

17. Stockage de l'énergie

17.2 – *Stockage mécanique gravitaire*

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

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Question

- Qu'est-ce qu'une STEP? Un mouvement de dance?
- STEP est un acronyme (un autre) qui désigne une **station de transfert d'énergie par pompage**

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- Les STEP non conventionnelles
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- Autres technologies
- Conclusion

*STEP = station de transfert
d'énergie par pompage

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- Les STEP non conventionnelles
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- Autres technologies
- Conclusion

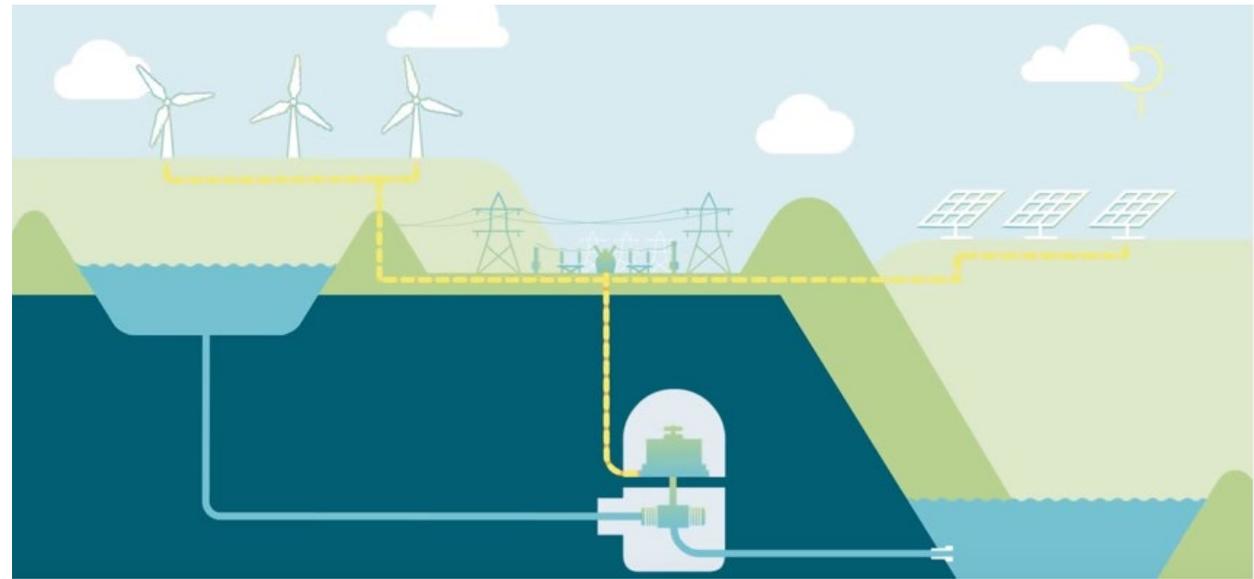
*STEP = station de transfert
d'énergie par pompage

Introduction et objectifs

- L'utilisation de la gravité comme moyen de transformer son environnement remonte à des milliers d'années;
- Le stockage mécanique gravitaire consiste à exploiter l'énergie potentielle de position d'un objet ou d'un fluide;
- Il faut donc une différence de potentiel ou de hauteur entre les deux états de position possibles du matériau considéré;
- On parle alors de stockage lorsque l'énergie qui a été dépensée pour déplacer le matériau et lui faire gagner en énergie potentielle de position est en partie récupérée lors de la décharge (chute).

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Découvrir et comprendre les différents concepts de STEP, ainsi que les enjeux associés;
 - Comprendre la différence entre une STEP et un complexe hydroélectrique;
 - Donner un aperçu du potentiel de cette méthode de stockage;
 - Donner des exemples de STEP.



https://www.youtube.com/watch?v=_PH0IJ-_qOI

Question

- Quels matériaux peuvent être utilisés pour du stockage mécanique gravitaire?
 - A. L'eau
 - B. L'air
 - C. Du béton
 - D. Du gravier
 - E. Aucune de ces réponses



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles***
- Les STEP non conventionnelles
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- Autres technologies
- Conclusion

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

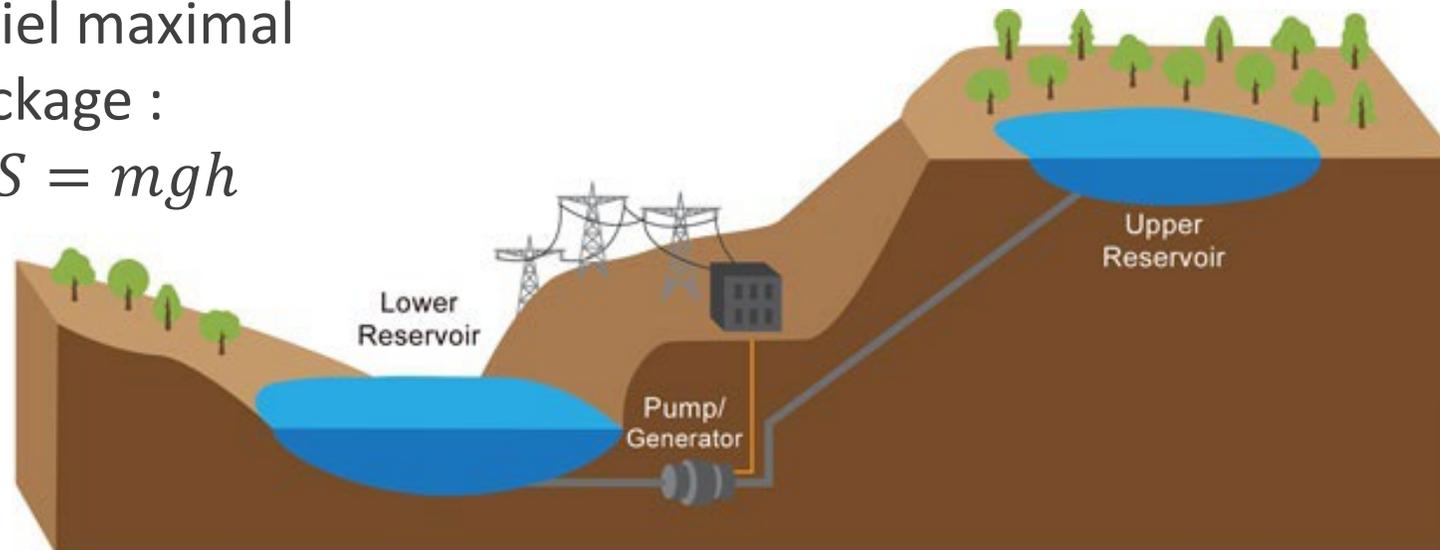
- L'eau est le matériau de stockage le plus utilisé aujourd'hui : facile à transporter, à stocker et facile de convertir son énergie potentielle avec un turbinage.
- Le principe de pompage-turbinage est appliqué au sein des STEP = **station de transfert d'énergie par pompage** = *Pumped hydro storage (PHS)*

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Le pompage peut alors être « mixte » : les eaux turbinées proviennent des apports gravitaires naturels (pluie et écoulements de fleuves ou rivières) et des apports de la station de pompage ; ou « pur » : les apports naturels au réservoir supérieur sont négligeables.

