournant à grande vitesse. Les applications sont nombreuses et anciennes, mais celles liées au stockage d'énergie sont plus récentes;
- Il y a de bonnes perspectives de développement pour cette technologie dans la gestion de la production des sources d'énergie intermittentes;
- Système inertiel de stockage d'énergie (SISE) (en anglais : *Flywheel Energy Storage System*, ou FESS).

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Découvrir comment fonctionne un volant d'inertie dans un objectif de stockage de l'énergie
 - Donner les caractéristiques de cette technologie
 - Présenter ses principales applications ainsi que les différentes centrales de stockage existantes
 - Donner les perspectives d'évolutions des volants d'inertie pour le développement des énergies renouvelables

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Histoire des volants d'inertie***
- Volants d'inertie
- Applications diverses
- Applications pour des centrales de stockage
- Conclusion

Histoire des volants d'inertie

- Utilisés par les humains depuis des milliers d'années;
- Objet en rotation : roue de poterie, roue à eau, moulins agricoles;
- 18^{ème} siècle : fabrication en métal et utilisations pour les machines à vapeur (bateaux et trains, accumulateurs d'énergie dans les usines), généralement pour le lissage d'un mouvement discontinu;
- 20^{ème} siècle : optimisation des volants et premières applications en stockage stationnaire de l'énergie. Premières applications dans les transports et stations de régulation;
- 1980 : guidage magnétique et matériaux composites;
- Puis, perte d'intérêt à cause du développement des réseaux électriques;
- Regain d'intérêt pour des applications de stockage horaire, et même journalière : décalage de la consommation avec la production (EnR).

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Histoire des volants d'inertie
- ***Volants d'inertie***
- Applications diverses
- Applications pour des centrales de stockage
- Conclusion

Les volants d'inertie

- Les volants d'inertie modernes permettent de stocker l'énergie sous forme cinétique dans un volant (généralement cylindrique) tournant à grande vitesse, entraîné par un moteur électrique. Une fois à sa vitesse nominale, le moteur est coupé. La récupération se fait alors par un générateur, ce qui ralentit le volant.
- L'énergie emmagasinée est proportionnelle au moment d'inertie du volant.

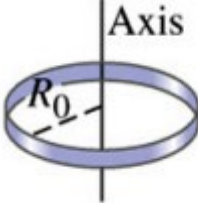
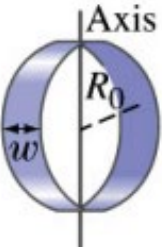
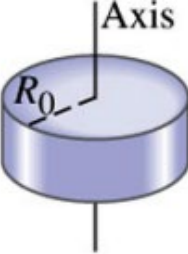
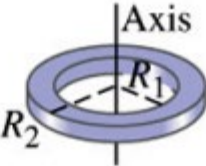
$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

- Si on double la masse d'un volant d'inertie, on double l'énergie stockée;
- Si on double la vitesse de rotation, on augmente par quatre l'énergie stockée.

