

17. Stockage de l'énergie

17.3 – Stockage thermodynamique par air comprimé

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

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

*CAES = Compressed Air
Electricity Storage

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

*CAES = Compressed Air
Electricity Storage

Introduction et objectifs

- Les technologies de CAES sont assez récentes mais pourraient se positionner comme des concurrents sérieux aux STEP;
- Dans un contexte de stockage de masse et d'intégration de la production des EnR, de nombreux projets voient le jour depuis une quinzaine d'années;
- Mais cette technologie est-elle suffisamment mature actuellement pour concurrencer le pompage-turbinage et les autres formes de stockage ?

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Donner une brève description de l'origine de l'air comprimé et de ses utilisations historiques;
 - Présenter les 4 générations de CAES en donnant bien les différences entre chaque technologie;
 - Donner un aperçu complet de l'état des projets passés, présents ou futurs les plus significatifs;
 - Faire réfléchir sur les nombreux avantages des CAES et le potentiel de développement.

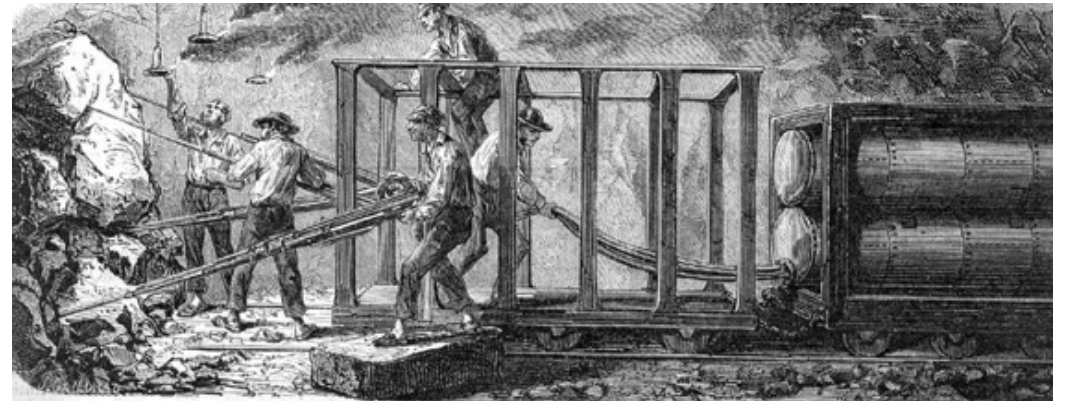
Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Origine de l'air comprimé***
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

Origine de l'air comprimé

- **Deux mille ans d'histoire**

- Il apparaît qu'il y a deux milles ans, un grec, Ktesibios, développa un canon pneumatique pour augmenter la portée du tir;
- 1857 : ère industrielle du chemin de fer. Lors du percement du tunnel du Mont-Cenis, l'ingénieur Germain Sommeiller mis au point une foreuse à air comprimé (vitesse d'avancement de 2 m/j, contre 60 cm/j avec des moyens traditionnels);
- 1880 : invention du premier frein pneumatique;
- 1888 : Victor Popp installe à Paris un réseau souterrain de distribution d'air comprimé (plus de 1000 km de tuyauteries sous 6 bars). Il y en a eu également à Birmingham (GB), Dresden (Allemagne) et Buenos Aires (Argentine).



Origine de l'air comprimé

- **Histoire de la technologie CAES**

- Le stockage a vu le jour dans les années 1970 dans l'objectif de reporter la production d'électricité des heures de pointes vers les heures creuses et d'assurer l'alimentation de secours en cas de black-out;
- Mais, malgré un investissement plus faible que pour les STEP, seules deux installations furent construites dans le monde : [Huntorf](#), en Allemagne et [Mac Intosh](#), aux Etats-Unis;
- Aujourd'hui, il y a de nombreux projets en cours et une entreprise semble prometteuse (Hydrostor, Toronto) et a déjà développé au stade commercial une nouvelle technologie de CAES;
- Plus près de chez-nous, [SIGMA Énergie](#) propose aussi un système.

Plan de la présentation

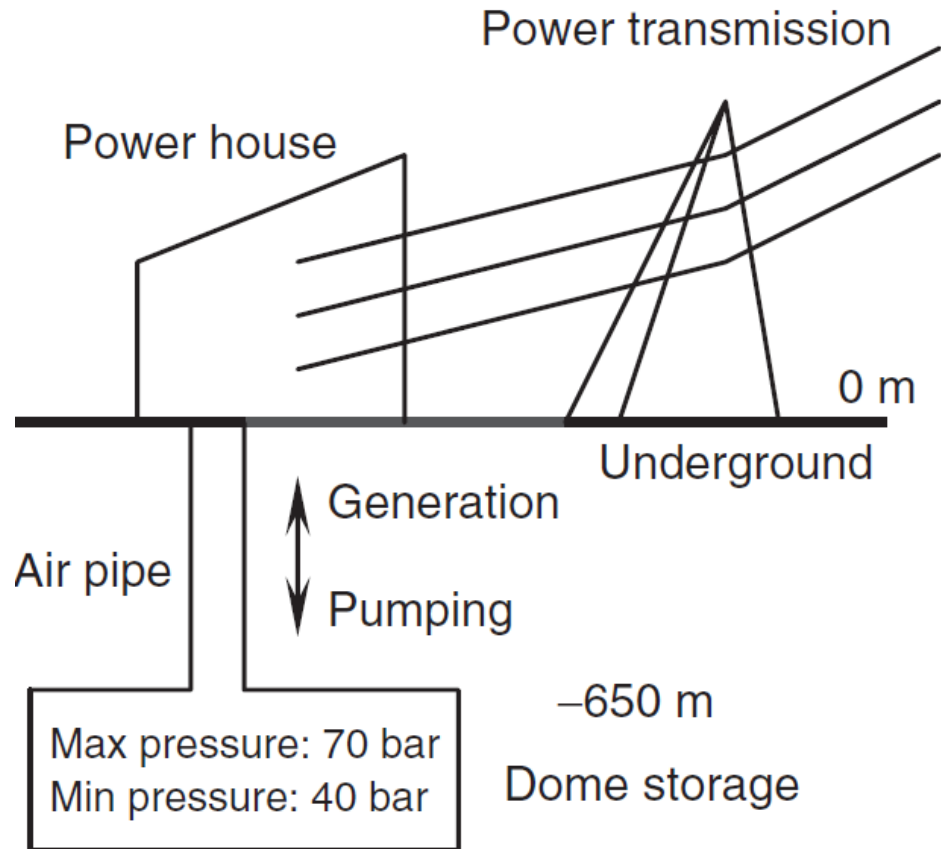
- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- **CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération**
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

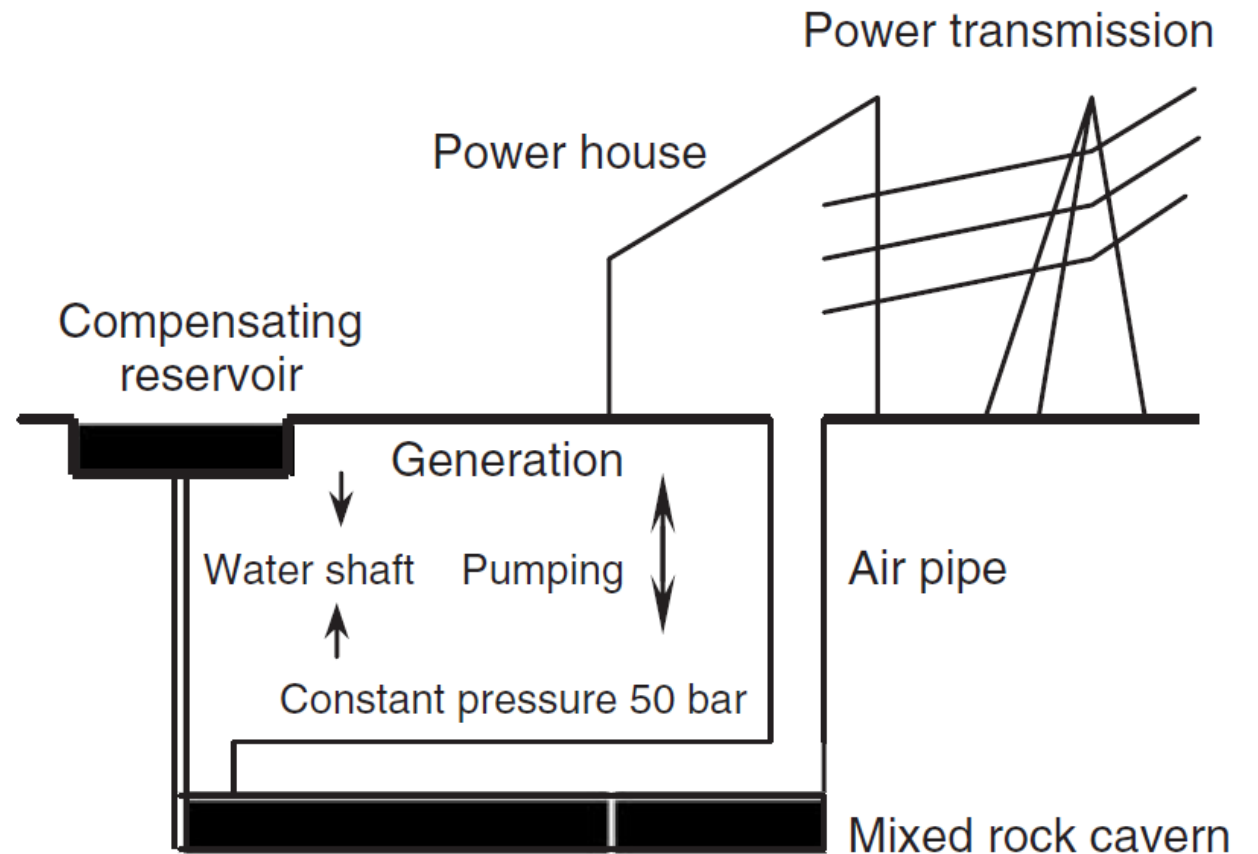
- L'idée est sensiblement la même que pour les STEP marines mais au lieu d'utiliser de l'eau et une différence de hauteur, on utilise de l'air et un différentiel de pression. Un réservoir est requis pour stocker/déstocker l'air comprimé. A l'image de la mer ou de l'océan pour les STEP marines, le deuxième réservoir d'un système de stockage à air-comprimé est l'atmosphère;
- Le stockage de l'air comprimé peut alors se faire dans des cuves ou dans des cavités souterraines. Stockage à une pression comprise entre 70 et 100 bars;
- On a un compresseur à air (couplé à un moteur) ainsi qu'une turbine classique (couplée à un alternateur) : deux groupes d'éléments donc. On ne peut utiliser une turbine réversible comme pour les STEP.



CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération



**Réservoir à pression variable
(fonction du chargement)**



**Réservoir à pression constante ou isobare
(un mécanisme pousse le fluide)**

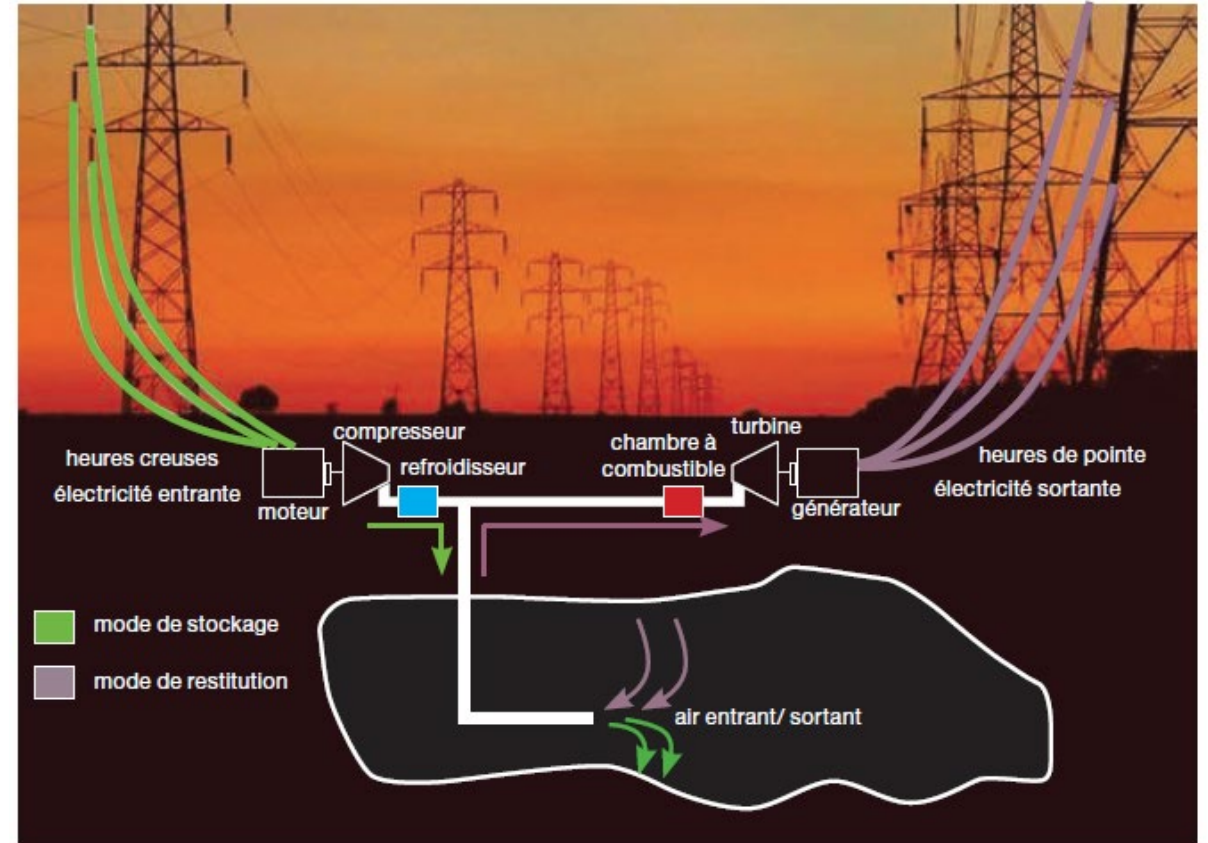
CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- Le système présente d'importantes pertes dues à la compression et la détente.
 - En théorie, il est impossible de réaliser une compression sans échauffement de l'air et une détente sans refroidissement (détente de Joule-Thompson)
 - Le rendement est alors limité en théorie à 85%
- De plus, pour des questions de tenue en température de la caverne et d'endommagement de la turbine, l'air doit être refroidi lors de la compression et réchauffé lors de la détente.
 - L'élévation de température atteint jusqu'à 600°C lors de la compression à 70 bars et la baisse jusqu'à -100°C lors de la détente (il pourrait alors neiger à 30 km autour du site !)
- Le refroidissement/chauffage de l'air se fait avec l'environnement extérieur par l'intermédiaire d'échangeurs thermiques.

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- **1^{ère} génération de CAES**

- Le réchauffement de l'air se fait à l'aide d'une chambre de préchauffage au gaz (avant la chambre de combustion). La consommation reste nettement inférieure à celle d'une turbine à gaz équivalente.
- Avec préchauffage, le rendement énergétique global de l'installation atteint près de 50%.
- Notez que le système est cependant émetteur de GES.



Mosseri, Rémy, et Jeandel, Catherine, *L'énergie à découvert*, CNRS, 2013, page 217

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- **Fonctionnement d'une turbine à gaz classique**

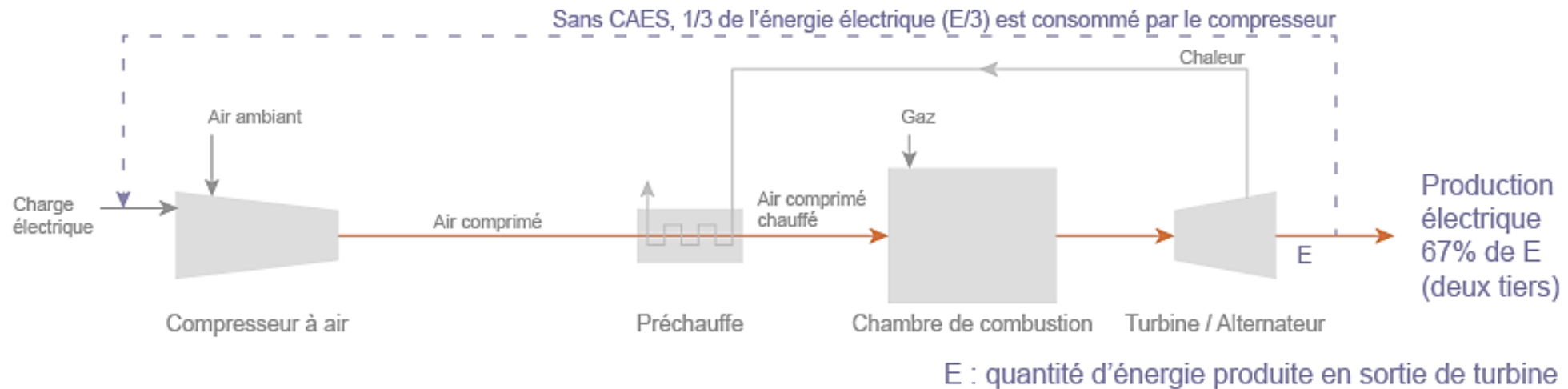
- Dans une turbine à gaz classique, de l'air ambiant est capté et comprimé dans un compresseur à très haute pression (100 à 300 bars);
- Cette compression de l'air s'accompagne d'un échauffement pouvant aller jusqu'à quelques centaines de degrés;
- L'air chaud comprimé est injecté avec du gaz dans une chambre de combustion;
- Le mélange en sortie entraîne une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité.

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- **Fonctionnement d'une turbine à gaz classique**

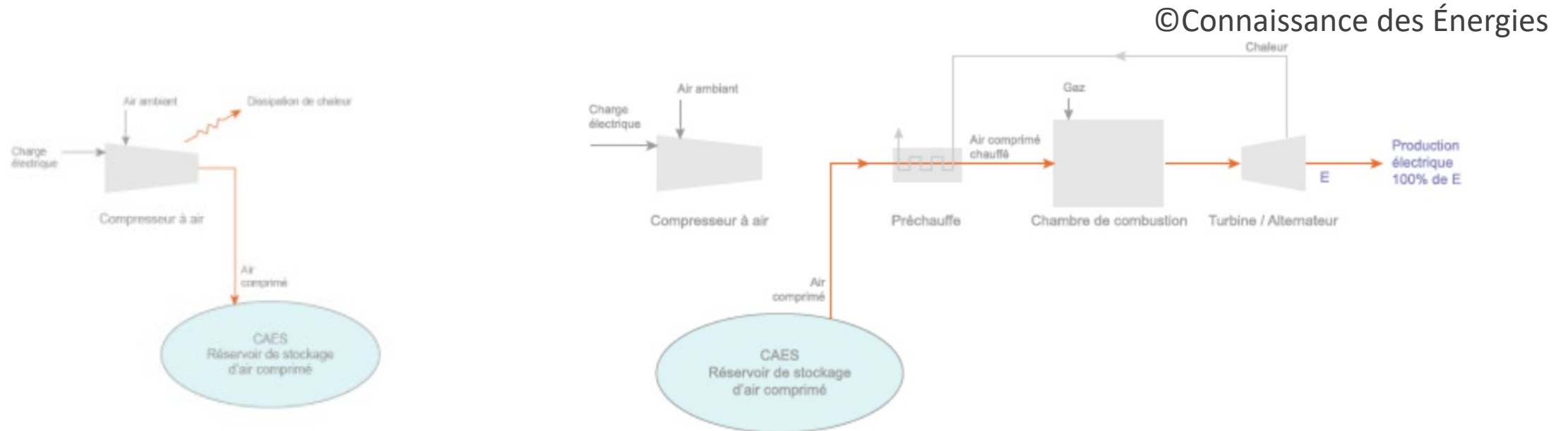
Fonctionnement sans CAES

©Connaissance des Énergies



CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

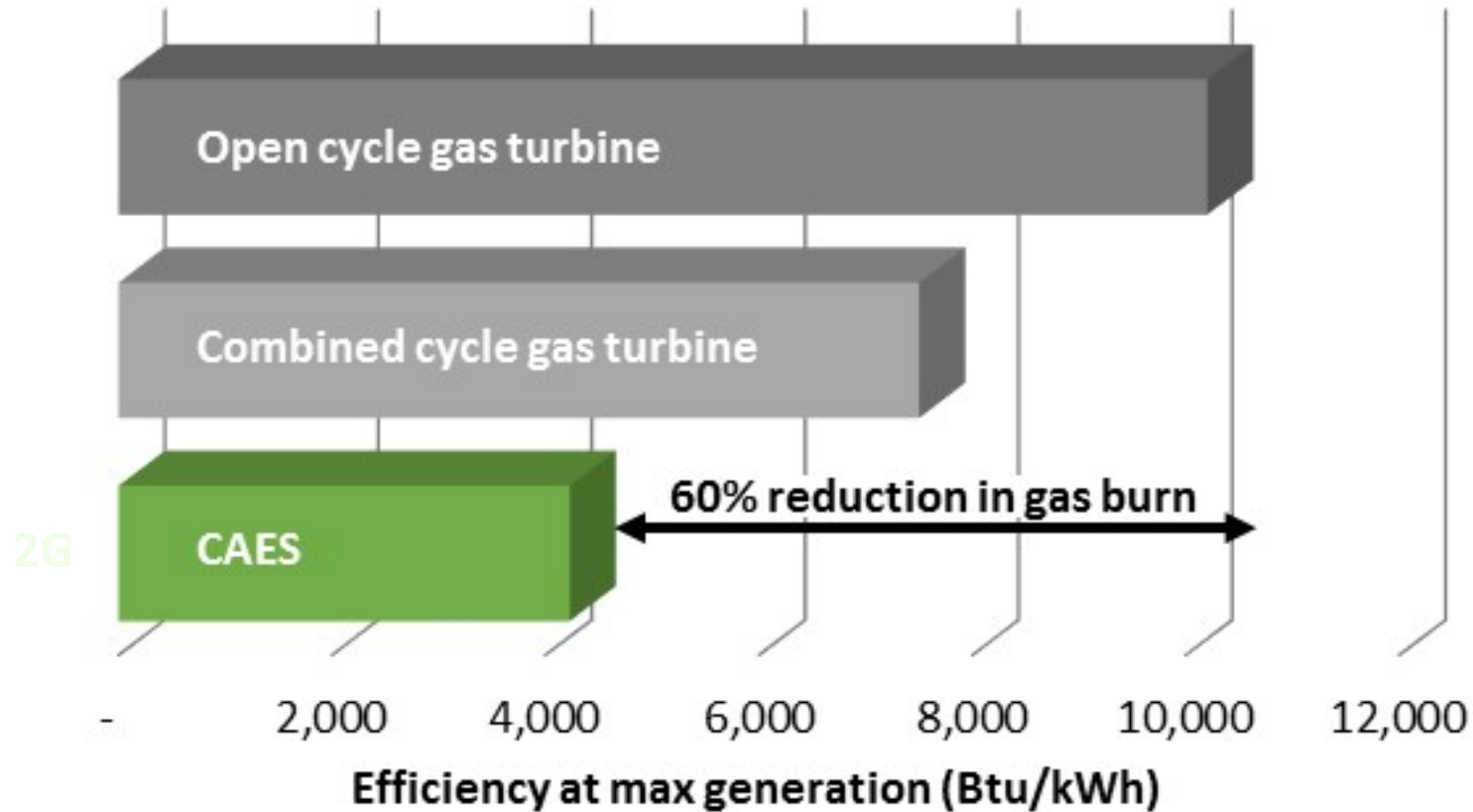
- **Fonctionnement d'une turbine à gaz avec CAES**



- Le principe du CAES consiste à décorrérer la phase de compression de l'air du reste du processus (à gauche stockage, à droite déstockage).

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- Comparaison des consommations



<http://www.apexcaes.com/technology-overview>

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- **Huntorf, Allemagne du Nord**

- Mise en service en 1978, la première de ce type au monde. CAES 1^{ère}G
- Puissance de 290 MW à l'origine (disponible en 2h), augmentée à 321 MW en 2006
- À la base pour réguler le réseau électrique et lisser la production de la centrale nucléaire voisine, Unterweser.

La centrale de stockage assure également l'alimentation électrique de secours de la centrale nucléaire en cas d'effondrement du réseau.



CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

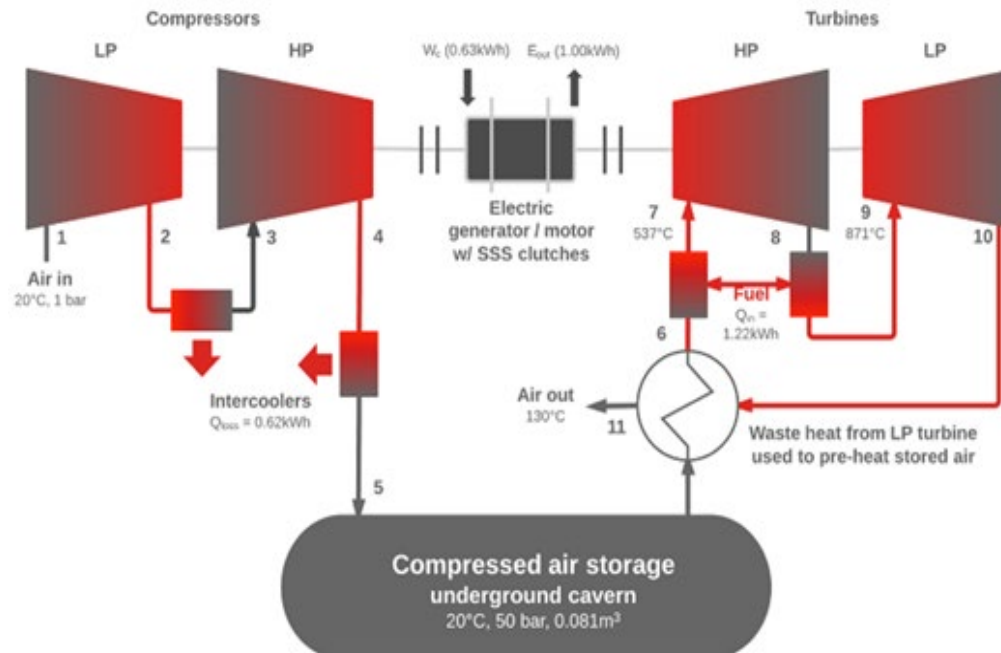
- **Huntorf, Allemagne du Nord**

- 2 cavités salines entre 650 et 800 m : volume total de 310 000 m³ (équivalent d'une centaine de piscines olympiques) -> capacité de stockage de 1 200 MWh - rendement de 42%;
- Les compresseurs haute pression et basse pression sont montés en série et ont une puissance d'environ 60 MW. 8h pour que l'air dans le réservoir soit comprimé à 72 bars;
- En 2018, l'exploitant, Uniper, a déposé une demande pour augmenter la pression dans les cavernes pour atteindre une capacité de stockage de 1 680 MWh;
- La centrale est aujourd'hui entièrement automatisée. Remplacer le gaz naturel par de l'hydrogène dans la chambre de combustion produit par les EnR serait un projet à l'étude.

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- 2^{ème} génération de CAES

- Similaire à la 1^{ère} génération mais la chaleur de la turbine est utilisée pour réchauffer l'air avant la combustion. Cela permet alors d'améliorer l'efficacité du cycle.



Courtesy, Dr. Hussein Ibrahim, ITMI, Sept-Iles, 2017

CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération

- **Mac Intosh, Alabama, États-Unis**

- Mise en service en 1991. 2^{ème} génération de CAES
- Puissance de 110 MW (délivrable en 26h)
- 1 caverne située entre 450 et 750 m de profondeur : 538 000 m³
- 2 860 MWh
- Pression comprise 46 et 76 bar
- Rendement de 54%



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- **CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération**
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

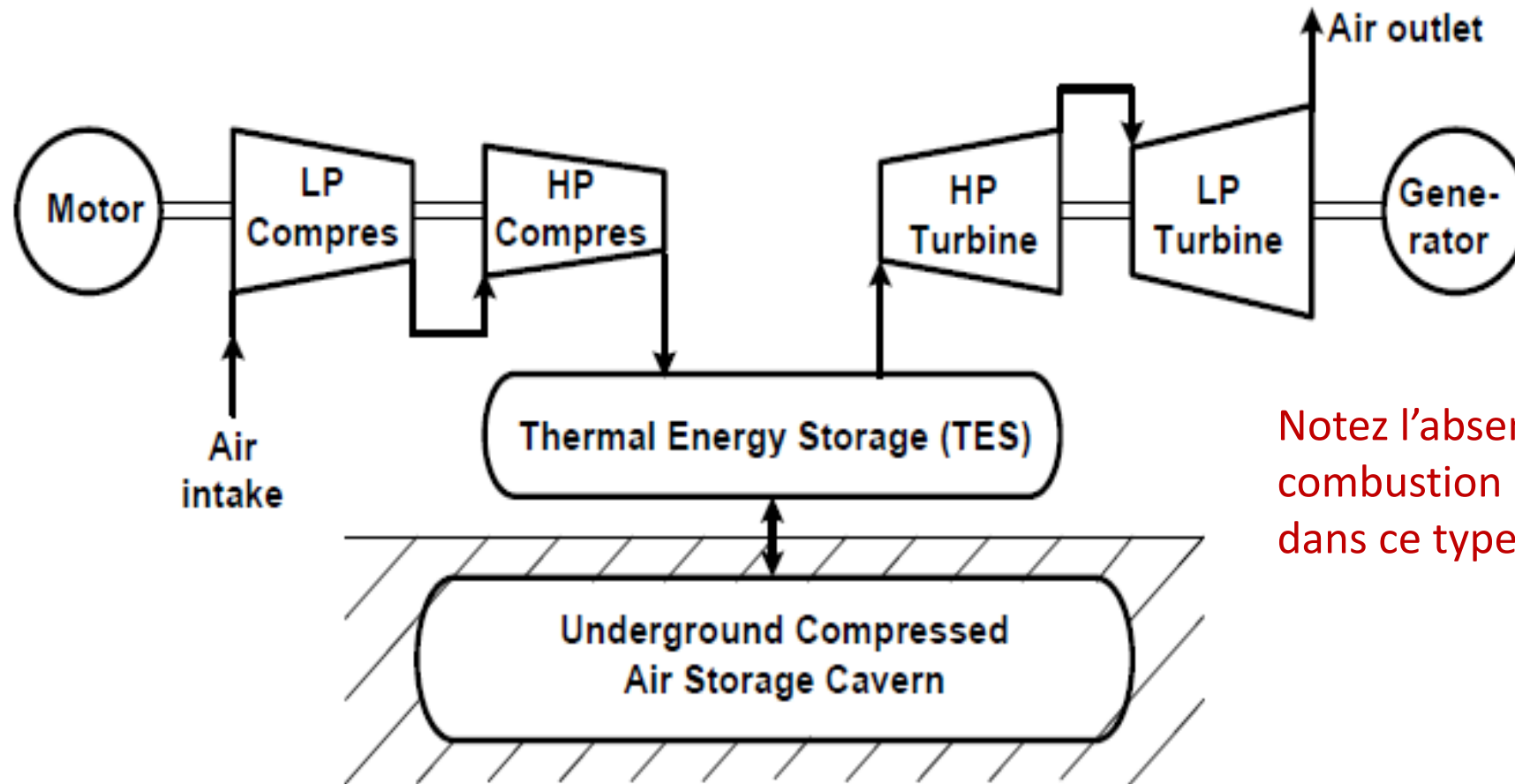
CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération

- **AA-CAES (Advanced Adiabatic CAES)**

- Un système est dit « **adiabatique** » quand il n'échange pas de chaleur avec l'extérieur (Thème 2.5 Thermodynamique);
- Ainsi pour le AA-CAES, la chaleur de compression est stockée en même temps que l'air, mais dans un second réservoir, et est restituée lors de la détente pour réchauffer l'air. C'est le couplage entre un CAES conventionnel et un système de stockage thermique (sensible, latent, voir thermochimique);
- Le système n'émet donc **pas de GES** directement et le rendement est meilleur : jusqu'à 70-90% en théorie;
- Pression de 80 à 150 bars et température du stockage thermique ~600 °C;
- Très peu d'installations de ce type à ce jour, mais sur le papier cette nouvelle avancée pourrait permettre à la technologie CAES de rivaliser avec les STEP en terme de rendement.

CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération

- AA-CAES (Advanced Adiabatic CAES)



Notez l'absence de combustion de gaz naturel dans ce type de stockage

Courtesy, Dr. Hussein Ibrahim, ITMI, Sept-Iles, 2017

CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération

- AA-CAES (Advanced Adiabatic CAES)

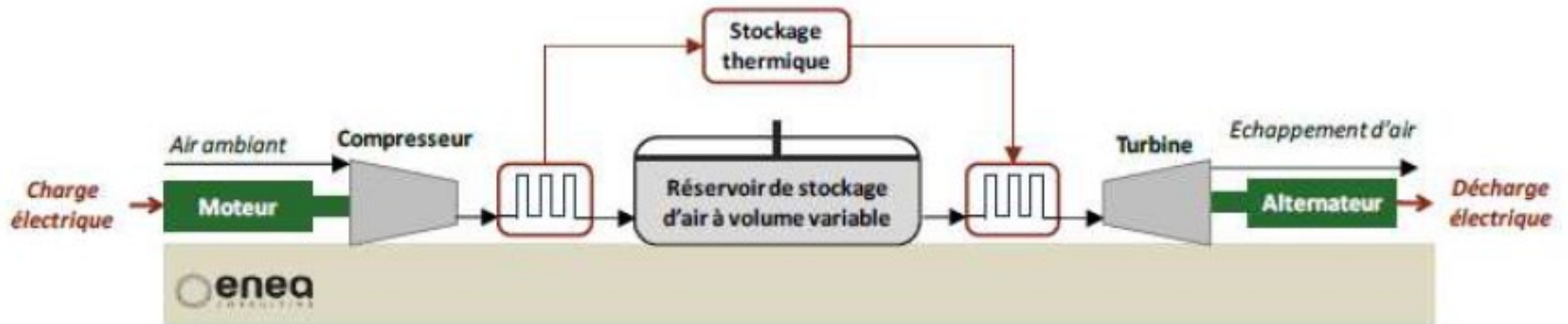


Schéma de principe du « CAES isobare adiabatique de surface »
(d'après ENEA Consulting, 2012)

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- **CAES isotherme, 4^{ème} génération**
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

CAES isotherme, 4^{ème} génération

- Encore sous la forme d'un prototype, ce procédé est appelé **isotherme** parce que la température du système reste uniforme et constante;
- Il ne faut donc pas attendre la compression de l'air pour extraire la chaleur. Cela doit se faire au fur et à mesure pour en conserver un maximum. Grâce à cette technique **un rendement de 95%** serait théoriquement envisageable;
- Lors de la phase de compression, un fluide caloporteur, généralement de l'eau, est injectée dans le compresseur, et permet de récupérer la chaleur générée. Lors de la détente, l'eau est de nouveau injectée dans le système, afin de restituer la chaleur stockée à l'air.

CAES isotherme, 4^{ème} génération

- La plupart des méthodes de stockage d'énergie, y compris les batteries, sont coûteuses et difficiles à mettre à l'échelle. Danielle Fong a vu l'opportunité de réinventer une technologie classique - l'air comprimé - pour résoudre les problèmes énergétiques de haute technologie;
- Elle a développé une méthode pour améliorer l'efficacité de l'air comprimé comme moyen de stockage d'énergie qui pourrait réduire radicalement les coûts et la complexité;
- Danielle Fong figurait dans la liste Forbes 30 under 30 des personnes qui n'attendent pas pour réinventer le monde en 2012. Elle a abandonné l'école secondaire à l'âge de 12 ans pour fréquenter l'Université Dalhousie, puis a quitté le département de physique des plasmas de l'Université de Princeton pour démarrer LightSail Energy.