Potentiel maximal
de stockage :

$$ES = mgh$$



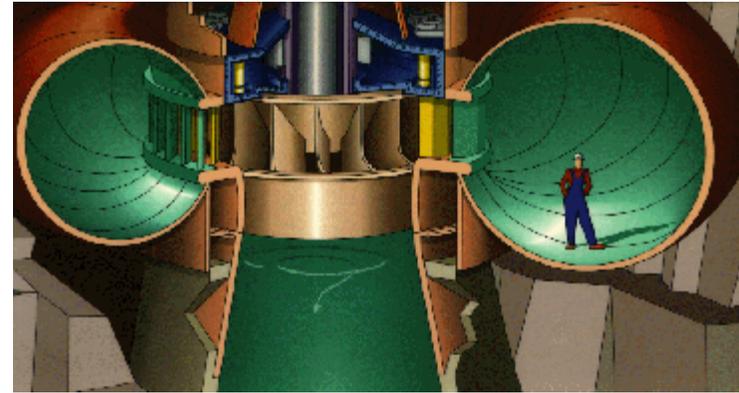
Adaptated from a
picture of
Dominion Energy©

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Principe de fonctionnement
 - En période de faible demande, lorsque les prix de l'électricité sont bas, l'eau d'un bassin inférieur est pompée vers un bassin supérieur. Puis, la station sert à ajuster l'offre à la demande en turbinant l'eau pour produire de l'électricité;
 - Souvent, le système utilise un groupe hydroélectrique réversible dit « synchrone ». Le groupe est en mode pompe-moteur ou turbine-alternateur (turbine type Francis);
 - Mais deux groupes distincts peuvent aussi être utilisés afin d'optimiser le rendement de chaque phase du cycle.

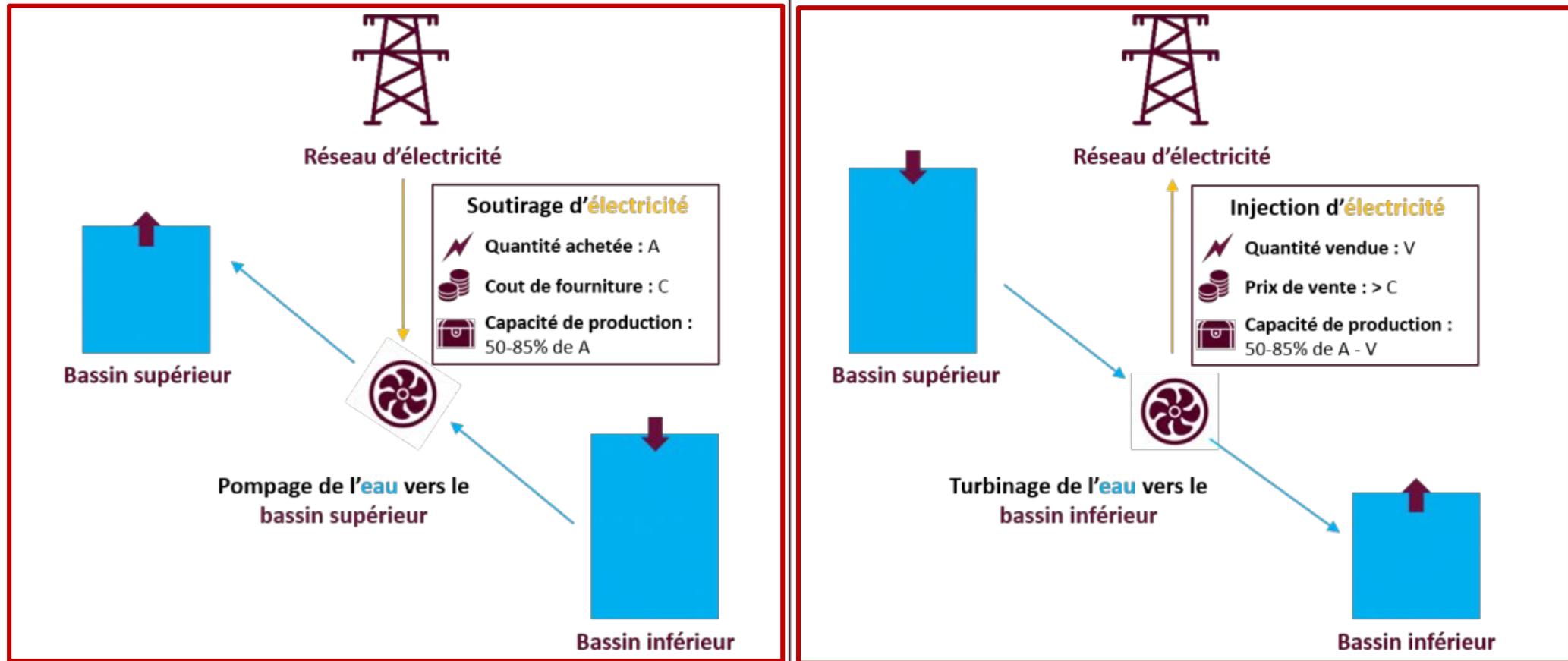
Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Principe de fonctionnement
 - Une turbine Francis peut être utilisée pour le pompage et le turbinage
 - Une turbine Pelton n'est utilisable que pour le turbinage



Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Deux phases : stockage et production



Représentation schématique du fonctionnement d'une STEP

<http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour-accompagner-les-prochaines-etapes-de-la>

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Histoire de l'évolution des STEP
 - Le stockage hydraulique par pompage apparait à la fin des 1890 en Italie et en Suisse dans les Alpes;
 - Les premières turbines réversibles arrivent en 1930;
 - Le développement à grande échelle à lieu dans les années 1970 dans le contexte du choc pétrolier et alors que le coût de l'énergie et le différentiel de pointe au cours de la journée s'accroît.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP dans le monde : zone de présence
 - Les STEP représentent **97% des capacités de stockage d'électricité connecté** dans le monde*;
 - Il y a environ 400 STEP dans le monde, dont près de la moitié en Europe, le reste en Chine, au Japon et aux USA;
 - Il y en a une soixantaine de plus de 1 000 MW (soit l'équivalent d'un réacteur nucléaire ou d'un barrage important. Ex: Manic 5 = 1 500 MW);
 - Les STEP représentent aujourd'hui les outils les plus matures et les plus efficaces (énergétiquement) pour une gestion prévisible, et à une échelle régionale, voire nationale et continentale, de l'énergie stockée lors des périodes de surplus de production (95% en pompage x 95% en turbinage \approx 90% de rendement).

