

Stockage des énergies

Comment améliorer le rendement des énergies non carbonées

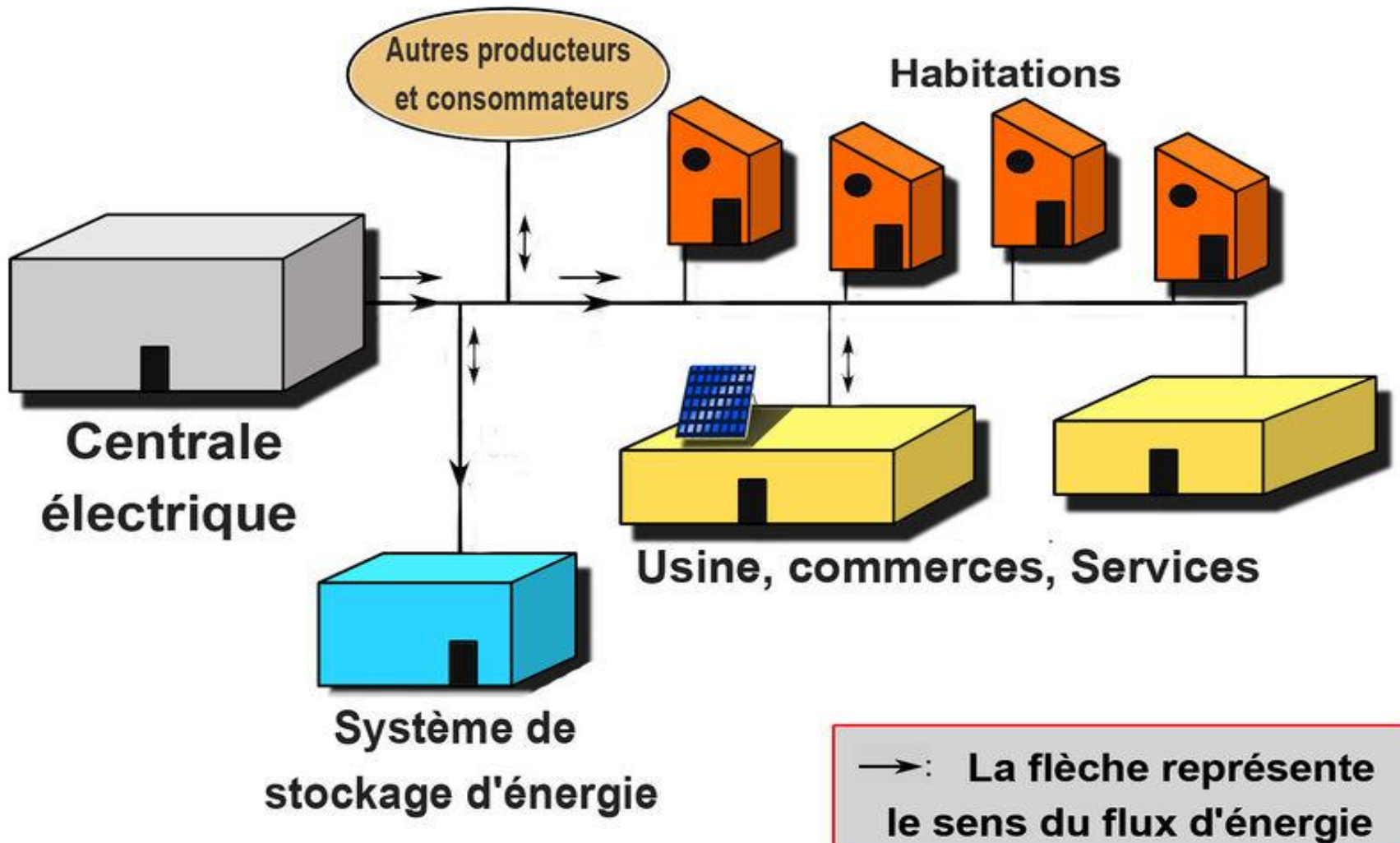
Introduction

- Enjeux et technologies pour stocker l'énergie, dont l'électricité.
- L'utilisation du stock obtenu peut se restituer.
- Pas de nouvelles sources d'énergie, mais technologies mettant en adéquation l'offre et la demande d'électricité.
- Aucune technologie miracle ne dispensera des efforts d'efficacité et de sobriété énergétique nécessaires...