Les volants d'inertie

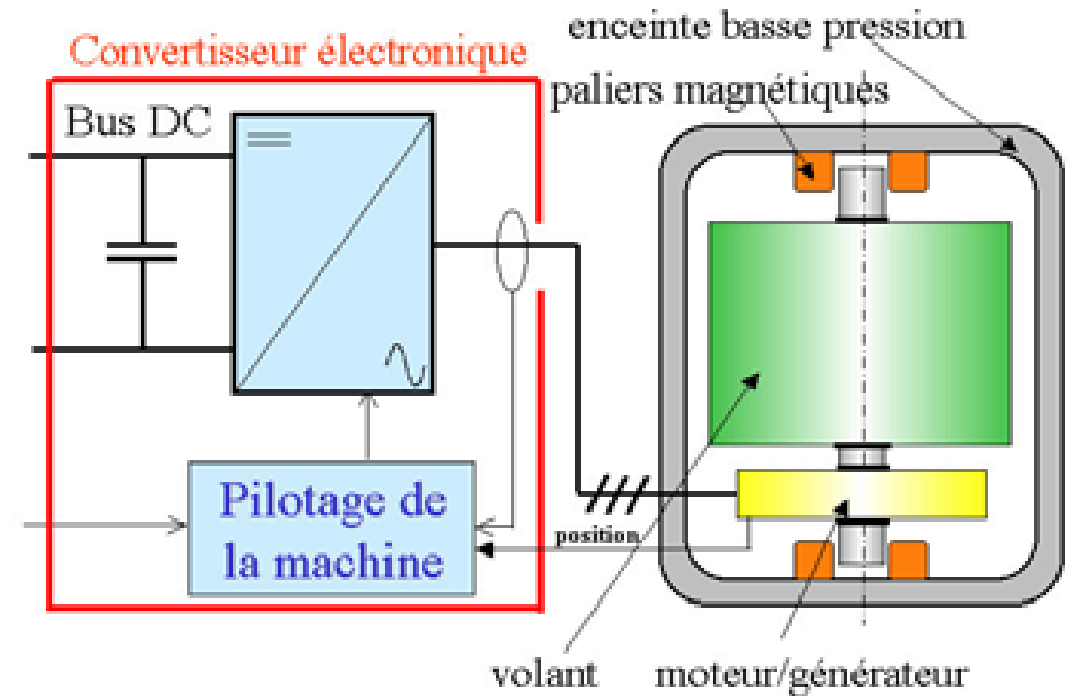
- Exemples pour des cas particuliers

Inertie

(a)	Thin hoop of radius R_0	Through center		MR_0^2
(b)	Thin hoop of radius R_0 and width w	Through central diameter		$\frac{1}{2}MR_0^2 + \frac{1}{12}Mw^2$
(c)	Solid cylinder of radius R_0	Through center		$\frac{1}{2}MR_0^2$
(d)	Hollow cylinder of inner radius R_1 and outer radius R_2	Through center		$\frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$

Les volants d'inertie

- Souvent, les volants d'inertie utilisent un système de guidage magnétique et intègrent donc des matériaux supraconducteurs;
- Cela permet d'éliminer les frottements mécaniques de contact et l'usure d'un système de guidage plus classique par roulements;
- De plus, le système est enfermé dans une enceinte basse pression pour limiter les pertes aérodynamiques.



Multon & Ben Ahmed, Le stockage stationnaire d'énergie électrique, 3EI, 2007

Les volants d'inertie

- Vitesses de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de tr/min;
- Pour les très hautes vitesses (au dessus de 10 000 tr/min), conception matériaux composites (fibre de carbone et fibre de verre) pour résister aux fortes contraintes mécaniques;
- Capacités flexibles : de quelques kW à plusieurs MW;
- De façon simpliste, le volant est dimensionné en énergie et le moteur/générateur en puissance;
- Énergie et puissance sont ainsi facilement découplables;
- La puissance d'un tel système de stockage dépend donc de la taille du moteur générateur, et non de celle du volant d'inertie.