*Irena, Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, 2017

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP dans le monde (2017)
 - Chine : 28,5 GW (19% de la capacité mondiale), cible de 90 GW pour 2025
 - Japon : 27,6 GW
 - USA : 22,8 GW dont la plus puissante au monde, Bath County, VA (3 003 MW en 10h)
 - Italie : 7,5 GW
 - France : environ 5 GW



Bath County PHS plant, commercial operation since 1985. Picture source : www.enr.com

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP en Europe

- Il existe des barrières importantes au développement des STEP en Europe.

- Il y a un bon potentiel pour sécuriser les réseaux, réaliser des économies à long terme et permettre le déploiement des énergies renouvelables intermittentes mais il y aussi une **incohérence entre les directives politiques et la réglementation** en place et surtout un **marché peu favorable**. Entre autres :
 - Peu de variation dans le prix de l'électricité, déjà peu élevé en Europe : les taux de rentabilité des stations sont **faibles** devant le gaz et l'énergie solaire -> pas de potentiel à court terme pour les investisseurs.
 - Une **tarification uniformisée** et non locale -> sous-rémunération des STEP par rapport à leur rôle dans la prévention des phénomènes de congestion sur les réseaux de transport.
 - Contraintes réglementaires en matière de **protection de l'environnement**.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- **Les STEP en France**

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) fixe pour objectif une augmentation des capacités de production des STEP de 1 à 2 GW d'ici 2030, soit une hausse de 24 à 48% par rapport aux 4,2 GW de puissance actuellement en opération (en 2018).

Mais depuis 2010, l'Europe impose l'ouverture à la concurrence des concessions hydroélectriques. Donc, pour toute nouvelle ouverture de centrales hydroélectriques (dont les STEP font partie), ou pour toute augmentation de puissance supérieure à 20%, EDF serait mis en concurrence avec d'autres entreprises à la suite d'un appel à projets obligatoirement passé par l'État.

- Marché peu favorable et incertitude pour EDF de garder le monopole sur les projets futurs. EDF investit donc dans d'autres formes de stockages et se contente d'optimiser ces centrales, sans dépasser la limite des 20%.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- **Les STEP en France**

Projet « La Coche Pelton » : rajouter une turbine Pelton de 240MW parmi les 4 déjà présentes sur la centrale. L'augmentation de production sera de tout juste 20%. Ce sera le groupe Pelton le plus puissant de France. Inaugurée en octobre 2019.

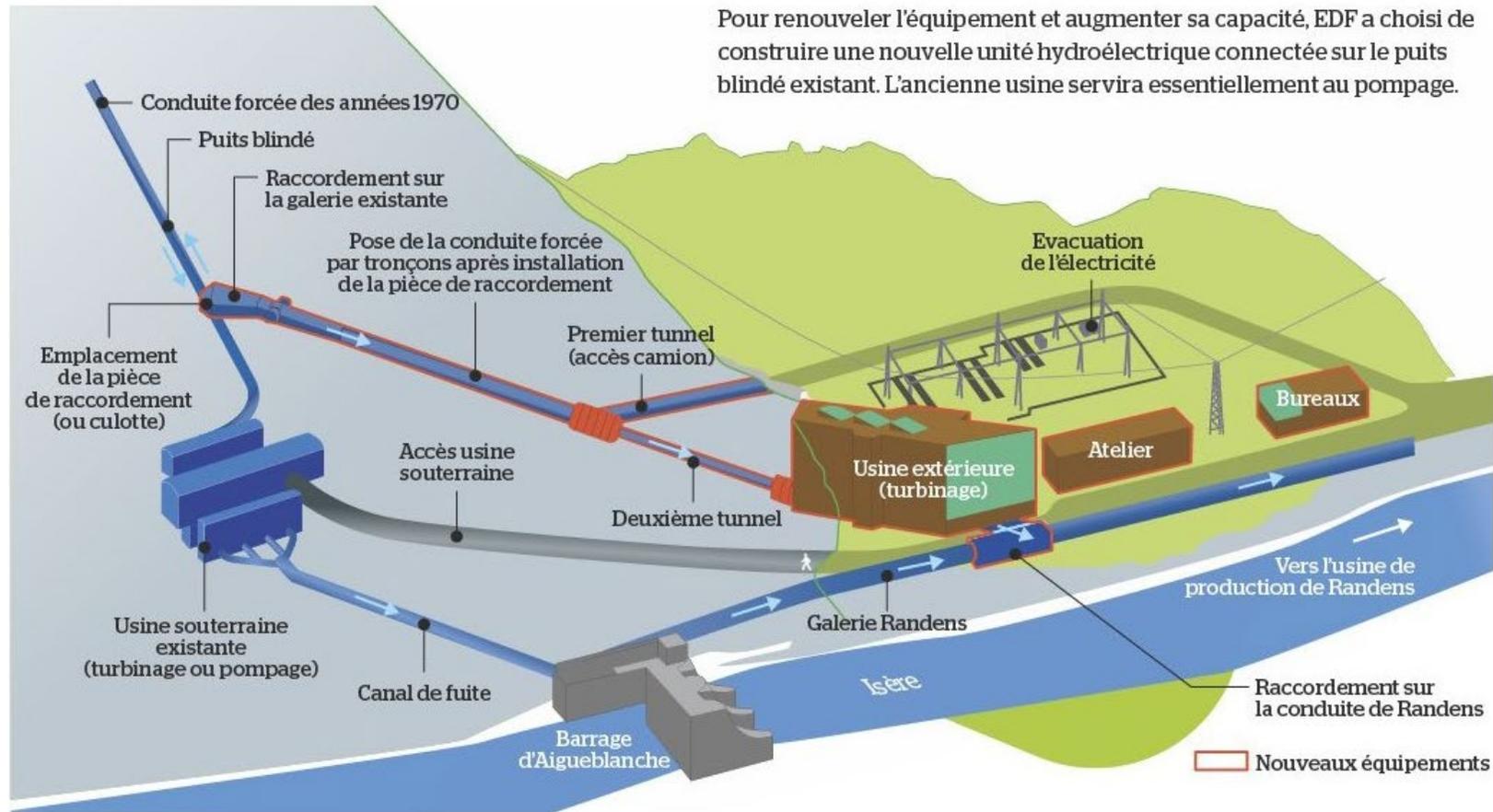


EDF Hydro Alpes Twitter, Bassin de retenue de La Coche, 14/10/2019

C'est le seul projet de rénovation d'une STEP, les autres étant déjà optimisées. Pourtant, il y aurait 5 GW de potentiel pour des STEP supplémentaires en France...