Définition

- Action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.
- Par extension,
- Maîtrise du stockage
- Ici

Grid energy storage



Rendement

- L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse, le déstockage.
- À la fin d'un cycle
- Rendement d'un cycle
- Pertes d'énergie ou de matière inéluctables
- Le rendement dépend de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en œuvre.

Les grandes formes de stockage

- **Stockage de combustible**
- **Stockage électrochimique**
- **Stockage de calories**
- **Stockage mécanique**
- **Stockage** sous forme d' **énergie potentielle de pesanteur** (par remontée d'eau dans des barrages quand il y a surproduction d'électricité)
- **Stockage électrostatique** : supercondensateurs avec matériaux supraconducteurs.

Stockage d'énergie chimique : biomasse issue d'énergie rayonnante

- Deux formes, toutes deux combustibles :
 - le bois
 - l'huile
- Le stockage sous forme de biomasse est long (plusieurs mois), compliqué et cher, et d'un rendement faible (1 % de l'énergie solaire disponible).
- De plus, la biomasse comme carburant ne tire pas profit des propriétés alimentaires des molécules produites par les être vivants.
- Pour ces raisons, la biomasse est un mode de stockage accessoire et qui le restera.

Stockage d'énergie chimique : potentiel électrochimique

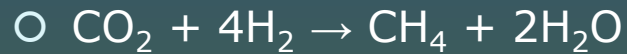
- L'électricité est une énergie secondaire et un vecteur d'énergie non stockable.
- Le stockage d'électricité n'a jamais été réalisé.
- Batterie d'accumulateurs ou de piles utiles
 - Pour les petits appareils électroménagers
 - Pour les appareils électroniques embarqués (par exemple sur un bateau).
 - Pour les applications portables électroniques
- Véhicules électriques
- Condensateurs chimiques et « SuperCap »

Batterie d'accumulateurs



Stockage par le gaz : méthane = méthanation

- Réaction de Sabatier :



- Catalyse par nickel ou mieux ruthénium sur alumine

- Température et pressions élevées

- Étape clé de l'exploration martienne

- Stocke les surplus d'énergie électrique solaire ou éolienne

Parc énergétique de Morbach (Rhénanie-Westphalie)