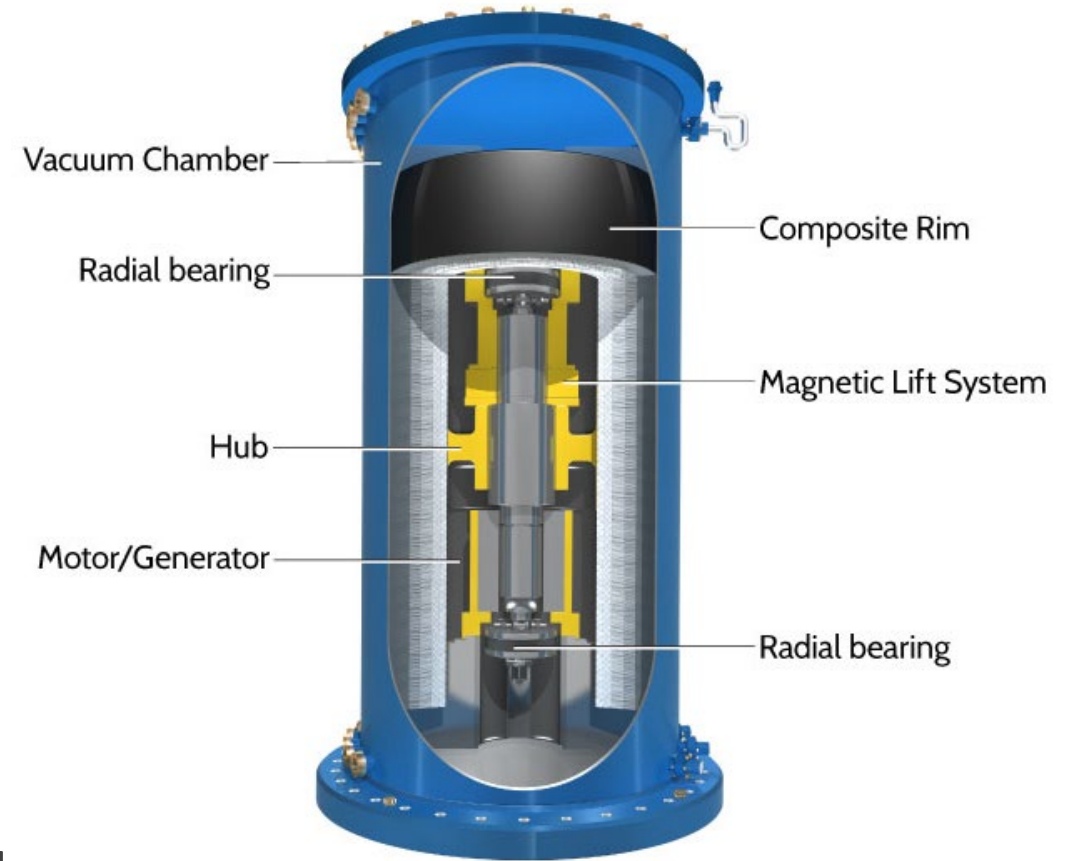


Schéma en coupe d'un système de stockage par volant d'inertie Beacon Power©

Les volants d'inertie

- Très forte réactivité (peut absorber de très grandes variations de puissance), rendement élevé (85 à 95%), grande longévité (> 20 ans) et peu de maintenance;
- Cependant, la durée d'autonomie est trop faible pour des applications de stockage à moyen ou long terme;
- Applications : stockage stationnaire pour des demandes de fortes puissances sur de très courtes durées, ou stockage sur quelques heures;
 - Régulation de réseaux et amélioration de la qualité, optimisation énergétique d'un système;
 - Transports (trains, tramways, autobus – et voitures de course), entreposage d'énergie et récupération de l'énergie de freinage;
 - Centrales de stockage à court terme.

Question

- Si on double la vitesse de rotation d'un volant d'inertie, par combien augmente t-on l'énergie stockée?
 - A. 4
 - B. 2
 - C. 8
 - D. 16
 - E. Aucune de ces réponses



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Histoire des volants d'inertie
- Volants d'inertie
- ***Applications diverses***
- Applications pour des centrales de stockage
- Conclusion

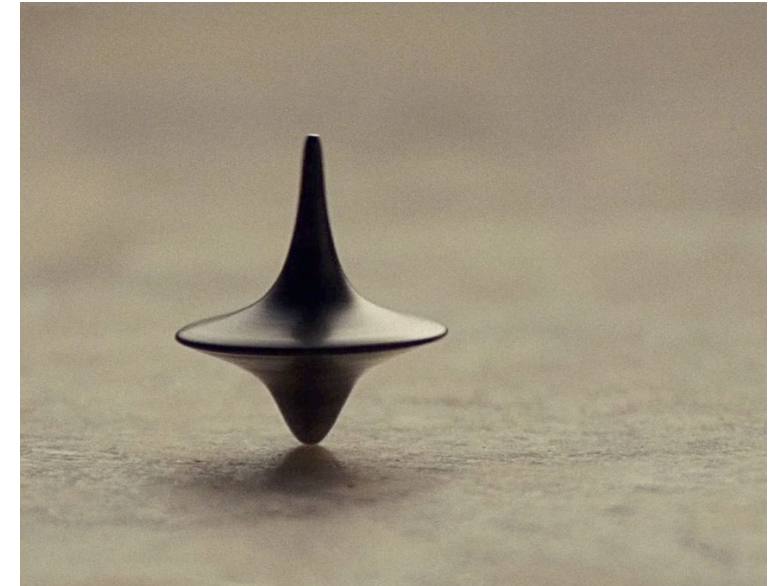
Applications diverses

- **Jouets : voitures à friction et toupies**

Un volant d'inertie connecté aux roues avec un important rapport de réduction : le volant tourne bien plus vite que les roues et emmagasine donc de l'énergie qu'il restitue petit à petit.