<https://www.youtube.com/watch?v=hZiaTV6uvFQ&t=253s>

CAES isotherme, 4^{ème} génération

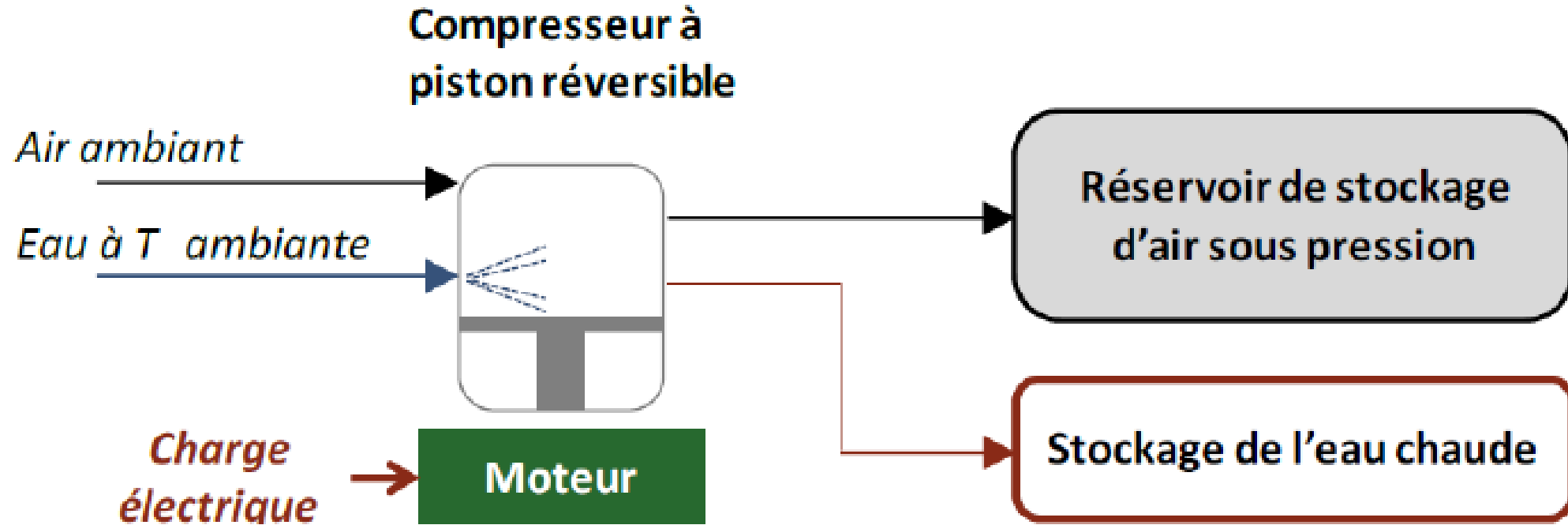


Schéma de principe du « CAES isotherme de surface »
(ENEA Consulting, 2012)

<https://www.youtube.com/watch?v=hZiaTV6uvFQ&t=253s>

Air liquide

- Nouvelle technologie : 2005 à 2021
 - Le stockage d'énergie dans l'air liquide (ou en anglais LAES) utilise l'électricité pour refroidir l'air jusqu'à ce qu'il se liquéfie, -196°C (-320°F), stocke l'air liquide dans un réservoir, ramène l'air liquide à un état gazeux (par exposition à l'air ambiant ou avec la chaleur résiduelle d'un processus industriel) et utilise ce gaz (ratio volumétrique 700:1) pour faire tourner une turbine et produire de l'électricité.
 - Les systèmes LAES utilisent des composants prêts à l'emploi avec une longue durée de vie (30 ans et plus), ce qui entraîne un faible risque technologique.
 - Le stockage d'énergie dans l'air liquide (LAES) est parfois appelé stockage d'énergie cryogénique (CES).

<https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/liquid-air-energy-storage-laes/>

<https://highviewpower.com/technology/>

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- ***Stockage oléopneumatique/hydropneumatique***
- Perspectives et projets de centrales
- Conclusion

Stockage oléopneumatique/hydropneumatique

- Stockage hydropneumatique ou *Hydro Pneumatic Energy Storage* (HPES en anglais)
- Cette technologie utilise **de l'eau** ou **une huile** (presque incompressible) comme fluide de travail intermédiaire pour compresser et détendre l'air ;
- Le fluide permet de limiter l'augmentation de température lors de la compression et de travailler plus proche de l'isotherme (grande capacité thermique du fluide) ;

Stockage oléopneumatique/hydropneumatique

- L'air et le fluide sont alors séparés par une membrane ou directement en contact, ce qui améliore davantage les échanges thermiques;
- Dans ce dernier cas, un séparateur air/liquide peut être requis avant le stockage de l'air;
- Il est possible d'atteindre des pressions de 200 bars;
- Les systèmes étudiés réalisent le stockage de l'air dans des unités de stockage de surface (des cylindres haute pression).

Stockage oléopneumatique/hydropneumatique

- **Un concept plus ancien qu'il n'y paraît...**

La **suspension hydropneumatique** des DS 19 à 23 de Citroën.

Une animation du fonctionnement sur cette page :

<https://www.air-techniques.fr/blog/la-suspension-hydropneumatique-citroen/>



Citroën annonce l'abandon complet de la suspension hydropneumatique en 2015, principalement en raison du coût et de l'encombrement. Mais 2 ans plus tard, Mercedes et Audi utilisent la technologie !

Une meilleure tenue de route et une meilleure souplesse engendre aussi une consommation plus importante et donc une plus grande pollution...

Stockage oléopneumatique/hydropneumatique

- La suspension hydropneumatique n'est donc rien d'autre que le développement moderne et à grande échelle d'un concept ancien : celui de **l'accumulateur hydraulique**, ou **piston hydraulique**;
- Pour cette application, le piston hydraulique est constitué par une cuve fermée remplie en partie d'eau, au-dessus de laquelle se trouve une poche d'air;
- On injecte de l'eau lentement à l'aide d'une pompe hydraulique, ce qui fait monter le niveau dans la cuve et comprime l'air;
- En sens inverse, la pression de la poche d'air se transmet à l'eau qui restitue l'énergie en actionnant un moteur hydraulique.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- ***Perspectives et projets de centrales***
- Conclusion

Perspectives et projets de centrales

- **Solutions de stockage d'air en souterrain**
 - Cavité saline
 - Cavité minée
 - Aquifère
 - Gisement d'hydrocarbure vide

Perspectives et projets de centrales

- Solutions de stockage d'air en souterrain

- **Cavité saline :**

- Très faible perméabilité du sel.
 - Endommagements possibles sous fortes contraintes en pression et en température et notamment cycliques et rapides.
 - Mais capacité du sel de se recristalliser, en présence d'air humide et qui peut conduire, dans certaines conditions, à un colmatage progressif des fissures.
 - Ce type de stockage est dans l'ensemble bien maîtrisé aussi bien sur le plan technico-économique que d'un point de vue des risques et impacts.

Perspectives et projets de centrales

- Solutions de stockage d'air en souterrain

- **Cavité minée :**

- Un ouvrage souterrain composé d'une ou de plusieurs galeries creusées dans un massif rocheux (cristallines, calcaires...).
 - Spécialement foré pour le besoin du stockage, auxquelles on accède pendant la construction à l'aide d'un puits ou d'un tunnel incliné (descenderie).
 - Étanchéité plus difficile à contrôler.

Perspectives et projets de centrales

- **Solutions de stockage d'air en souterrain**

- **Aquifère :**

- Utilise les vides présents dans certaines couches géologiques poreuses et perméables (aquifères, en principe d'eau salée) dès qu'il y a une couche imperméable entre le produit stocké et la surface.
 - Déjà utilisé pour du stockage de gaz naturel mais semble problématique au niveau de la pression pour des CAES.
 - De plus, le stockage d'air est susceptible de modifier de façon importante le pH, la salinité et la minéralogie du réservoir, en affectant notamment la composition microbienne. Cela pourrait induire une modification de la porosité et de la perméabilité (*Kirk et al., 2010, repris par l'INERIS, 2016*).

Perspectives et projets de centrales

- **Solutions de stockage d'air en souterrain**

- **Gisement d'hydrocarbures déplété :**

- Déjà utilisé pour du stockage de gaz naturel.
 - Le mélange de l'air stocké avec les hydrocarbures résiduels peut induire un risque de combustion spontanée dans le réservoir ou dans la turbine
 - *(Grubelich et al., 2010, repris par l'INERIS, 2016).*

Perspectives et projets de centrales

- **Quelques entreprises à surveiller au Canada et aux USA**
 - Hydrostor, fondée 2014, Ontario
 - Sigma énergie, fondée 2012, Québec (en faillite?)
 - Apex CAES, fondée ?????, Texas
 - Light Sail, fondée 2008, Californie
 - PG&E, début de ce type d'activités 2009, Californie
 - SustainX, fondée 2007, New-Hampshire
 - General Compression, fondée 2006, Mass

Perspectives et projets de centrales

- **Hydrostor, Canada**

- Fondée en 2014, Toronto
- Le **premier CAES adiabatique commercial** au monde
- Combinaison d'un CAES adiabatique avec un CAES isobare
- Innovation dans les techniques de minages qui permet à la compagnie d'installer sa technologie pratiquement n'importe où. Ils se sont affranchit de la contrainte d'avoir une cavité naturelle exploitable : ils créent une cavité minée
- Cavité isobare par couplage avec un lac en surface -> cela rend la production d'électricité plus prédictible
- 50 à 500 MW / De 4 à 24h de stockage
- Rendement d'environ 65% mais de nombreux problèmes du AA-CAES furent levés - durée de vie de 50 ans
- CAPEX : 1 500 à 3 000 \$/kW ; 150 à 300 \$/kWh

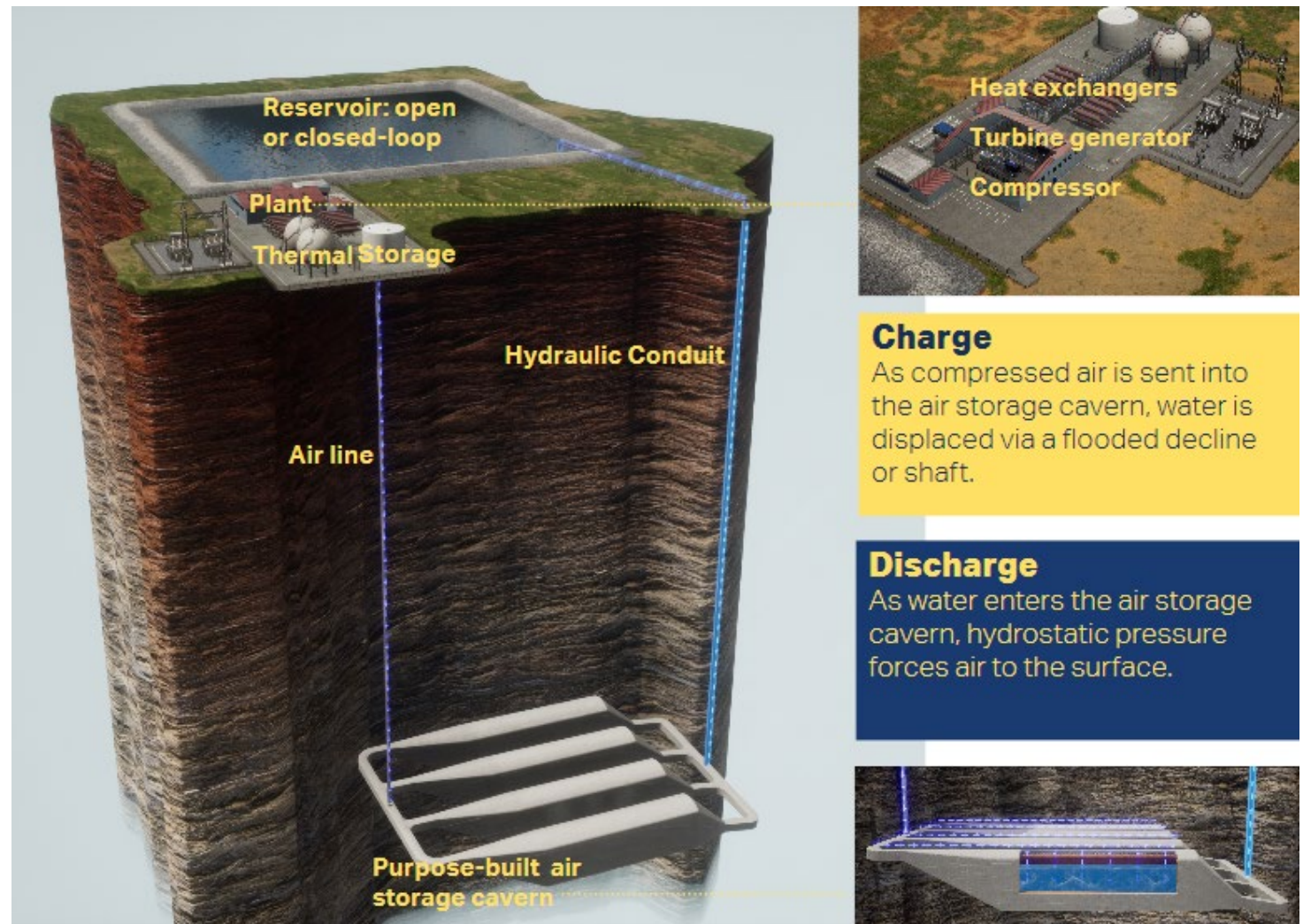
Plus d'infos : <https://www.hydrostor.ca/>

Perspectives et projets de centrales

- Hydrostor, Canada

Schéma de la technologie
Advanced-CAES (A-CAES)
The Terra concept

Source : Hydrostor. 2020.
Brochure En



Perspectives et projets de centrales

- **Hydrostor, completed projects**

Toronto Island Demonstration Facility

2015

Démonstration technique et test long terme,
réserve d'énergie pour Toronto Island