Stockage par le gaz : hydrogène

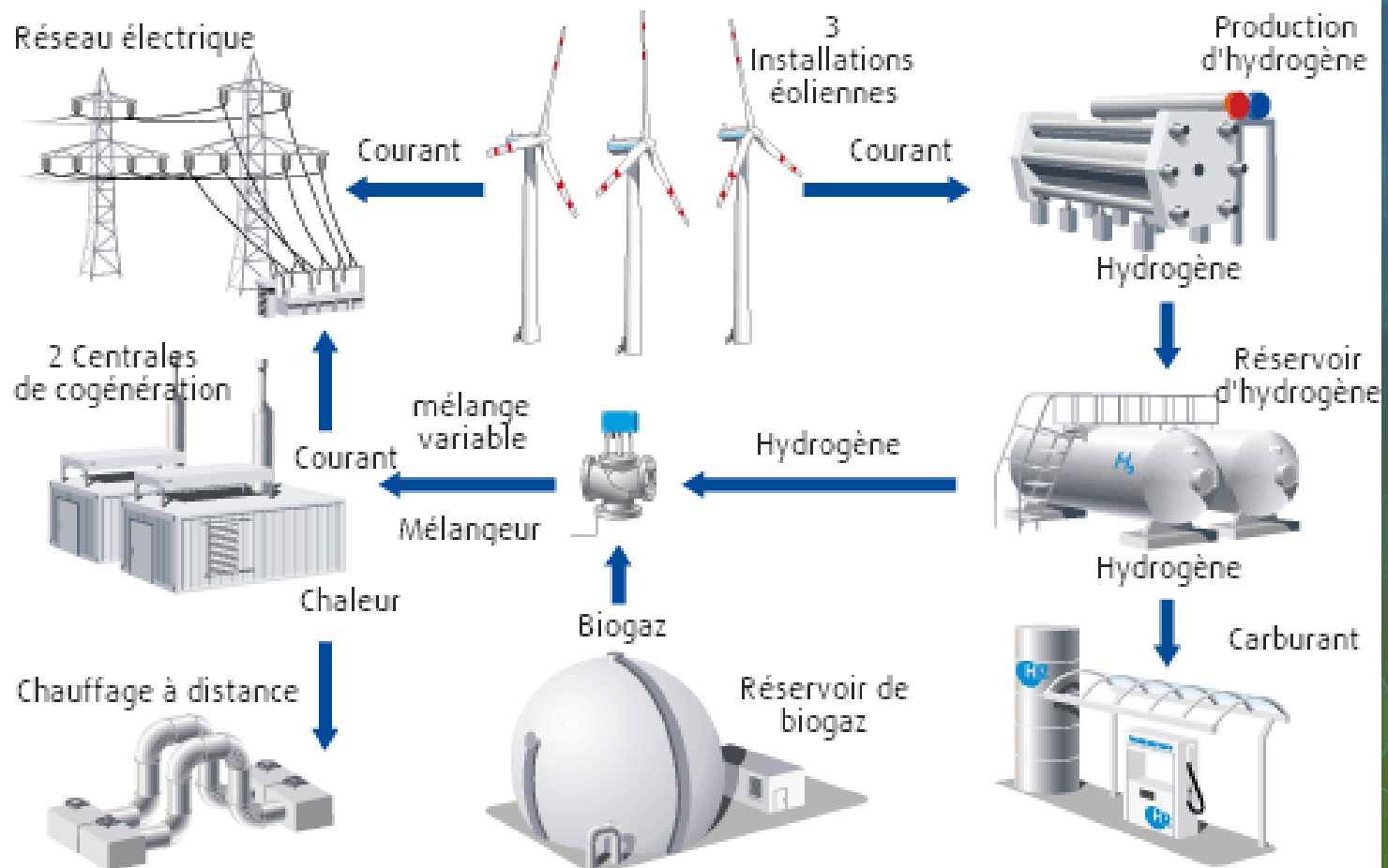
- L'hydrogène = carburant ou combustible dans une pile
- Plusieurs formes de stockage de faible rendement:
 - Hydrogène gazeux
 - Hydrogène liquide
 - Autres propositions :
 - Nanotubes de carbone, clathrates (cages d'eau)
 - Hydrures métalliques : le composé métallique agit comme une éponge à hydrogène. Les alliages LaNi₅ sont utilisés dans les batteries Ni-MH
 - Hydrures complexes (à base de bore ou d'aluminium) : 30 kg suffisent pour 4 kg d'hydrogène (norme de base pour un réservoir de véhicule)
 - Acide formique : contient 53 g/l d'hydrogène à pression et température normale, soit deux fois plus que de l'hydrogène comprimé à 350 bars ($\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$). Solution de stockage de l'hydrogène présentée par l'EPFL en Suisse.
 - Éponges macromoléculaires (fullerènes) : moyens de stockage et de libération à trouver.
 - Introduction dans le réseau public de gaz naturel jusqu'à 5%

Pile à combustible

Piscine municipale de Woking. Première expérience anglaise de pile à combustible fonctionnant en cogénération (chaleur + électricité pour l'éclairage).