<https://www.robotshop.com>

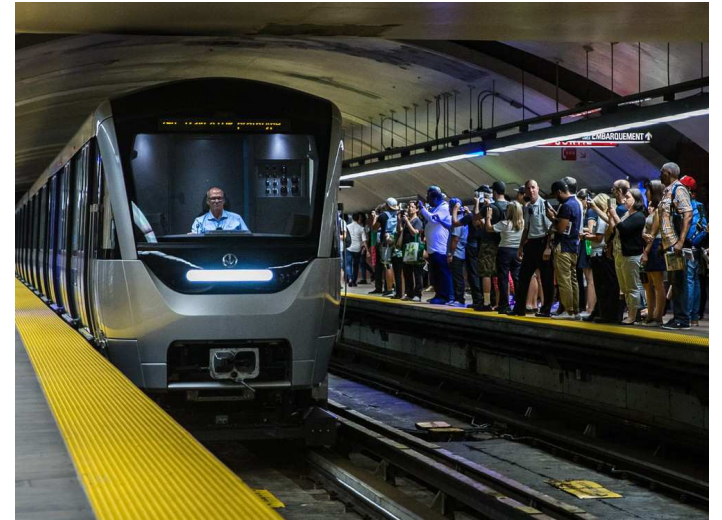


Toupie du film Inception

Applications diverses

- **Pour les transports**

- Gyrobus : volant de 1,6 m de 1,5 tonne, 3 000 tr/min, autonomie de 5-6 km (entre les stations);
- Rendre les transport publics plus efficaces : récupération d'énergie au freinage des métros pour fournir l'appel de puissance des démarrages, au niveau de la station.



Applications diverses

- **Pour les sports automobiles**
 - Une brève injection de puissance supplémentaire pour les voitures de course
 - *Kinetic Energy Recovery System* (KERS)
 - Exemple: volant de 40 cm de diamètre, 47 kg, 50 000+ RPM: capacité 200Wh, 122kW (163 hp) jusqu'à 6 secondes
 - Beaucoup plus léger qu'un système à batterie chimique de capacité équivalente



Applications diverses

- **Electromagnetic Aircraft Launch System (EMALS)**

Un système développé par la marine des États-Unis qui permet le catapultage des avions à bord d'un porte-avions à l'aide d'un moteur linéaire à induction électromagnétique. Utilisation d'un volant d'inertie pour accumuler de l'énergie et permettre une puissance d'alimentation du système très élevée.



Applications diverses

- **Parcs d'attractions**

Récupération de l'énergie au freinage des trains des montagnes russes et restitution lors des tronçons d'accélération.



The Incredible Hulk Coaster,
Universal Orlando Resort

Question

- Pour un système de stockage par volant d'inertie, le volant est dimensionné en _____ et le moteur/générateur en _____.
 - A. masse ; vitesse
 - B. énergie ; puissance
 - C. puissance ; énergie
 - D. énergie ; vitesse
 - E. Aucune de ces réponses



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Histoire des volants d'inertie
- Volants d'inertie
- Applications diverses
- ***Applications pour des centrales de stockage***
- Conclusion

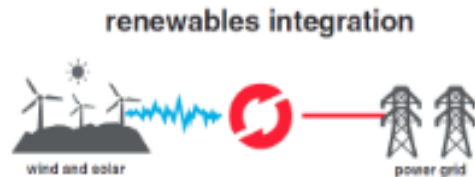
Applications pour des centrales de stockage

- Pourquoi des centrales de stockage pour la gestion des réseaux?

Renewable Integration

Market Need

- Intermittent output from wind and solar power generation makes it difficult for grid operators to maintain the required voltage on long distribution lines



Grid Balancing

Market Need

- Requirement of system operators to balance supply and demand in real-time



Isolated Grids

Market Need

- Isolated grid such as remote communities, mining sites and islands are often powered by diesel generators which are expensive, inefficient, and increasingly inadequate with the introduction of variable renewable generation