Stockage à 55 m sous le lac Ontario - 1 MW



Goderich, Ontario

Premier A-CAES commercial au monde

En service depuis 2019

1,75 MW en sortie et 2,2 MW à la charge / 10 MWh

Owner : Hydrostor/NRStor, contracted by Ontario's
Independent Electricity System Operator (IESO)



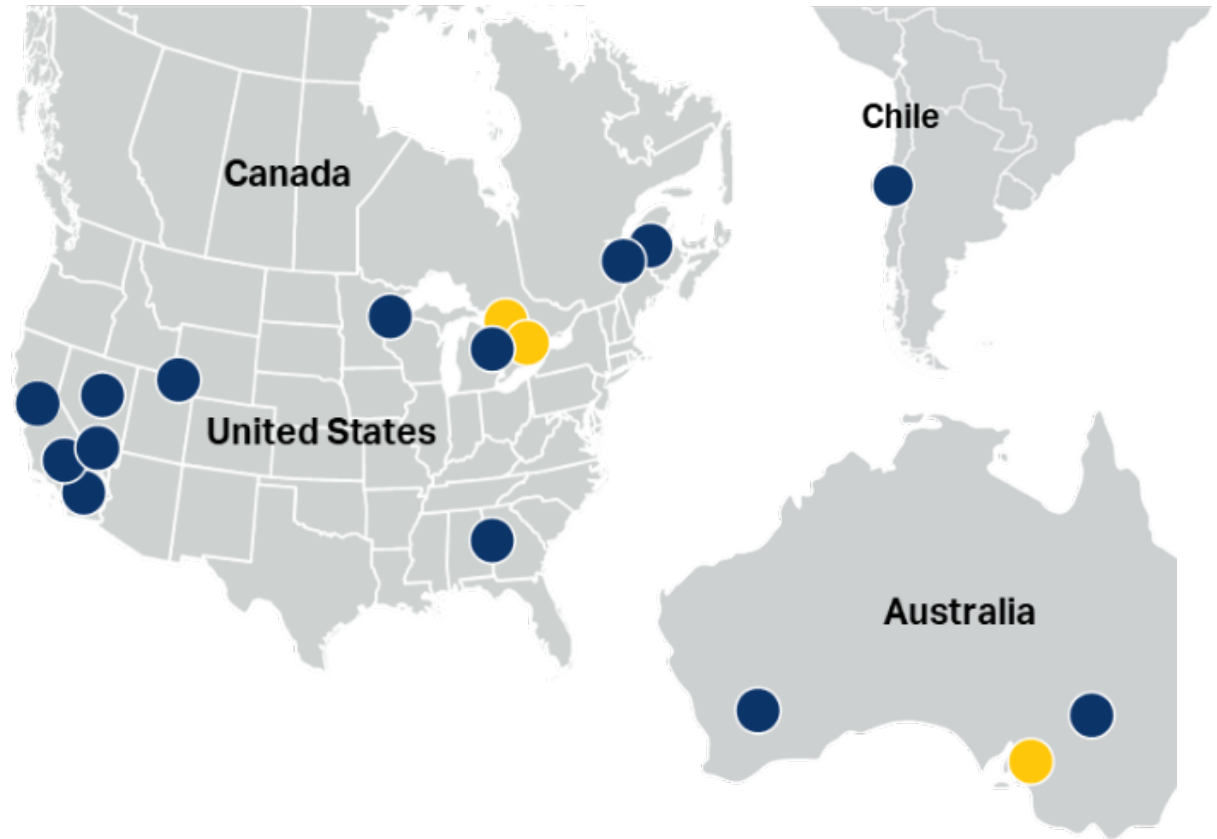
Perspectives et projets de centrales

- **Hydrostor, projects to come**

- Angas Project, Strathalbyn, Australie - 5 MW / 10 MWh
- Une ancienne mine de zinc, prévu pour 2020
- Environ 2 GW (16 GWh) à l'étude

● *Facilities in Operation or Under Construction*

● *Near- and Medium-Term Development Opportunities*



Perspectives et projets de centrales

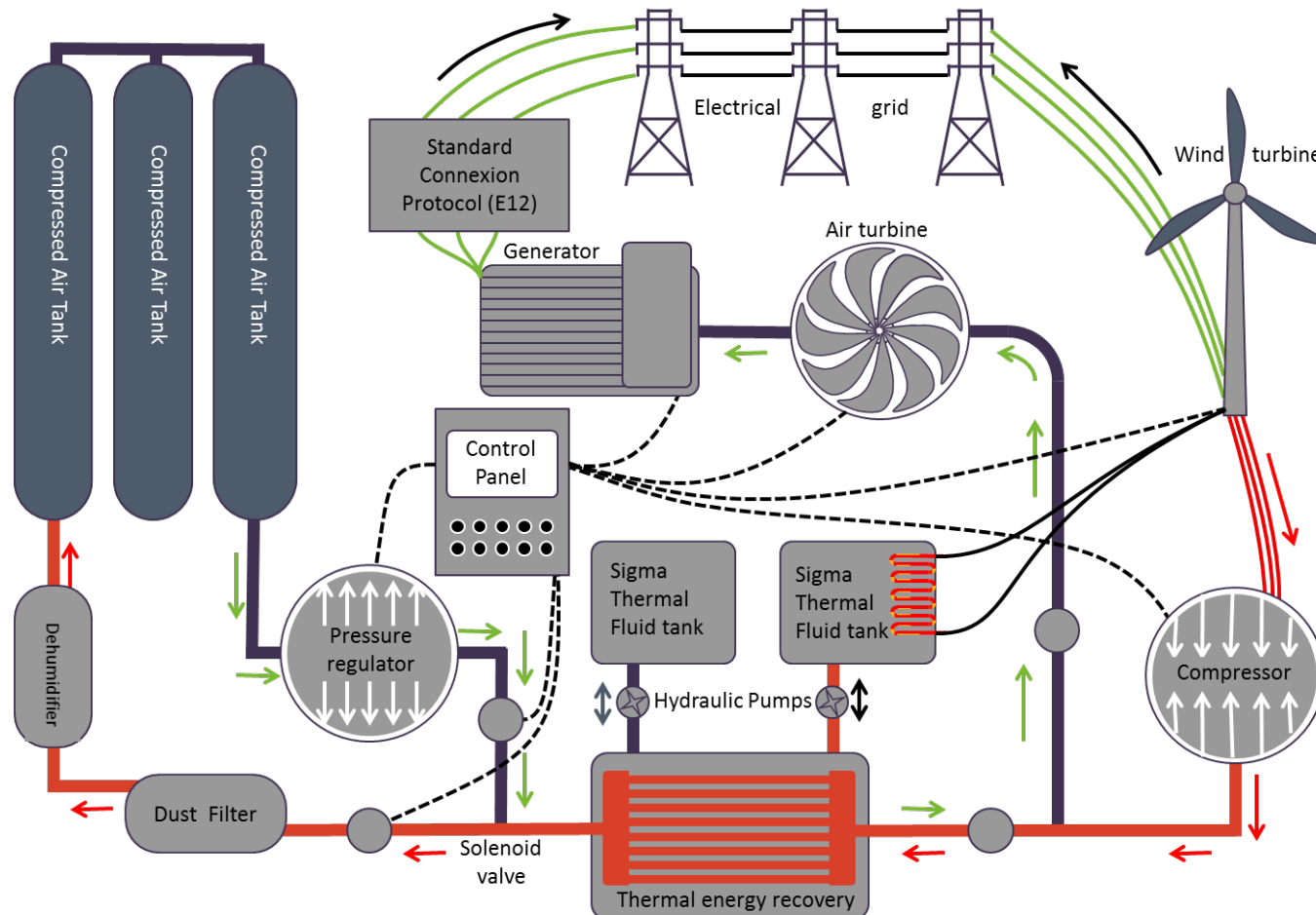
- **Sigma Stockage d'Énergie, Montréal, Québec**

- Plusieurs prix, soutiens et nominations au Québec et au Canada
- 2015 : achèvement du prototype HT-CAES Alpha (HT pour hors terre)
- Une technologie de CAES adiabatique de surface avec stockage de l'air comprimé dans une cuve et stockage de la chaleur avec un fluide caloporteur
- Utilisation d'une turbine multi-étages calibrable en puissance
- Pour des micro-réseaux. Développé pour des contextes de climats rigoureux tel que ceux des régions arctiques du Canada
- Grande flexibilité d'adaptation selon les installations et les besoins du client
- Pas de nouvelles depuis...

Plus d'info : <https://sigmaenergystorage.com/>

Perspectives et projets de centrales

- Sigma Stockage d'Énergie



Une approche conteneur
<https://sigmaenergystorage.com/>

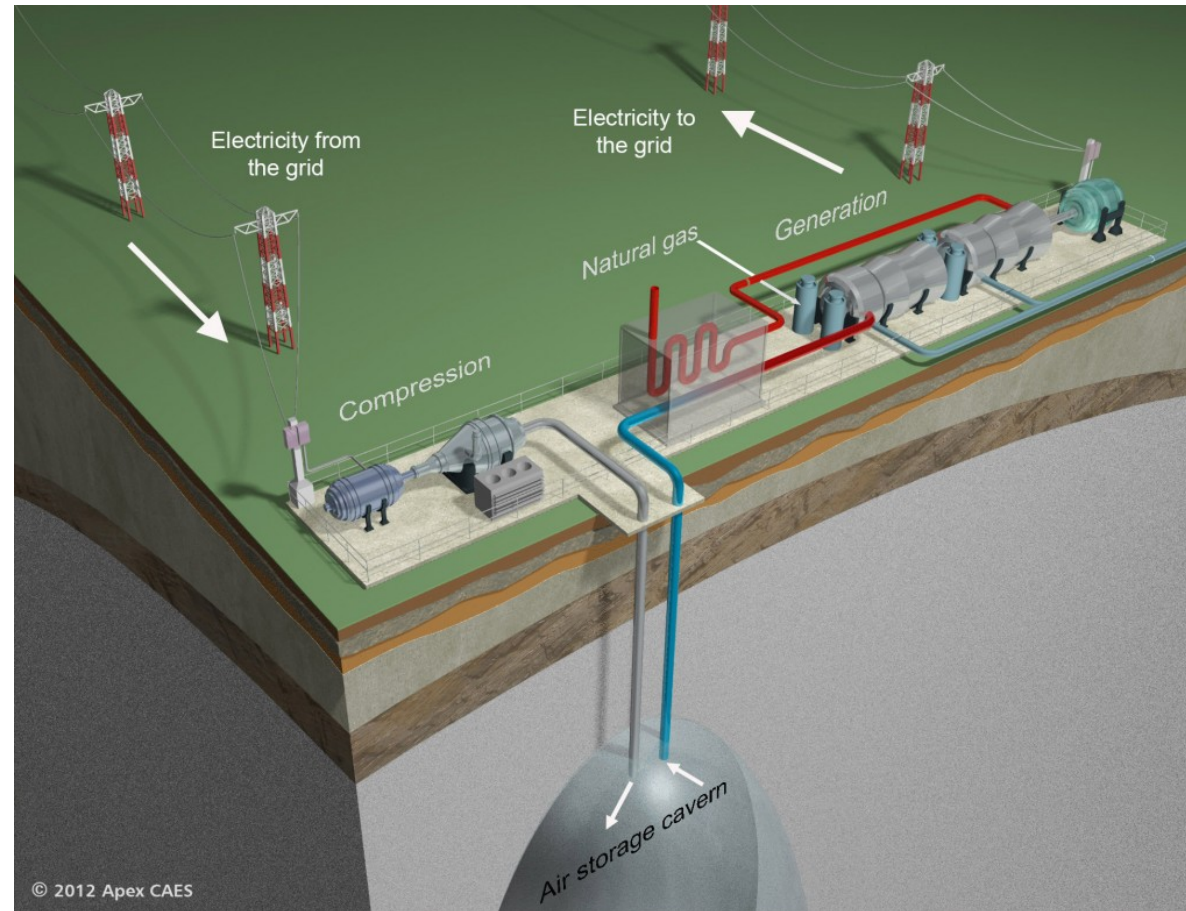
Perspectives et projets de centrales

- **Apex Compressed Air Energy Storage LLC, Texas, États-Unis**
 - *Bethel Energy Center project*, Tennessee Colony, Anderson County, Texas
 - 324 MW / 16 000 MWh, CAES 2G, configuration similaire à la centrale de Mac Intosh
 - Prévission du début des opérations pour le printemps 2022, second report depuis la première annonce en 2016
 - Dans un contexte de plus de 40% de la production électrique texane assurée par des parcs éoliens d'ici 2021
 - Technologie des équipements : Siemens AG