Centrale hybride de Prenzlau



Grafik: Römer

Centrale de Prenzlau (Brandebourg)



Bus à moteur à hydrogène à Berlin



Châssis de la Honda Clarity



Stockage d'énergie mécanique : volant d'inertie

- Le volant d'inertie est fixe et occupe peu d'espace. En lui donnant de la vitesse, on lui fournit de l'énergie qu'il est possible de récupérer lors du ralentissement du volant.
- Ce principe est mis à profit dans :
 - les jouets dits à *friction*.
 - sur des autobus ou tramways : l'idée étant de récupérer l'énergie pendant la phase d'arrêt du bus pour la reprendre au démarrage.
 - depuis 2009 sur des voitures de Formule 1 (système SREC) et sur certaines voitures de sport pour récupérer l'énergie lors du freinage et la réutiliser lors des accélérations, permettant ainsi une économie de carburant.
- Problème = comportement gyroscopique du volant à grande vitesse

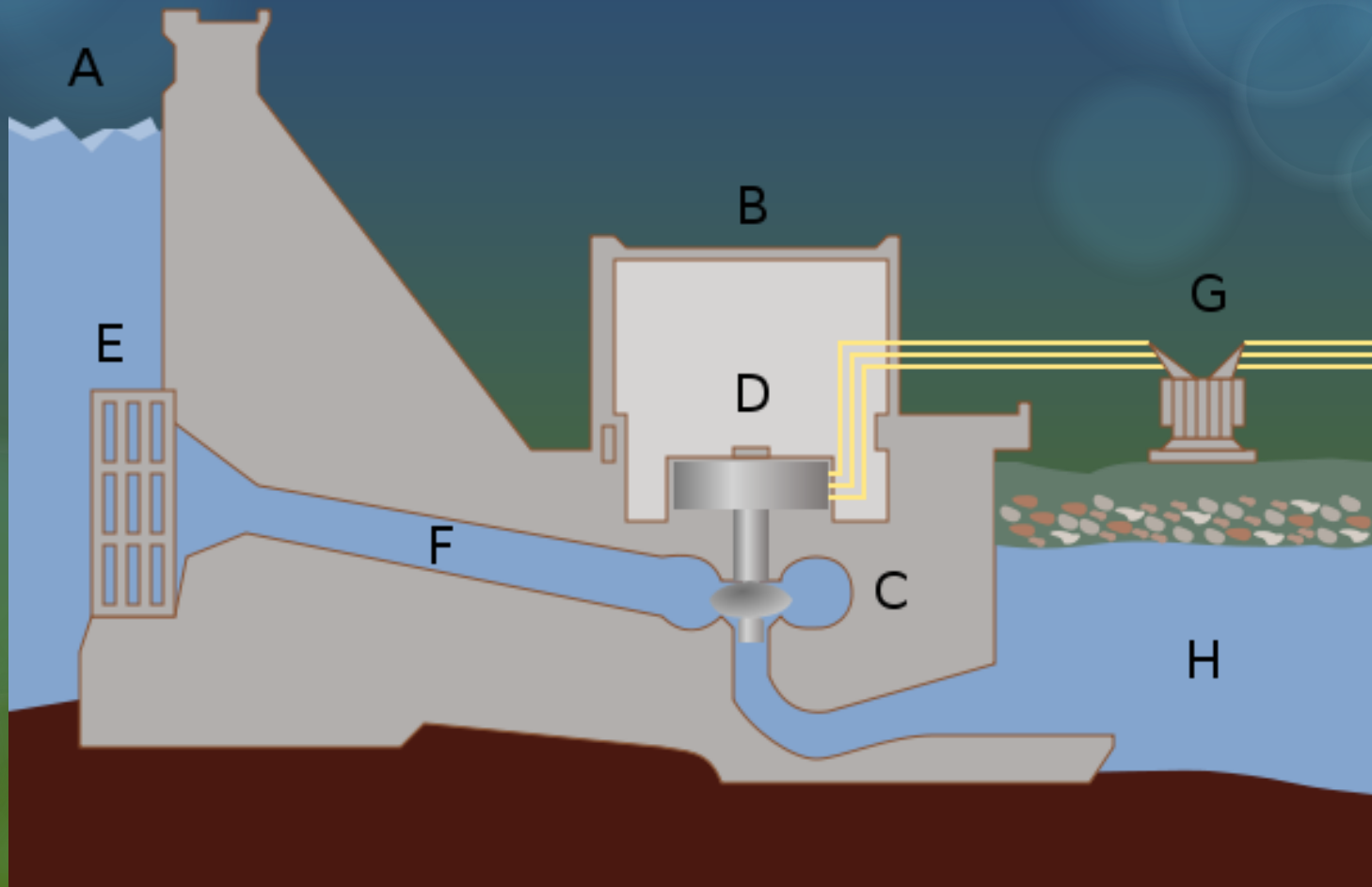
Volant d'inertie d'un véhicule de tourisme