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP en France : chantier de la Coche Pelton



EDF, tiré d'un article sur www.lemoniteur.fr

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP aux USA

- Les États-Unis disposent de plus de 30 installations de stockage d'énergie par pompage, dont la capacité combinée s'élève à 22 GW;
- Les installations américaines produisent annuellement environ 23 000 GWh et en consomment 29 000 pour faire fonctionner leurs pompes;
- Malgré cette perte nette d'énergie, la fiabilité du réseau assurée par les installations et la capacité de produire de l'électricité en période de pointe sont des avantages majeurs, qui gagneront en importance à mesure que le Canada et les États-Unis intégreront davantage d'énergies renouvelables à leurs réseaux.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Les STEP au Canada

- L'unique installation de stockage d'énergie par pompage au pays est la centrale de pompage Sir Adam Beck de l'Ontario Power Generation;
- D'une capacité de 174 MW, cette centrale pompe de l'eau de la rivière Niagara vers un réservoir de 300 hectares en vue de stocker de l'énergie;
- Il s'agit d'une capacité de stockage supérieure à ce qui existe actuellement au Canada au chapitre des technologies de stockage émergentes comme les batteries.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- L'échec du projet de micro-centrale de Berrien, Bretagne, France
 - Berrien est une commune isolée, entièrement incluse dans le Parc Naturel Régional d'Armorique mais à la vocation industrielle ancienne;
 - La carrière de kaolinites (argile provenant de l'altération mécanique ou chimique de granites, gneiss ou schistes, qui est utilisée en céramique) de Berrien n'est plus en exploitation depuis 2000 et est fermée depuis plusieurs années;
 - Projet d'une micro STEP de 1,5 MW utilisant les cavités dénudées et stériles des anciennes carrières fut proposé.



Les anciennes carrières à kaolins de Berrien. © Tri'nerzh pour la Région Bretagne.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- L'échec du projet de micro-centrale de Berrien, Bretagne, France
 - Démarré en 2014, le projet devait durer 7 ans.
 - Le projet fut retardé par l'opposition des militaires;
 - Le second obstacle fut que l'on considéra une micro-STEP, quant au champ de ses autorisations et exigences, similaire aux grands barrages (un surcoût des études impossible à assumer par une toute petite unité).
 - Ce projet avait, selon l'ADEME, l'ambition de *“développer une filière française proposant une solution EnR+Micro-STEP, participant au marché de capacité et offrant des services : soutien de tension, fourniture de réserve...”*. Il devait ainsi être *“reproductible sur d'autres friches industrielles, en particulier des carrières en reconversion, en France et à l'export”*

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- La STEP hydro-éolienne de l'île d'El Hierro aux Canaries
 - 30 ans de développement avant sa mise en service en 2015;
 - Un modèle de système énergétique insulaire pionnier appelé à se développer;
 - Couplage d'une STEP (avec deux réservoirs) avec un parc éolien et une usine de désalinisation de l'eau de mer;
 - Couvre environ 45% des besoins de l'île en électricité, le reste avec une centrale au fioul lourd;
 - Découplage entre les groupes de pompage et de turbinage ; 4 turbine Pelton de 3 MW chacune : la STEP fonctionne en eau douce;
 - 5 éoliennes pour une puissance totale d'environ 11 MW.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

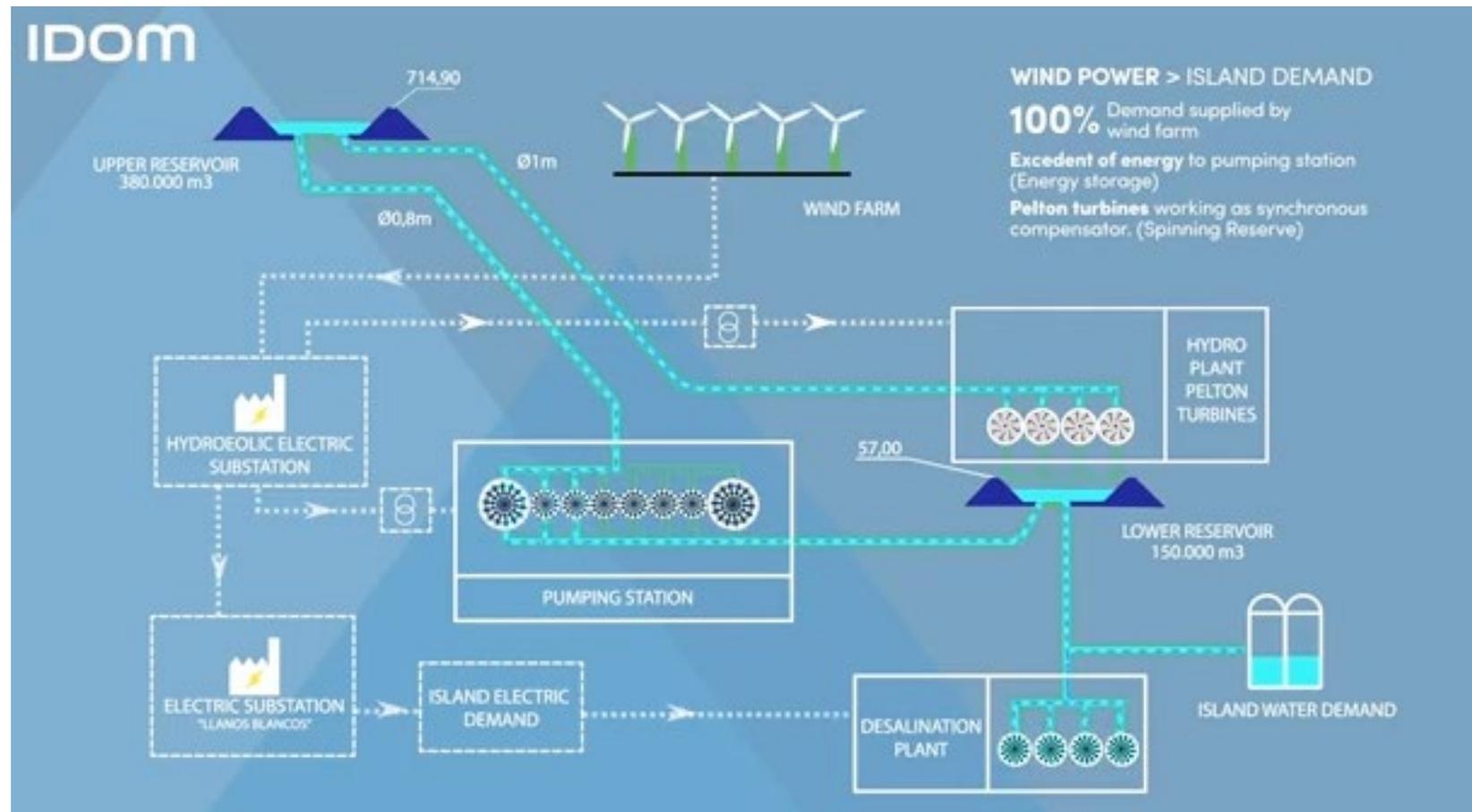
- La STEP hydro-éolienne de l'île d'El Hierro aux Canaries