Plus d'infos : <http://www.apexcaes.com>

Perspectives et projets de centrales

- Apex Compressed Air Energy Storage LLC, Texas, États-Unis



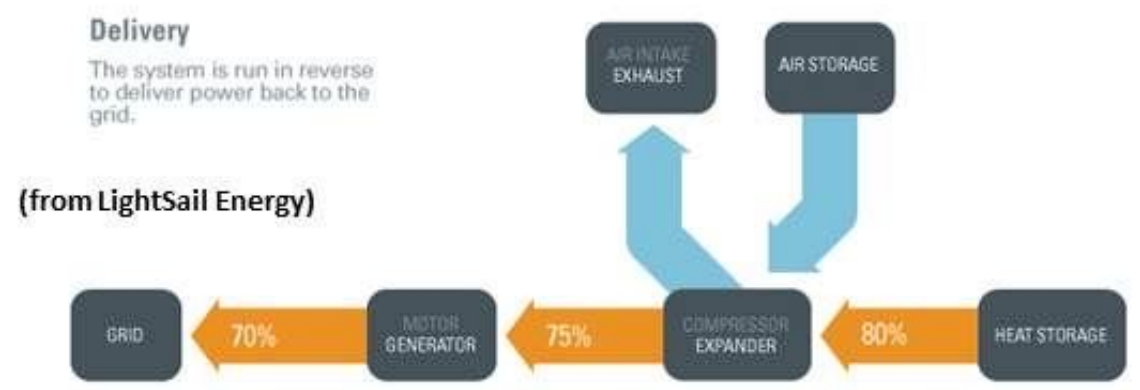
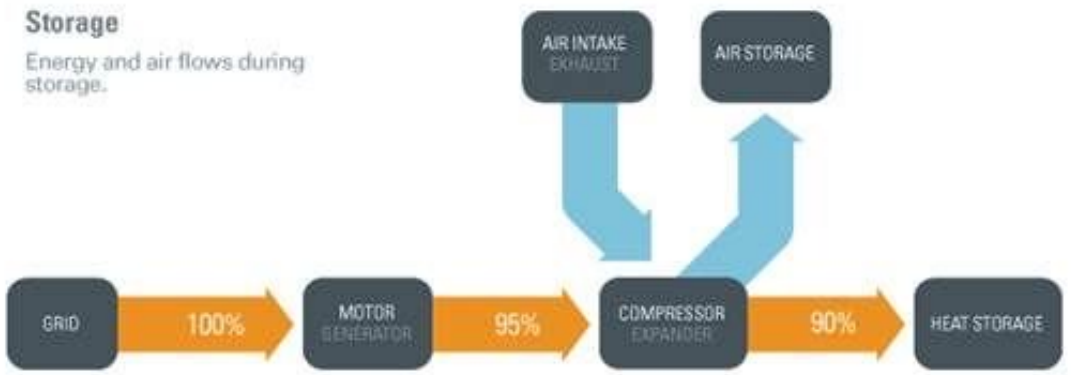
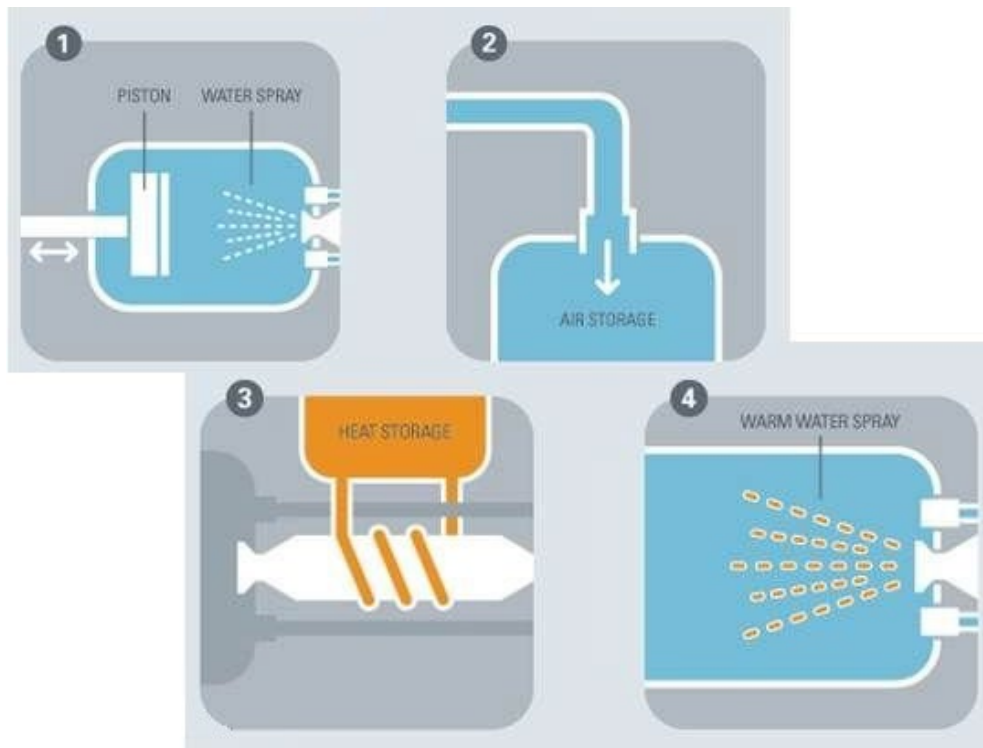
Perspectives et projets de centrales

- **LightSail Energy et le Projet *Liverpool Wind Energy Storage***
 - LightSail Energy : fondé en 2008 à Berkeley, Californie par Danielle Fong, des investissements (plus de 70M USD au total) de plusieurs milliardaires philanthropes dont Bill Gates;
 - Le fond d'innovation Innovacorp de Nouvelle-Écosse a investi 2 millions USD dans cette compagnie en échange d'un projet de démonstration de la technologie en climat nordique;
 - Le projet *Liverpool Wind Energy Storage* fut initié en 2014 par l'entreprise Watts Wind Energy Inc. : couplage avec deux éoliennes Enercon E92 de 3,6 MW, Brooklyn, Nouvelle-Écosse : technologie de stockage LightSail : 500 kW / 4 MWh
 - Prévues pour le printemps 2017 mais projet avorté après la disparition de l'entreprise LightSail en 2018 avant la phase de commercialisation pour manque de fonds (gestion financière extravagante entre autre...)

Plus d'infos sur le projet : <https://wattswind.com/portfolio/liverpool/>

Perspectives et projets de centrales

- La technologie de LightSail Energy
 - Stockage en surface dans des cuves à 200 bar
 - Récupération de la chaleur avec un système de pulvérisation d'eau



Perspectives et projets de centrales

- **Pacific Gas and Electric Company (PG&E), Californie, États-Unis**
 - Objectif : concevoir et valider un design novateur de AA-CAES par une usine pilote
 - Pour le stockage de l'énergie produite par les éoliennes - 300 MW sur 10h
 - 3 phases du projet : début en 2009
 - 1. Sélection du site, design préliminaire, test du réservoir - 2011 à 2016
 - 2015/16 : Request For Offers for building/owning/operating the facility
 - 2. Obtention des autorisations pour procéder à la construction de la centrale
 - 3. Opérations et monitoring - 2 ans
 - Investissement de 356 M USD dont 25 M USD par le US Department of Energy (DOE) : financement de la phase 1, les phases 2 et 3 devaient être financées par le vainqueur de l'appel d'offres
 - Les conclusions de l'appel d'offres arrivent en 2018 : le site idéal est un ancien réservoir de gaz naturel de King Island, comté de San Joaquin, CA. La faisabilité technique est démontrée mais la meilleure offre n'est pas viable économiquement face à d'autres technologies de stockage. Pas de nouvelles depuis. Projet surement abandonné.

Perspectives et projets de centrales

- **SustainX, West Lebanon/Hanover, New Hampshire, États-Unis**
 - Fondée en 2007, levée de fond de 30 M USD dont 5,4 par le US DOE
 - Démonstration pour fin 2012 d'un CAES isotherme (4G) de 1,6 MW / 1 MWh avec stockage en surface pour couplage avec des EnR. Conception d'un système pour un déploiement commercial. Un prototype de 40 kW en laboratoire déjà conçu
 - Abandon des projets et fusion de son activité avec General Compression en 2015
- **General Compression, Boston, États-Unis**
 - Fondée en 2006, technologie de CAES fonctionnant proche de l'isotherme
 - Financement : 750 000 USD du DOE et 77 M USD de privés
 - *Texas Dispatchable Wind Project* : Gaines, Texas - construction en 2011 et mise en service en 2012/2014, couplage avec un parc éolien - 2 MW / 300 MWh, cavité saline, 16h de stockage
 - Pas de nouvelles, ni du projet, ni de la compagnie même si elle semble toujours exister

Perspectives et projets de centrales

- **Quelques entreprises à surveiller ailleurs dans le monde**
 - Enairys Powertech SA, Suisse
 - ALACAES, Suisse
 - RICA 2020, Autriche

Perspectives et projets de centrales

- **Enairys Powertech SA, Lausanne, Suisse**

- Fondateur : Sylvain Lemofouet, il a développé un concept de "Batterie Oléo-Pneumatique" ou BOP lors d'une thèse à l'EPFL, de l'Université de Lausanne
- En 2012, un prototype de 10 kW a été intégré à un projet pilote à la centrale solaire de Mont-Soleil
- Rendement de 70% selon l'entreprise : s'approche de celui des batteries au plomb
- Commercialise un système de stockage hydropneumatique dénommé HyPES
- HyPES se compose de trois parties : une unité de stockage constituée de réservoirs d'air, dont le volume définit la capacité ; une unité de conditionnement d'eau avec un réservoir et un échangeur de chaleur, et enfin, le cœur innovant de la machine : une unité de gestion d'énergie qui utilise l'eau pour convertir l'électricité en air comprimé (et inversement), et qui repose sur l'automation et les convertisseurs de puissance Sinamics S120 de Siemens ainsi que sur un moteur électrique Simotics 1PH8. Entièrement modulable et recyclable, l'appareil est aussi économiquement rentable. Sa durée de vie est de 20 à 30 ans (contre quatre à dix ans pour ses concurrentes au lithium ou au plomb). Un tel système d'un mètre cube alimente une maison pendant 2 jours.

Perspectives et projets de centrales

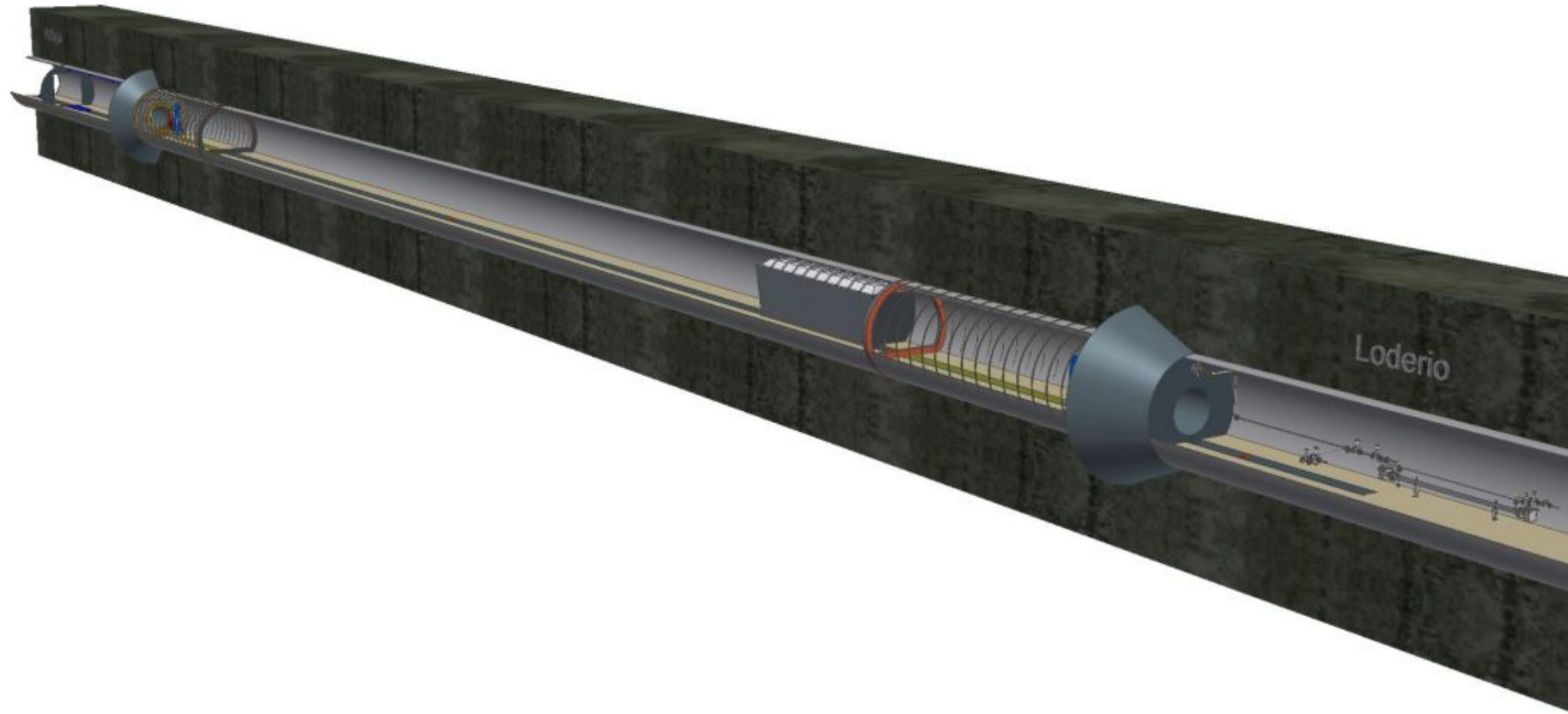
- **ALACAES and the Loderio concept, Suisse**