Drawn from a presentation of Temporal Power, 2014, Toronto. Temporal Power©

Applications pour des centrales de stockage

- **Beacon Power, USA**

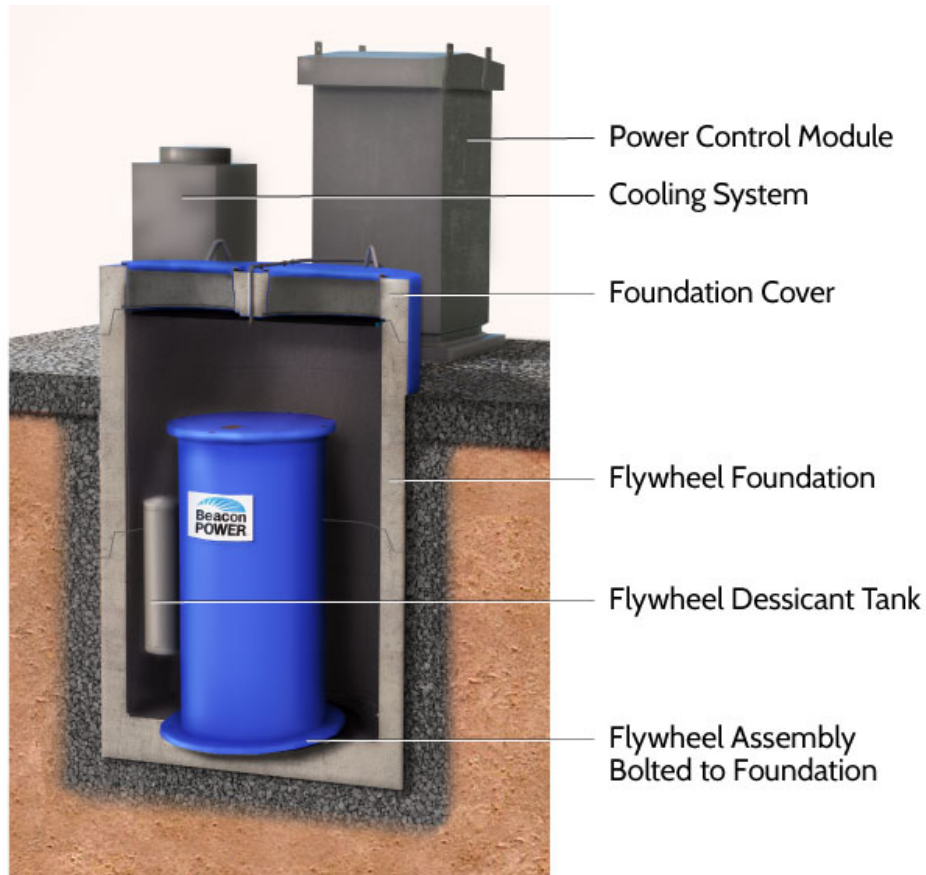
Compagnie américaine qui a développé un système de stockage par volants d'inerties. Fondée en 1997, rachetée en 2012, puis reprise par RGA Labs, Inc en 2018.

Deux centrales pour de la régulation de fréquence du réseau :

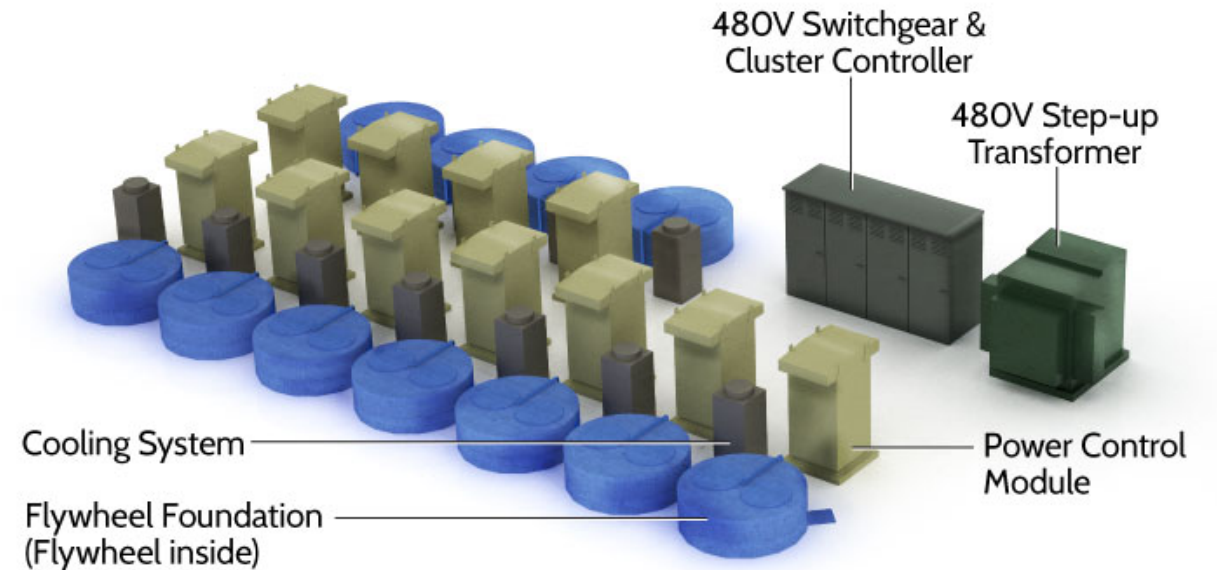
- Stephentown, New York, 2011 : 5 MWh (20 MW en 15 min), 200 unités.
- Hazle Township, Pennsylvania, 2014 : identique à la première.