Le bassin supérieur de la centrale hydro-éolienne d'El Hierro en décembre 2014. En contrebas dans le lointain, les 5 éoliennes du parc. El Hierro, Canaries. © A. Gioda, IRD.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- La STEP hydro-éolienne de l'île d'El Hierro aux Canaries



<https://www.youtube.com/watch?v=4XgHMvPrsWI>

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- La STEP hydro-éolienne de l'île d'El Hierro aux Canaries
 - Pourquoi **de l'eau douce**? A cause du surcoût pour concevoir tout le système hydraulique en tubes et pièces inox de qualité marine;
 - Mais surtout toute l'île est protégée en tant que Réserve de la biosphère de l'Unesco depuis l'an 2000. Un risque fort de pollution du milieu existerait lors de fuites d'eau salée et de pertes inévitables à terme.
- Les pertes, principalement par évaporation des deux réservoirs, sont importantes.

Disponible sur Netflix : Islands of the future

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Dinorwic Power Station aka Electric Mountain, North Wales
 - 1984, à l'époque le plus gros contrat de travaux publics jamais signé par le gouvernement britannique;
 - Capacité installée 6x300 MW (type Francis), stockage de 9,1 GWh, recharge de 7h;
 - Afin de préserver la beauté du parc naturel de Snowdonia, la centrale elle-même a été construite entièrement en souterrain : 16 km de galeries.



Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Acteurs mondiaux
 - 3 entreprises se partagent **environ 80%** de ce marché
 - General Electric Renewable Energy (États-Unis) et anciennement Alstom Hydro ;
 - Andritz (Autriche) ;
 - Voith Hydro (Allemagne).

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Exercice

- Une STEP est caractérisée par un dénivelé de 926 m entre la hauteur de la turbine et le fond du réservoir supérieur;
- Son réservoir supérieur à un volume de 134,8 hm³;
- PRODUCTION: Les alternateurs ont une puissance utile de 157 MW et un rendement de 98,5%. Les 4 turbines Pelton ont un rendement de 90%;
- CONSOMMATION: Les 8 machines synchrones (alternateurs/moteurs) accouplées ont une puissance électrique de 149 MW avec un rendement de 98,1% et les turbines-pompes accouplées ont un rendement de 89,4% en turbine et 89,8% en pompe.
- En une année, l'énergie électrique consommée pour le pompage est égale à 1720 GWh.

Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles

- Exercice

1. Calculer l'énergie potentielle de l'eau stockée dans le barrage lorsqu'il est plein (en J puis en MWh);
2. Calculer le rendement global des turbines – pompes en fonctionnement « pompe » et en déduire l'énergie transférée à l'eau pendant une année. Évaluer le nombre de fois qu'une même quantité d'eau est turbinée en une année;
3. La puissance maximale en production est égale à 1690 MW pendant une heure : les alternateurs reliés aux turbines sont utilisés à leur puissance utile, ceux reliés aux turbines – pompes fournissant le complément. Calculer l'énergie mécanique nécessaire et en déduire la quantité d'eau turbinée;
4. La puissance de pointe est égale à 1420 MW pendant 172 heures (la répartition de puissance suit le même principe que pour la question précédente). Calculer l'énergie mécanique nécessaire et en déduire la quantité d'eau turbinée. Combien de temps faut-il pour remonter la même quantité d'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur si toutes les pompes sont en fonctionnement ?

Exercice proposé dans 17.2 Exercices stockage gravitaire

Question

- Quelle est l'énergie stockée dans un réservoir d'eau de 1000 m^3 , situé à 200 m au-dessus de la station de turbinage (arrondir à 0,1 GJ)?
 - A. 2,0 GJ
 - B. 7,3 GJ
 - C. 10,6 GJ
 - D. 13,6 GJ
 - E. 1,1 GJ



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- ***Les STEP non conventionnelles***
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- Autres technologies
- Conclusion

Les STEP non conventionnelles

- Les STEP marines

- Utilisent le même concept que les STEP conventionnelles. La mer ou l’océan constituant le réservoir inférieur;
- Une seule application de ce type : Okinawa, Japon. Aménagement expérimental de 30 MW (capacité de 180 MWh) avec 150 m de chute. Construite en 1999. Suivi de 5 ans avant début de l’exploitation commerciale en 2004. Démantelée en 2016;