Stockage d'énergie mécanique : énergie hydraulique (STEP)



Schéma d'un barrage hydro-électrique



Types de barrages



voûte

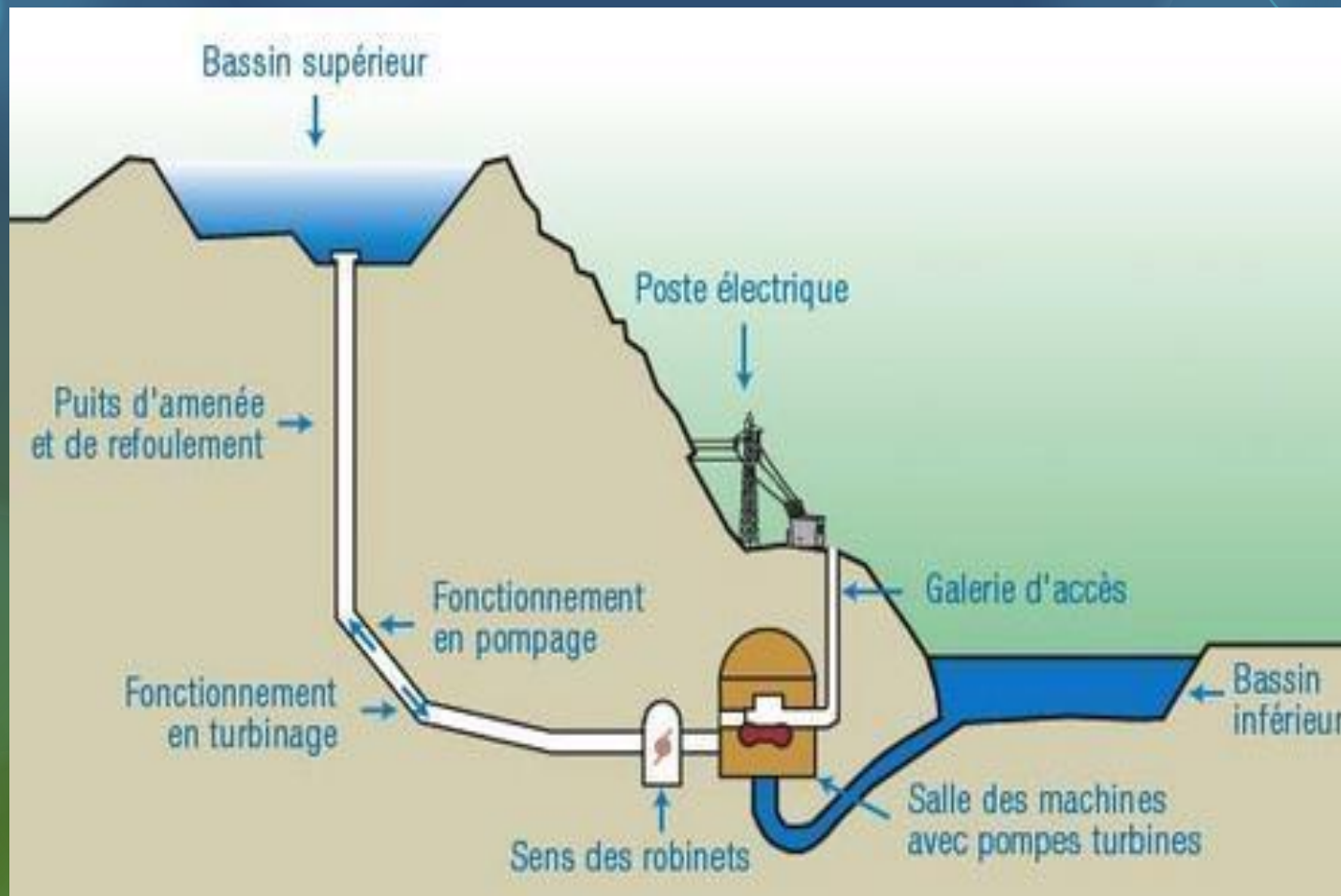


digue