Applications pour des centrales de stockage

- Beacon Power, USA



Representative Flywheel Energy Storage Module



Beacon Power©

Applications pour des centrales de stockage

- Beacon Power, USA



Hazle Township, Pennsylvania powerplant. Beacon Power©

Applications pour des centrales de stockage

- **Temporal Power, ON, Canada**

Développement d'un modèle de système de stockage inertiel. Volants en acier de 4 000 kg tournant à 12 000 tr/min. Pertes inférieures à 1 kW. Durée de vie de 20 ans, recyclable.

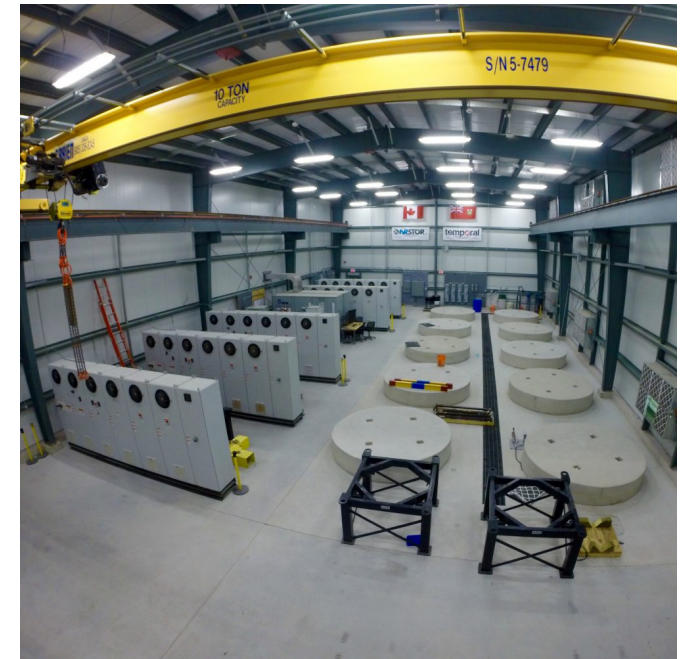
Centrales qui utilisent cette technologie :

- Minto, Ontario, 2014 : 500 kWh (2 MW en 15 min) le premier projet de volants d'inertie connectés au réseau au Canada. À la suite d'un appel d'offres lancé par la Société indépendante d'exploitation du réseau d'électricité (SIERE) de l'Ontario (IESO en Anglais). Opéré par NRStor Inc.: régulation de fréquence.
- Guelph, Ontario, 2016-17 : 500 kWh (5 MW en 6 min). A la suite de l'appel d'offres de la phase I du plan d'approvisionnement en stockage d'énergie de la SIERE. Opéré par Convergent Energy + Power.: régulation de fréquence.
- Clear Creek, Norfolk County, Ontario, 2017 : 500 kWh (5 MW en 6 min). 10 unités. Projet test mené par Hydro One Network Inc., à partir de 2019 opéré par NRStor Inc.: qualité de la puissance (équilibre puissance réelle et réactive) pour une ferme éolienne de 20 MW, raccordement réseau.

Applications pour des centrales de stockage

- **Temporal Power, ON, Canada**

- Ile d'Aruba, Caraïbes, 2017 : 5 MW (5% de la capacité de l'île), opéré par WEB Aruba (désalinisation de l'eau et production d'énergie): régulation du réseau et intégration des EnR (stockage horaire et lissage).