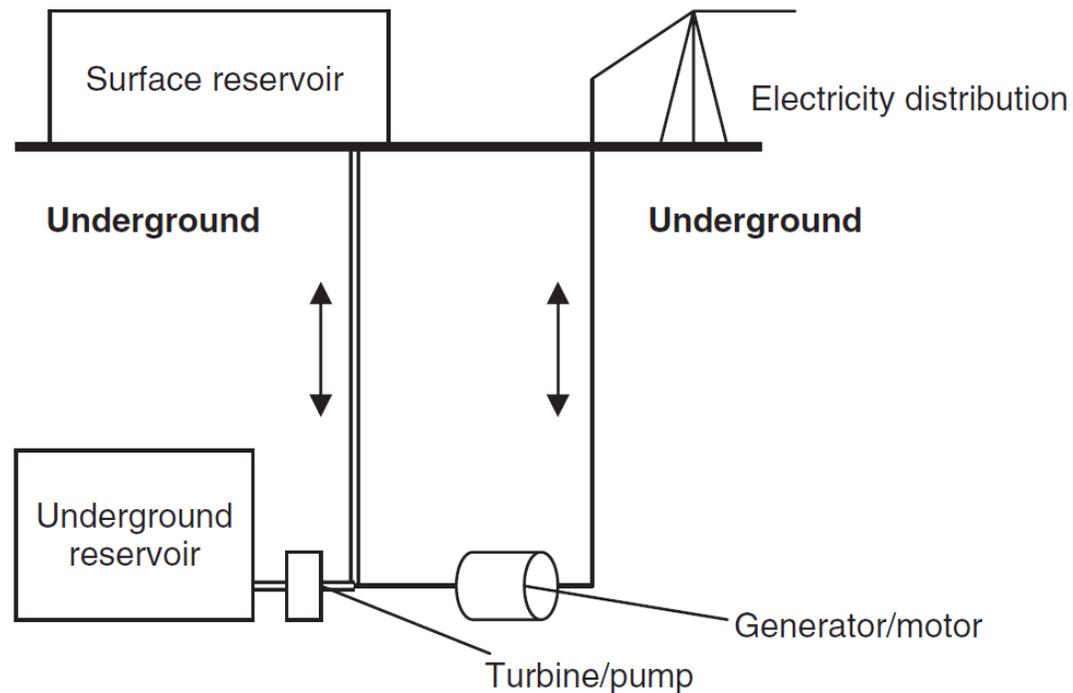


- Intérêt : de nombreux sites exploitables sur le littoral. On est plus limité aux régions montagneuses, essentielles dans le cas des STEP conventionnelles;
- Contraintes du respect de l’environnement marin et corrosion des matériaux au contact de l’eau de mer.

La STEP marine d’Okinawa, le réservoir haut octogonal et le brise lames (en bas)

Les STEP non conventionnelles

- Autres concepts de STEP



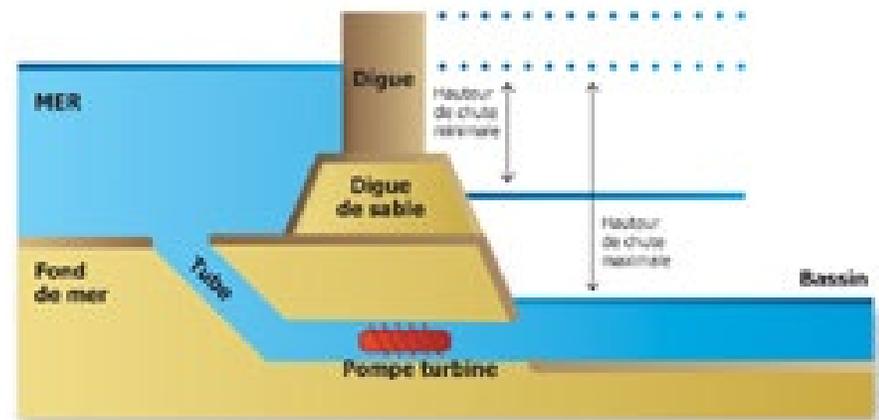
Un des deux réservoirs est souterrain (naturel ou creusé)

Ibrahim and Dincer, 2011, TES, 2ed., Wiley, 621 p.

Les STEP non conventionnelles

- **Des atolls énergétiques sur le concept des STEP**

- En 2013, la Belgique envisageait de construire une île artificielle en forme d'anneau qui lui permettrait de "stocker" l'énergie produite par ses champs d'éoliennes de Mer du Nord. Annoncé pour fin 2019 mais aucune nouvelle depuis;
- De 380 MW en 2013 à 2 262 MW en 2020;
- Contexte : fermeture des deux centrales nucléaires de Tihange et Doel ?;
- Un « anneau » circulaire de 2,3 km de diamètre posé sur le sable, au milieu un grand puits de 30 m.



Les STEP non conventionnelles

- Green Power Island, Danemark



Plus d'info sur leur site : <http://www.greenpowerisland.dk/>

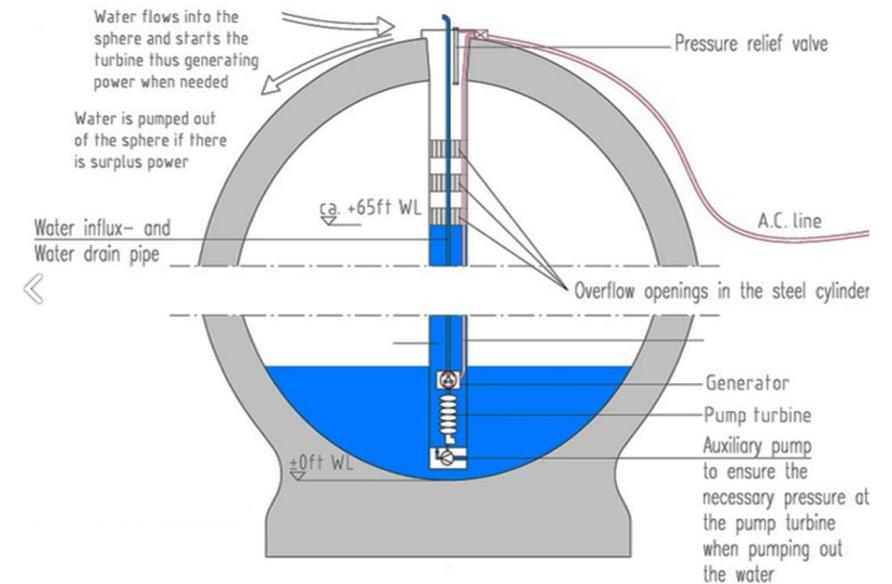
Les STEP non conventionnelles

- Dans son rapport sur l'hydroélectricité à l'horizon 2050, l'AIE suggère deux innovations pour faire progresser les technologies des STEP :
 - l'utilisation de machines hydroélectriques à **vitesse variable** permettant un meilleur contrôle des volumes d'eau pompés ou turbinés;
 - le développement de STEP marines, connectées à des **unités de production offshore** comme les *éoliennes offshore* ou les *énergies océaniques* (entre 2020 et 2050).
- Les développements les plus probables sont des STEP utilisant une retenue existante comme réservoir bas. Le réservoir haut de relativement petite taille a un impact environnemental faible et facilement acceptable.