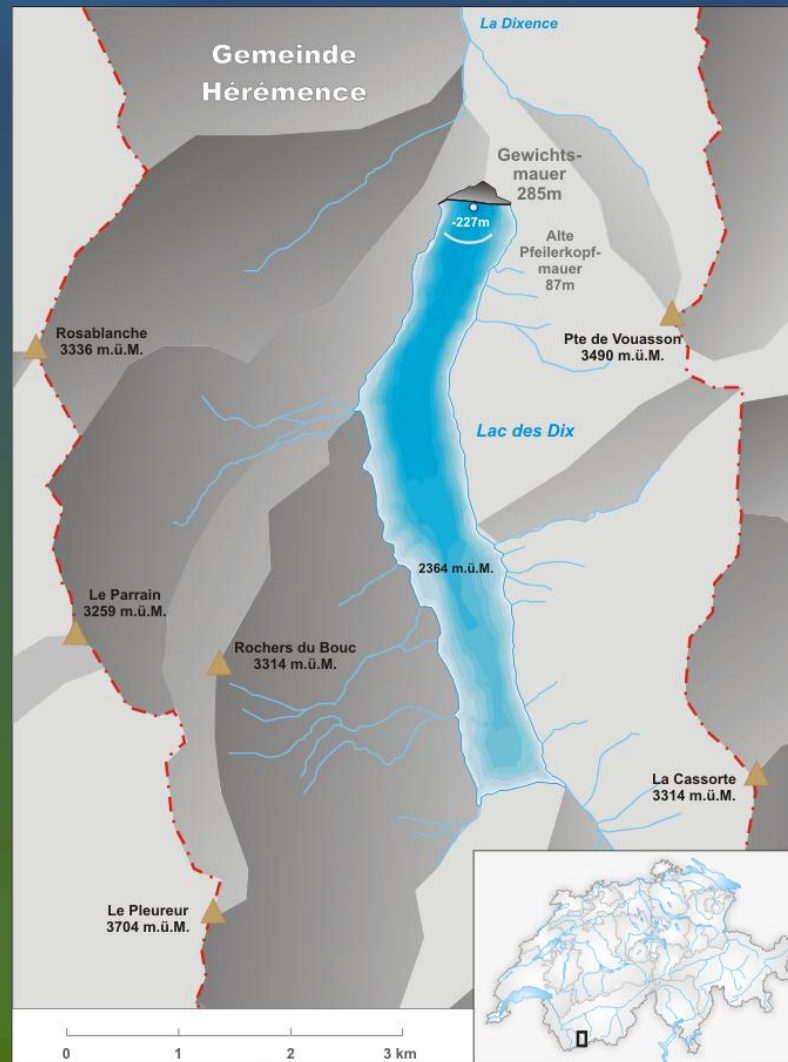


poids

Schéma d'une STEP (sans barrage)



Grande-Dixence : le site



Grande-Dixence



Grande-Dixence : carte des sites à visiter



El Hierro (l'île de Fer)