Site de Bc New Energy. <http://www.bne-fess.com/en/col.jsp?id=106>

Minto powerplant.
<http://nrstor.com/>

Applications pour des centrales de stockage

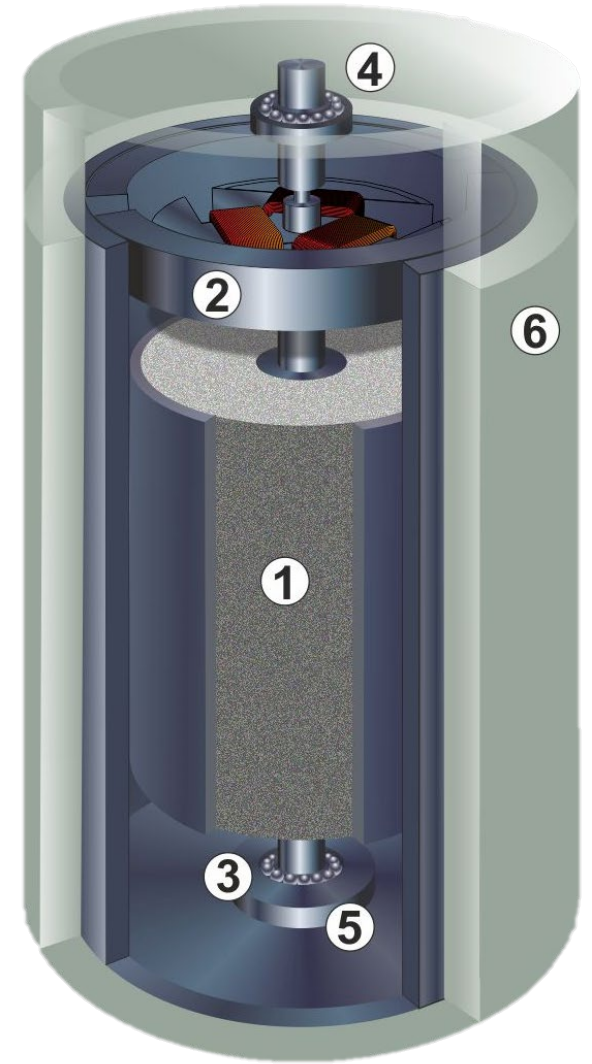
- **Energiestro, France**

Le problème du béton : il ne résiste pas à la traction.

La solution : comprimer le béton précontraint avec un enroulement en fibre de verre sous tension, afin que le béton reste en compression jusqu'à la vitesse maximale.

Des volants de 10 kWh (10 kW) à 1 MWh (200 kW) et de 3 à 300 tonnes. 20% de pertes en 24h.

- 1) Volant en béton et son manchon
- 2) Moteur/ alternateur
- 3) & 4) Roulements à billes, moins cher et plus simples
- 5) Butée magnétique passive supporte le poids du volant
- 6) Enceinte sous vide



Un VOSS. Energiestro©

Applications pour des centrales de stockage

- Energiestro, France



2 kW de stockage
domestique,
6-7h
d'autonomie

André Genneaux. 2015. Une solution béton pour stocker l'énergie solaire à faible coût. TEDx Paris

<https://www.youtube.com/watch?v=N2u6EDwumdQ> (7:53min)

Applications pour des centrales de stockage

- **D'autres acteurs ...**

- **Piller Power Systems, Allemagne**

- In 2016, Piller acquired Active Power Inc.
- <http://www.piller.com/en-GB/205/energy-storage-flywheels-and-battery-systems>
- Powerbridge : 4.6 kWh, 14 sec
- <http://www.activepower.com/en-GB/4895/flywheel-technology>

- **VYCON, Calnetix Technologies**

- <https://www.calnetix.com/system-integration/flywheel-energy-storage-system>
- <https://vyconenergy.com/>

- **Powerthru, MI, USA**

- Military applications
- [http://www.power-thru.com/carbon fiber flywheel technology.html](http://www.power-thru.com/carbon_fiber_flywheel_technology.html)