- AA-CAES, 72% annoncé, pour des cavités minées (ancien tunnel) - 100 bars max
- 2016 : projet pilote financé à 40% par la Swiss Federal Office of Energy, le premier AA-CAES en fonctionnement au monde
- Dans les Alpes, proche de Biasca, conversion d'un tunnel de transport du projet AlpTransit : 120 m pour un diameter de 5 m -> 1 MWh
- Le système de stockage de la chaleur est situé directement dans la chambre de stockage de l'air : jusqu'à 550°C
- 3,5 M €
- Un CAPEX annoncé très compétitif
- Pas d'activités de recherche et de nouvelles depuis la fin du projet

Plus d'infos : <https://alacaes.com>

Perspectives et projets de centrales

- ALACAES and the Loderio concept, Suisse

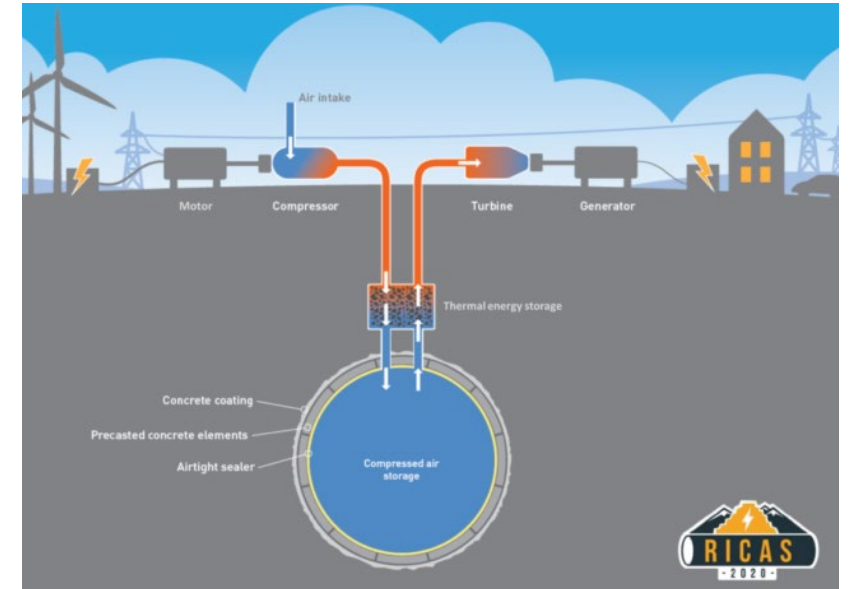


Perspectives et projets de centrales

- **Quelques projets récents ou en cours dans le monde**
 - RICA 2020, UE (en cours)
 - Search, France (en cours)
 - ADELE, Allemagne (arrêté)
 - Gaelectric, Irlande (arrêté)
 - Storelectric, fondée en 2017, UK (arrêté)
 - New York State Electric & Gas (NYSEG), USA (arrêté)
 - Projet Iowa Stored Energy Park, USA (arrêté)
 - Hokkaido, Japon (arrêté)

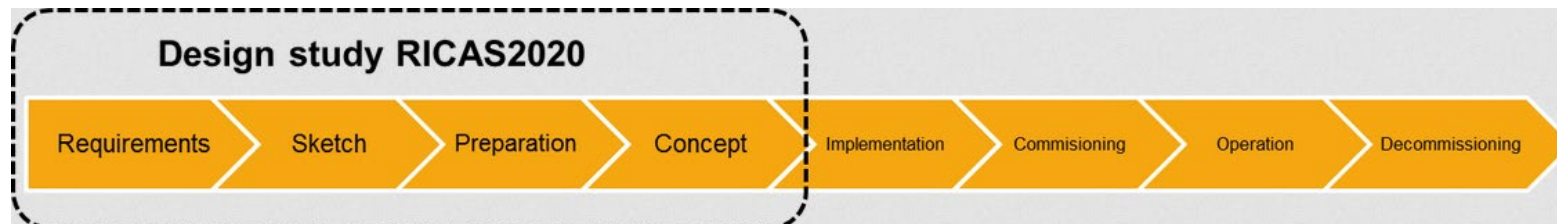
Perspectives et projets de centrales

- **Projet RICAS2020 de l'UE, Autriche**
 - For the European Underground Research Infrastructure related to AA-CAES, financement de l'UE, consortium d'Universités et d'entreprises privées
 - Objectif : concevoir une infrastructure de recherche
 - 5 MW, conception indépendante des conditions géologiques de l'emplacement, stockage thermique dans des céramiques



Plus d'infos :

<http://www.ricas2020.eu/>
<http://www.ricas2020.eu/media/ricas2020-project-video/>



Perspectives et projets de centrales

- **Projet SEARCH, France**

- Objectif : Créer un système de AA-CAES fonctionnant sans apport d'énergie extérieur et optimiser le rendement électrique de l'installation;
- Un projet cofinancé par l'ANR qui réunissait les industriels GDF SUEZ et Saint-Gobain, les partenaires académiques MINES ParisTech/Armines et le CEA Tech;
- Sur la période 2009-2013 pour un budget de 4,8 M €;
- Une maquette a été construite sur le site du CEA LITEN de Grenoble;
- Contributions du projet :
 - Rechercher un optimum technico-économique : le mieux est un cylindre orienté à la vertical avec la partie chaude en haut ;
 - Rechercher un optimum pour le creusement des cavités - type LRC (Line Rock Cavern) ;
 - Stockage de la chaleur : utilisation céramiques enterrées, déterminer la structure des parois (compromis entre isolation, résistance mécanique et durabilité).

Plus d'infos : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-gdf-suez>
<http://www.mines-paristech.fr/Presse/Communiqués-de-presse/Stocker-l-electricite-a-grande-echelle...-MINES-ParisTech-presente-une-nouvelle-video-le-Projet-SEARCH/92>

Perspectives et projets de centrales

- **Projet ADELE, Allemagne**

- Visait à mettre en place un premier démonstrateur de CAES adiabatique en 2016 à Staßfurt;
- Un consortium mené par RWE et GE : Investissement de 90 M €;
- Utilisation d'une cavité saline servant antérieurement à du stockage de gaz naturel;
- Le projet devait être en deux phases (étude de faisabilité et aspects d'ingénierie) de 2009 à 2016;
- Suspension en 2014 car estimé non rentable économiquement pour le site retenu;

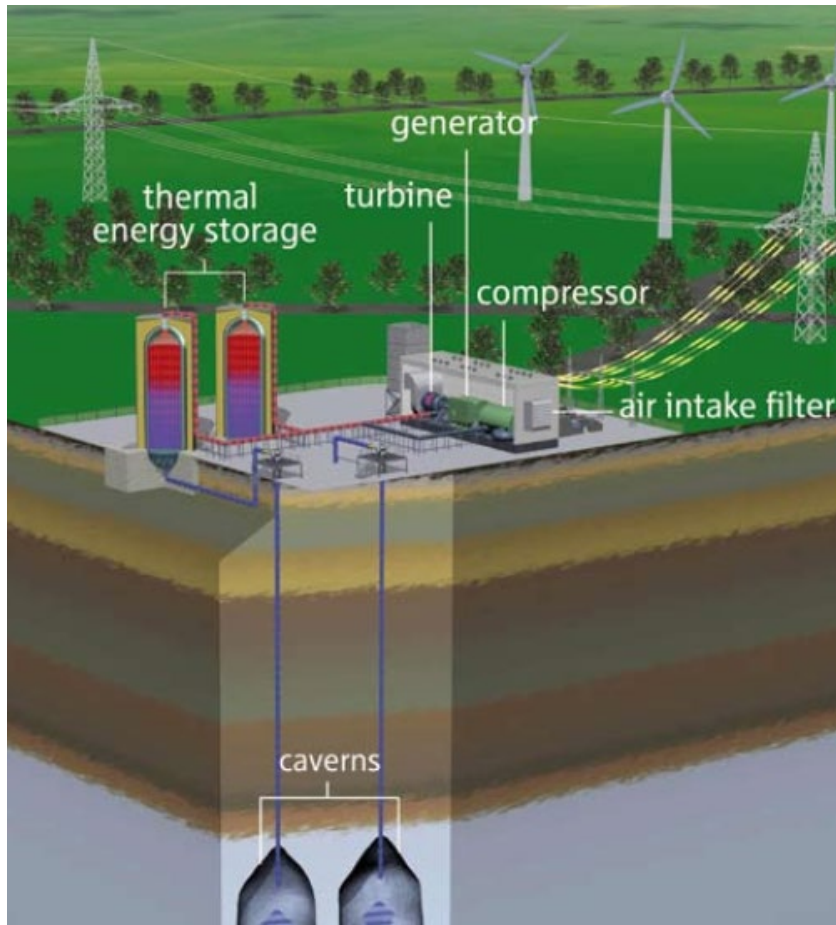
Plus d'infos : <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/235554/1/rwe-power-ag/press/company/Brochure-ADELE.pdf>

<http://www.sccer-hae.ch/resources/SymposiumMay2015/Talks/SCCER2015-AdiabaticCAES-Zunft.pdf>

<https://www.welt.de/wissenschaft/article132414967/Wie-man-Energie-aus-Luft-gewinnt.html>