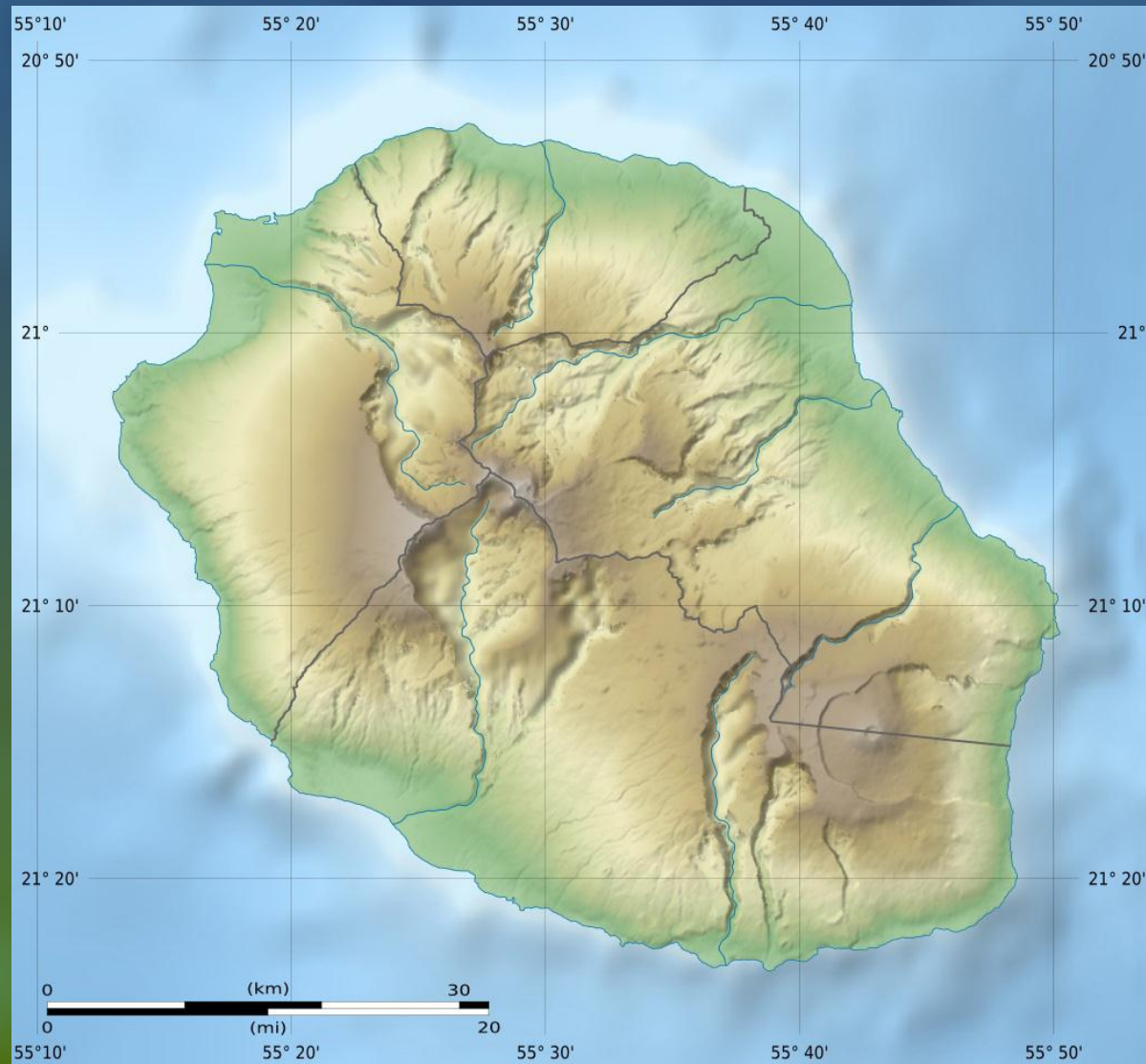
- ▶ La plus occidentale et méridionale des Canaries
- ▶ 287 km², 10500 hbts