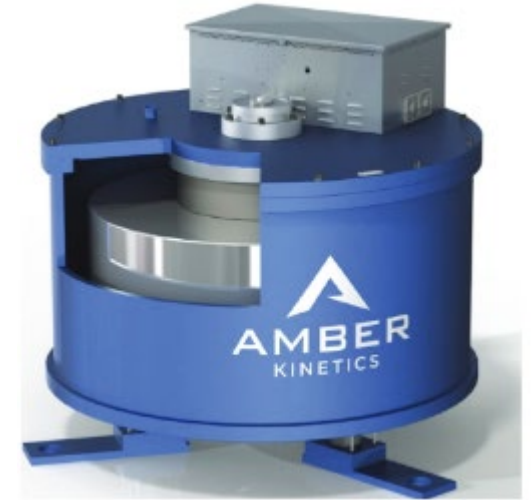
- **Stornetic, Allemagne**

- <https://stornetic.com/>

Applications pour des centrales de stockage

- **Amber Kinetics Inc., CA, USA**

- De La Salle University, Laguna, Philippines, prévu pour 2020 : 4 MWh (1 MW), 125 unités -> réduire les coûts en réduisant les pics de charge.
- Yungao Renewables, Lhasa, Tibet, China, 2018 : 64 kWh (16 kW), 2 unités -> couplage avec une ferme solaire de 60 MW, lissage de la puissance, qualité de l'énergie.
- West Boylston Municipal Light and Power, West Boylston, MA, USA, 2018 : 512 kWh (128 kW), 4 unités -> raccordement d'une ferme solaire au réseau, réduction des pics de charges.
- Hawaiian Electric, Honolulu, Hawaii, 2018 : 32 kWh (8 kW), 1 unité -> lissage de la puissance d'une ferme PV et transfert de charge.
- Contrat avec la Pacific Gas and Electric (PG&E) : 80 MWh (20 MW), Fresno, CA, USA



L'unité M32 : 32 kWh (8 kW), 30 ans de vie, temps min de charge / décharge de 4 heures, volant en acier de 2 tonnes, efficacité 86%.
Photo Amber Kinetics©

Applications pour des centrales de stockage

- **Energiestro, France**

Lauréat du « Concours Mondial d'Innovation 2030 », en 2014 et vainqueur du concours Pulse de EDF en 2015;

Stockage pendant 24h (time shift) dans des volants de béton : des VOSS (VOLants de Stockage Solaire);

Un LCOS annoncé de 2 c/kWh : 10 fois moins cher que des volants en acier ou fibre de carbone. Avec une durée de vie de 30 ans, le LCOS est meilleur que celui d'une batterie;

Pour le stockage solaire seulement, pas compétitif avec l'éolien car trop peu de cycles. Mais utile pour le lissage de l'éolien et l'intégration réseau;

Mai 2019 : partenariat avec Voltania, l'un des plus importants opérateurs de parc solaire en France.

Applications pour des centrales de stockage

- **Bc New Energy (BNE), Tianjin, Chine**

Fondé en 2017. En 2018, BNE s'est associé au centre de recherche et de développement d'applications de technologie de stockage d'énergie à volant d'inertie et de technologie de pointe de la North China Electric Power University.

A acquis la technologie de Temporal Power en 2018. Se destine au marché chinois.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Histoire des volants d'inertie
- Volants d'inertie
- Applications diverses
- Applications pour des centrales de stockage
- ***Conclusion***

Conclusion

- Une excellente technologie avec une très grande durée de vie, très bien adaptée pour la régulation des réseaux électriques et l'intégration des EnR;
- Reste trop cher face aux batteries pour du stockage horaire ou journalier : mais la technologie y est, les volants actuels ont des pertes très faibles;
- La technologie VOSS est compétitive face aux batteries et même à l'électricité produite par une centrale au charbon.

Bibliographie/médiagraphie

- Dossier du CEA
- Dossier de l'ADEME
- Livre CNRS
- Dossier sur le stockage
- Multon & Ben Ahmed, Le stockage stationnaire d'énergie électrique, 3EI, 2007
- https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage#Transportation
- <https://beaconpower.com/>
- <http://www.bne-fess.com/en/>
- <http://temporalpower.ca/index.htm>
- <https://www.amberkinetics.com/>
- <http://www.ieso.ca/en/Powering-Tomorrow/Technology/High-Performance-Flywheel-Energy-Storage-Systems-Temporal-Power>
- <http://www.ieso.ca/Sector-Participants/Energy-Procurement-Programs-and-Contracts/Energy-Storage>
- <http://nrstor.com/2019/05/30/nrstor-completes-acquisition-of-5mw-energy-storage-facility-in-clear-creek-ontario/>
- <https://www.edfenr.com/actualites/beton-stocker-de-lelectricite/>
- <http://www.energiestro.fr>
- <https://www.revolution-energetique.com/volants-inertie-stockage-energie-renouvelable/>

Bibliographie/médiagraphie

- <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Volant_d%27inertie
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/volant-dinertie>
- <https://www.youtube.com/watch?v=cfRL96ZkBkg>
- https://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie
- <https://www.planete-energies.com/fr/medias/d%C3%A9cryptages/volant-inertie>
- <https://www.greenit.fr/2008/11/28/volant-d-inertie-190-kw-sans-plomb/>
- <http://sitelyceejdarq.org/autodoc/cours/001%201%20STI2D/Technologie%20transversale/StockageEnergie/index.html?Activite3.html>



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