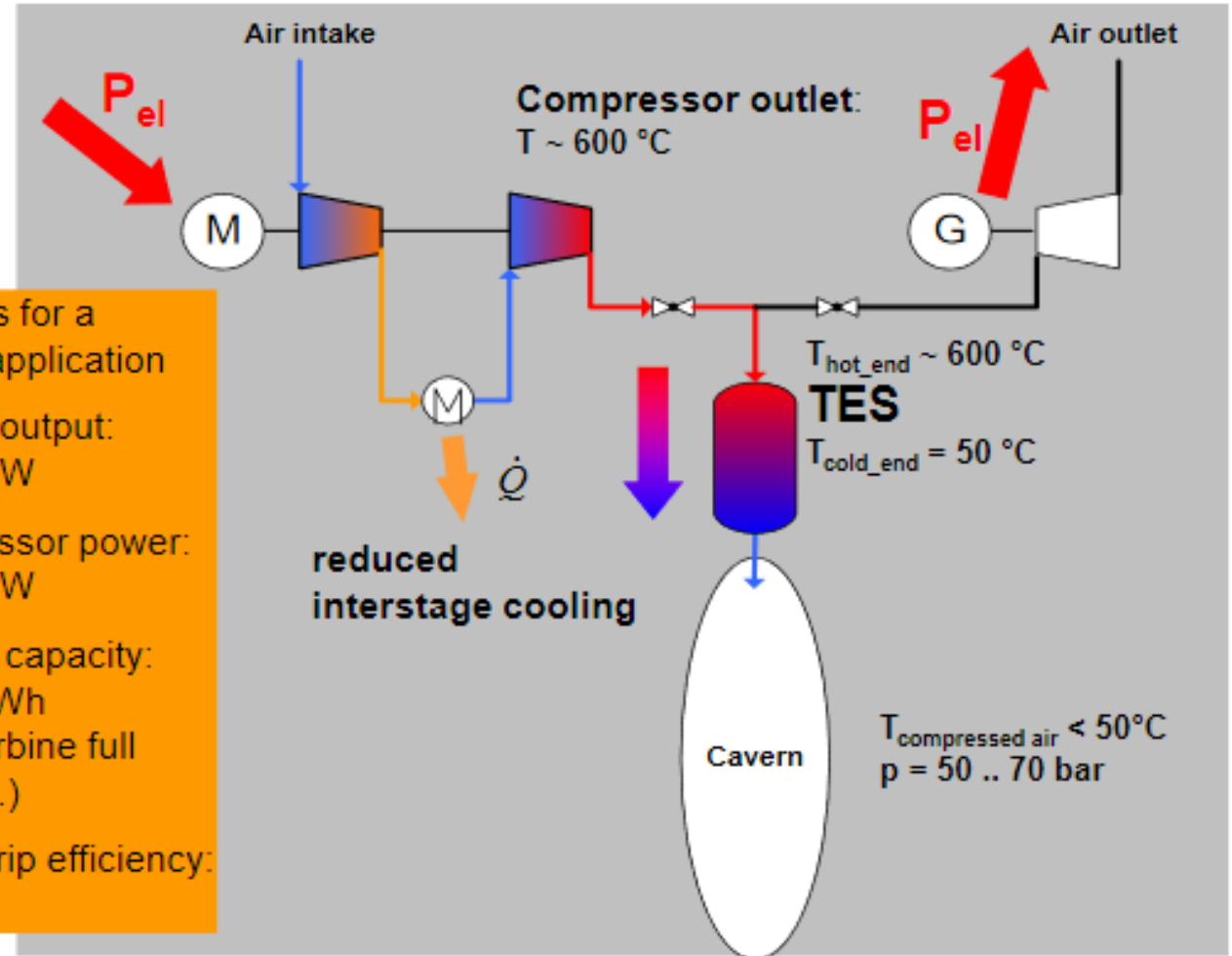
Perspectives et projets de centrales

- **Projet ADELE, Allemagne**



Target figures for a commercial application

- Turbine output: ~ 260 MW
- Compressor power: ~ 200 MW
- Storage capacity: ~ 1-2 GWh (~4-8 turbine full load hrs.)
- Round trip efficiency: ~ 70%



Perspectives et projets de centrales

- **Gaelectric and the Larne project, Irlande**

- Projet de CAES souterrain pour 2017 - 330 MW d'énergie pendant 6 à 8 heures;
- L'Union Européenne avait investi 90 M € dans ce projet et l'avait désigné comme un PCI (Projects of Common Interest);
- Selon des sources, leurs CAES étaient novateurs par rapport à leurs prédécesseurs, mais Gaelectric n'en a pas en dévoilé davantage;
- La compagnie fut **mise en liquidation** en 2018 et en 2019 le projet fut abandonné, faute de repreneur.

- **Storelectric Ltd**

- 2017 : deux projets approuvés par l'UE et désignés PCI mais **pas de nouvelles** depuis
 - Cheshire (40 MW / 800 MWh), UK;
 - Middlewich (CARES project), UK.

Plus d'infos : <https://www.storelectric.com/>

Perspectives et projets de centrales

- **New York State Electric & Gas (NYSEG), New York, États-Unis**
 - CAES 2G dans une cavité saline (4,5 Mm³) à 760 m de profondeur - 100 bars;
 - 150 MW / décharge en 16h;
 - Investissement de 3 M USD;
 - **Arrêt du projet** en 2013 avant la phase de design final.

- **Projet Iowa Stored Energy Park, Des Moines, Iowa, États-Unis**
 - CAES 2G, 270 MW;
 - Aquifère (grès) à 900 m de profondeur - 83 bars;
 - **Projet abandonné** après 10 M USD investi car l'étanchéité de l'aquifère n'était pas suffisante pour opérer dans des conditions économiques rentables.

Perspectives et projets de centrales

- **Hokkaido, Japon**

- CAES 2G, 2 MW / décharge en 4h;
- Cavité minée (roche cristalline) à 450 m de profondeur - 40 à 80 bars;
- Centrale démarrée en 2001 mais **arrêtée** après la phase de test.

- **Norton, Ohio, États-Unis**

- AA-CAES, 800 à 2 700 MW / 16h de stockage;
- Cavité minée (calcaire) à 670 m de profondeur - 55 à 110 bars;
- État du projet **inconnu**.

Perspectives et projets de centrales

- **Autres acteurs**

- Ridge Energy Storage and Grid Services LP : études et développement de projets (mais aucune réalisation connue)

- <http://www.ridgeenergystorage.com/>

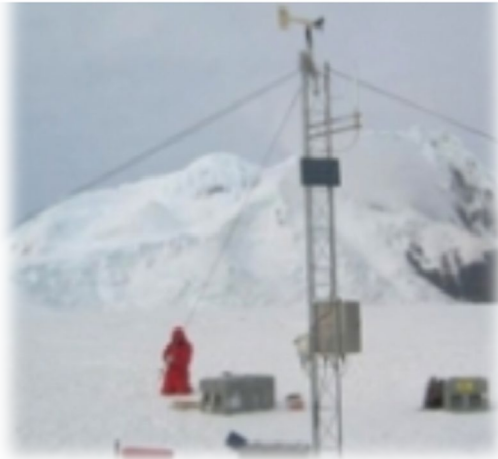
- Siemens AG : équipementier (compresseurs, turbines, ...) pour des technologies de CAES (mais aucune réalisation connue)

- <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/renewable-energy/energy-storage-solutions/caes.html>

Perspectives et projets de centrales

- Des applications à petites échelles en off-grid ?

Meteorological station



Telcom relay



Outfitting/Chalet



Courtesy, Dr. Hussein Ibrahim, ITMI, Sept-Iles, 2017

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Origine de l'air comprimé
- CAES, 1^{ère} et 2^{ème} génération
- CAES adiabatique ou AA-CAES, 3^{ème} génération
- CAES isotherme, 4^{ème} génération
- Stockage oléopneumatique/hydropneumatique
- Perspectives et projets de centrales
- ***Conclusion***

Conclusion

- C'est la **seule technologie de stockage industrielle** capable de rivaliser, en termes de **capacité** et de **durée** du stockage, avec les STEP;
- Les nouvelles technologies de CAES offrent des **rendement potentiellement supérieurs** aux STEP;
- A une échelle commerciale, les CAPEX et OPEX pourraient être **plus faibles** que ceux des STEP;
- Mais il existe **très peu de sites exploitables** dans le monde pour des cavités naturelles;
- Technologie encore naissante. De nombreux projets ont **échoués**. Hydrostor est une entreprise à suivre.

Conclusion


 enea CONSULTING	Capacité disponible	Gamme de puissance	Temps de réaction	Efficacité	Durée de vie	CAPEX puissance (€/kW)	CAPEX énergie (€/kWh)
STEP	1 – 100 GWh	100 MW – 1 GW	s - min	70 – 85 %	> 40 ans	500 – 1 500	70 – 150
CAES	10 MWh – 10 GWh	10 – 300 MW	min	50 % (1 ^{ère} gén.) 70 % (AA-CAES)	> 30 ans	400 – 1 200	50 – 150
Hydrogène et Pile à Combustible	10 kWh – 10 GWh	1 kW – 10 MW	s - min	25 – 35 %	5 – 10 ans	6 000	< 500
Batteries Sodium-Souffre	< 100 MWh	< 10 MW	ms	75 – 85 %	2 000 – 5 000 cycles	5 00 – 1 500	150 – 500
Batteries Lithium-Ion	< 10 MWh	< 10 MW	ms	85 – 95 %	2 000 – 10 000 cycles	1 000 – 3 000	300 – 1 200
Batteries Red-Ox Flow	< 100 MWh	< 10 MW	ms	65 – 80 %	2 000 – 12 000 cycles	500 – 2 300	100 – 400
Volants d'inertie	5 – 10 kWh	1 – 20 MW	ms	> 90 %	100 000 cycles	500 – 2 000	2 000 – 8 000
SMES	1 – 10 kWh	10 kW – 5 MW	ms	> 90 %	20 – 30 ans	300	> 10 000
Super condensateurs	1 – 5 kWh	10 kW – 5 MW	ms	90 – 95 %	500 000 cycles	100 – 500	10 000 – 20 000

Figure 6 : Comparaison de différentes technologies de stockage (liste non exhaustive). Les valeurs présentées sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatif.

Bibliographie/médiagraphie

- Une feuille résumé est disponible dans le répertoire « Documentation » du site Moodle
- Le résumé indique clairement:
 - La documentation obligatoire. Les références qu'il faut étudier pour préparer les tests formatifs et le quiz sommatif ainsi que l'examen final.
 - La documentation facultative. Pour les gens désirant pousser plus loin leur réflexion et leurs connaissances.

Bibliographie/médiagraphie

- CEA. 2012. *Le stockage stationnaire de l'énergie*. page 9
- ADEME. 2013. *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies*. page 158
- Mosseri Rémy, et Jeandel, Catherine. 2013. *L'énergie à découvert*. CNRS. page 217
- Ineris. 2016. *Stockage souterrain pour transition énergétique*
- Paul Breeze. 2018. *Power System Energy Storage Technologies*. Elsevier
- Crotogino, Fritz. 2001. *Huntorf CAES 20 years*. En
- Ibrahim et al. 2015. *Investigation of Usage of Compressed Air Energy Storage*
- Dossier sur le stockage (plus deux pages d'interviews) : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage>
- Un article de BloombergNEF : <https://about.bnef.com/blog/compressed-air-can-compete-and-thrive-in-lithium-age-qa/>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime>
- <https://www.air-techniques.fr/blog/air-comprime-pour-stockage-energie-caes/>
- <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/stockage.html>
- <https://www.air-techniques.fr/blog/lorigine-de-lair-comprime-deux-mille-ans-dhistoire/>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Huntorf
- <https://www.hydrostor.ca/>
- <https://sigmaenergystorage.com/>
- <http://www.apexcaes.com>
- <http://www.ricas2020.eu/>

Bibliographie/médiagraphie

- <https://alacaes.com>
- <http://www.mines-paristech.fr/Presse/Communiqués-de-presse/Stocker-l-electricite-a-grande-echelle...-MINES-ParisTech-presente-une-nouvelle-video-le-Projet-SEARCH/92>
- <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/235554/1/rwe-power-ag/press/company/Brochure-ADELE.pdf>
- <http://www.sccer-hae.ch/resources/SymposiumMay2015/Talks/SCCER2015-AdiabaticCAES-Zunft.pdf>
- <https://www.welt.de/wissenschaft/article132414967/Wie-man-Energie-aus-Luft-gewinnt.html>
- <https://www.powerengineeringint.com/decentralized-energy/equipment-technology/irish-energy-storage-project-wins-additional-eu-funding/>
- <https://renews.biz/54683/planning-withdrawn-for-gaelectric-storage/>
- <https://www.storelectric.com/>
- <https://wattswind.com/portfolio/liverpool/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/LightSail_Energy
- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lightsail-energy-could-make-compressed-air-grid-scale-storage-work>
- <https://www.greentechmedia.com/squared/letter-from-sand-hill-road/lightsail-energy-storage-and-the-failure-of-the-founder-narrative>
- <https://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/province-likely-to-lose-2m-in-failed-energy-storage-project-1.4584189>
- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lightsail-energy-cheap-compressed-air-storage-hibernation>

Bibliographie/médiagraphie

- https://www.sandia.gov/ess-ssl/docs/ARRA_StorDemos_4-22-11.pdf
- https://www.enerzine.com/pge-teste-le-stockage-de-lenergie-par-air-comprime/9799-2009-08?posts_usersPage=1
- <https://www.pge.com/>
- http://mydocs.epri.com/docs/publicmeetingmaterials/1104/4anzgwrtjyq/e236208_15_schainer_status_adv_caes_demo_projects_4.6.11.pdf
- Conclusion de l'appel d'offres : <https://www.osti.gov/servlets/purl/1434264>
- <https://gigaom.com/2013/09/16/startup-sustainx-brings-a-big-next-gen-air-battery-online/>
- <https://www.greentechmedia.com/articles/read/sustainx-to-merge-with-general-compression-abandon-above-ground-caes-ambiti#gs.w3ozXew>
- <https://www.energy.gov/articles/general-compression-looks-energy-storage-different-angle>
- <https://web.archive.org/web/20130523153848/http://www.generalcompression.com/index.php/tdw1>
- <https://www.crunchbase.com/organization/general-compression>
- https://www.smartgrid.gov/project/new_york_state_electric_and_gas_advanced_compressed_air_energy_storage.html
- https://www.smartgrid.gov/files/documents/OE0000196_NYSEG_FactSheet_U2pj4xZ.pdf
- <https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/120388.pdf>
- <http://www.ridgeenergystorage.com/>
- <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/renewable-energy/energy-storage-solutions/caes.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