Les STEP non conventionnelles



- Pour stocker l'énergie, l'eau est pompée hors de la sphère à l'aide d'une pompe électrique
- Pour générer de l'énergie, l'eau circule à travers une turbine située dans la sphère vide et produit de l'énergie électrique via un générateur.
- Avec son collègue le Dr Gerhard Luther de l'Université de la Sarre, le professeur Schmidt-Böcking a déposé un brevet pour leur principe de stockage d'énergie offshore en 2011, quelques jours avant Fukushima.



<https://www.nanowerk.com/news2/green/newsid=45052.php>

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- Les STEP non conventionnelles
- ***Les réservoirs de complexes hydroélectriques***
- Autres technologies
- Conclusion

Les réservoirs de complexes hydroélectriques

- Des STEP au Québec?
 - Non, il n’y a que des barrages au Québec. Les 27 réservoirs d’Hydro-Québec représentent une capacité maximale de stockage de 176 milliards de kilowattheures, soit environ l'équivalent des besoins de l'ensemble du Québec pendant un an.
 - Ces réservoirs se remplissent grâce au cycle naturel de l’eau (pas d’apports par pompage) et permettent d’alimenter les 59 centrales hydroélectriques du réseau.
 - Pas besoin de STEP, le Québec a des réservoirs d’énergie en quantité alimentés par le cycle naturel de l’eau!

Les réservoirs de complexes hydroélectriques

- Les STEP au Québec

- Les STEP et les barrages hydroélectriques sont bien deux choses différentes :

- Les STEP servent à stocker l'électricité lors des périodes creuses mais pendant lesquelles on désire poursuivre la production, celle des éoliennes, par exemple.

- Pour des barrages il suffit de fermer les vannes ou de ralentir le débit. Le niveau d'eau monte.

- Il peut être intéressant de coupler une STEP à un barrage lorsque les apports naturels ne suffisent pas à atteindre la puissance cible sur la période de pointe. Mais il n'y a pas de barrages de ce type au Québec.

- Cependant les barrages restent bien des réserves d'énergie. Si le **potentiel éolien** des réservoirs était suffisant et que la **demande** était là, il serait possible de pomper de l'eau avec des éoliennes en surcapacité pour remplir le réservoir. Mais actuellement, le besoin n'est pas là.

- Les routes et les lignes de transmission seraient déjà sur place ce qui réduirait le coût d'implantation et d'exploitation du projet.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- Les STEP non conventionnelles
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- ***Autres technologies***
- Conclusion

Autres technologies



- Energy Cache : des graviers en remontée mécanique
 - Des investissements de Bill Gates et Bill Gross à l'origine du projet;
 - Fondateur : Aaron Fyke, ing. mécanique du MIT;
 - Idée : utiliser une remontée mécanique (comme pour les stations de ski) pour faire transiter des graviers d'un réservoir « bas » à un réservoir « haut ». L'idée de la STEP avec un matériau solide donc. En anglais : *gravel on ski lifts*;
 - Technologie adaptable en puissance et en capacité de stockage. Le gravier se comporte un peu comme un fluide et est très peu cher;
 - 2012 : construction d'un prototype de 50 kW à Irwindale (CA, USA), mais pas de suite...

Autres technologies

FAILED

- Energy Cache : des graviers en remontée mécanique



Aaron Fyke. Energy Cache 50kW Installation. 2012. 2:01min (vidéo de présentation)

https://www.youtube.com/watch?v=G3nz_kU604s

Autres technologies

- Advanced Rail Energy Storage
 - Idée : charger un train et le faire monter une colline pour emmagasiner de l'énergie, déposer les blocs au sommet et le faire redescendre pour générer de l'électricité. Efficacité annoncée de 85%.

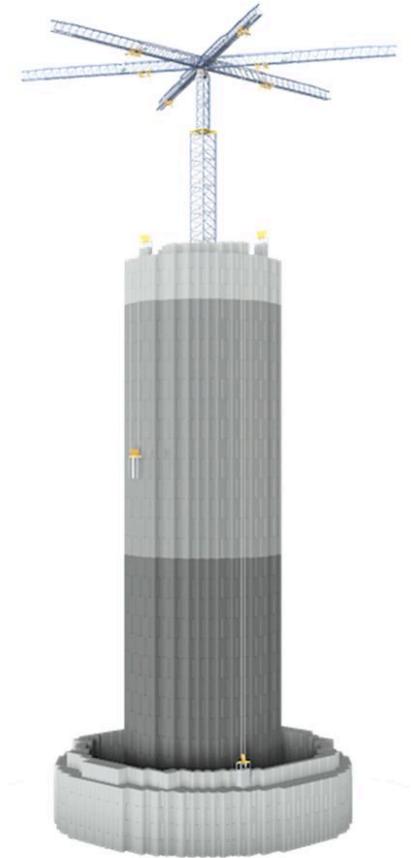


Artist's rendition of the future ARES facility in Pahrump, Nevada. ARES©

- 2016 : permis pour construire un prototype de 50 MW (12,5 MWh) au Sud du Nevada, finalement première opération pour 2020 apparemment...
- Cette technologie se place entre les batteries et volant d'inertie et les STEP. A petite échelle elle peut servir à la régulation du réseau (rapide en réponse) et à plus grande échelle, à stocker de l'énergie sur de longues périodes.

Autres technologies

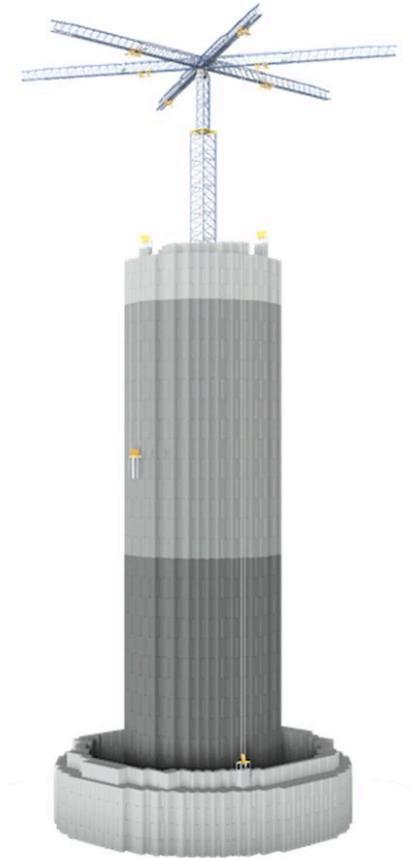
- Energy Vault, Suisse
 - Concept : Utiliser des blocs de béton plutôt que de l'eau. L'empilage de **blocs de 35 tonnes** à l'aide de grues forme alors une tour.
 - Chaque bloc possède alors plus ou moins d'énergie potentielle **selon sa hauteur** dans la structure.
 - La récupération se fait par ces mêmes grues lors du « démontage de la tour » : les câbles étant **reliés à des alternateurs**.
 - Le **logiciel de contrôle** assure un positionnement précis des blocs à chaque phase et permet une cohésion de l'ensemble.



<https://energyvault.com/>

Autres technologies

- Energy Vault, Suisse
 - Le système est modulaire et les capacités de stockage vont de **20 à 80 MWh**. La restitution se fait entre **4 et 8 MW** pendant 8 à 16 heures.
 - La tour mesurerait 120 mètre de haut.
 - Vitesse de descente des blocs : 2,9 m/s.
 - Un premier prototype de 20m de haut a confirmé les attentes du projet



<https://energyvault.com/>

Autres technologies

- Energy Vault, Suisse
 - Points d'intérêts des promesses :
 - Durée de vie de 30 ans
 - Rendement de **85 à 90% théoriquement** : soit plus que les STEP.
 - Béton à empreinte carbone réduite : issus de la récupération des déchets de matériau de construction.
 - Technologie pour les endroits sur Terre avec peu de ressources en eau (pour du stockage par des STEP) : climat désertique, trop chaud ou trop froid.
 - Moins contraignant par rapport au lieu d'implantation d'une STEP : pas besoin de dénivelé -> installation au plus près des sites de production ; peu d'empreinte au sol : 100m de diamètre.
 - LCOE = 0,05 \$/kWh ?

Energy Vault Inc. 2019. 3D Tower Simulation. 2:24min (vidéo de présentation)

<https://www.youtube.com/watch?v=gn5AM75AGvw>

Autres technologies

- Energy Vault, Suisse
 - Né d'un incubateur suisse financé par Bill Gross;
 - Participation du fondateur d'Energy Cache;
 - Un fort potentiel et un concept simple qui fait rêver;
 - Vainqueur des World Changing Idea Award 2019 : *Fast Company for Transformative Utility-Scale Energy Storage Technology*;
 - Investissement de 110 million \$ de SoftBank Vision Fund en août 2019;
 - Contrat avec Tata Power : tour en Inde en 2019;
 - Une tour de 35 MWh dans le Nord de l'Italie en 2019.



Energy Vault, PV and Wind Storage,
Business Wire

Autres technologies



- Energy Vault, Suisse

Mais qu'en est-il de la densité énergétique de ce type de structure ?
Quels sont les impacts (émissions de GES et ressources naturelles)
de la construction des blocs de béton ?

Une critique et une réflexion sur cette technologie :
Le Réveilleur. 2019. Un stockage en béton ? 7:52min
<https://www.youtube.com/watch?v=S6Y4XVa8tew>

Avec 6500 blocs de béton de 35 tonnes et une durée de vie de 30 ans.
500g de CO₂ / kWh avec du béton classique, c'est environ les émissions d'une centrale
au gaz naturel classique, et ce, sans prendre en compte le système de production de
l'électricité dans le cas d'Energy Vault.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le pompage-turbinage dans les STEP conventionnelles
- Les STEP non conventionnelles
- Les réservoirs de complexes hydroélectriques
- Autres technologies
- ***Conclusion***

Conclusion

- Parmi les solutions de stockage mécanique gravitaire, seules les technologies liées à l'hydroélectricité sont aujourd'hui viables et appliquées à grande échelle;
- Ces technologies induisent cependant le problème de la disponibilité de sites appropriés, une empreinte physique au sol importante et un impact sur le paysage considérable.
- Acceptabilité sociale : « Dans bien des pays, ce sera ça ou des combustibles fossiles » !

Bibliographie/médiagraphie

Vidéo EDF sur les STEP

- <https://www.youtube.com/watch?v=cOKSst-un8c&list=PLC44EB462B47CC55E&index=20>

Dossier HQ sur l'hydroélectricité

- <http://www.hydroquebec.com/comprendre/>

Page d'actualité du chantier La coche EDF

- <https://www.edf.fr/la-coche>

Article sur les STEP

- <https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-stockage-des-energies-renouvelables.N620998>

Article sur le stockage par les STEP (erreurs)

- <https://www.revolution-energetique.com/stockage-energies-renouvelables-step-manquent-a-appel/#comments>

Article de Sia Partners

- <http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour-accompagner-les-prochaines-etapes-de-la>

Dossier sur les STEP

- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>
- <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-stockage-energie-invention-geniale-startup-suisse-73877/>
- <https://energyvault.com/>
- <https://www.revolution-energetique.com/a-la-coche-edf-inaugure-la-centrale-hydroelectrique-la-plus-puissante-de-france/>
- <https://blogs.futura-sciences.com/gioda/2018/01/25/el-hierro-coche-stockage-de-lenergie-deux-steps-differentes/>

Bibliographie/médiagraphie

- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage de l%27%C3%A9nergie#Les grandes formes de stockage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l%27%C3%A9nergie#Les_grandes_formes_de_stockage)
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompage-turbinage#cite_note-UsineNouvelle620998-6
- https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_centrales_de_pompage-turbinage
- <https://www.youtube.com/watch?v=ECXJ5rTni74>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/une-tour-de-blocs-de-betons-pour-stocker-lelectricite-190116>
- <https://www.businesswire.com/news/home/20190814005008/en/Energy-Vault-Closes-Series-Funding-110-Million>
- <https://energyvault.com/>
- <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-stockage-energie-invention-geniale-startup-suisse-73877/>
- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/energy-vault-stacks-concrete-blocks-to-store-energy#gs.76nzhu>
- <https://qz.com/1355672/stacking-concrete-blocks-is-a-surprisingly-efficient-way-to-store-energy/>
- <https://gigaom.com/2012/03/27/the-story-of-energy-cache-a-drop-dead-simple-energy-idea/>
- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/first-grid-scale-rail-energy-storage-project-gets-environmental-approval-fr#gs.83xxdg>
- <https://www.aresnorthamerica.com/>



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