Barrage de La Rance



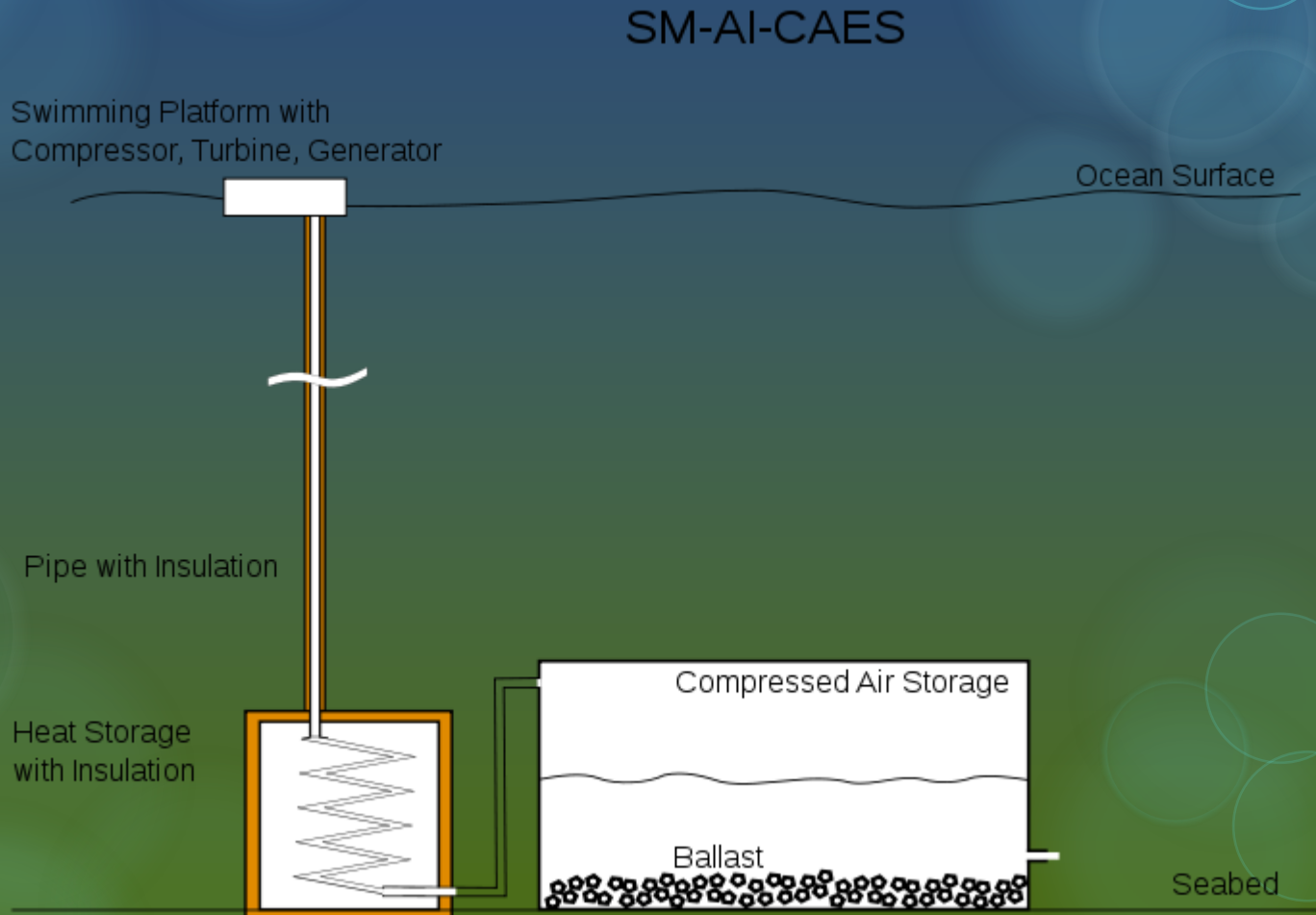
Une STEP à La Réunion? Où?



Stockage d'énergie mécanique : air comprimé

- L'air comprimé peut produire un travail mécanique, par conséquent il est possible de stocker de l'énergie en comprimant de l'air.
- Rendement médiocre, car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz.
- Utilisation de cavernes souterraines ou d'anciennes mines pour stocker l'air comprimé. Quand il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé et stocké pour mettre en mouvement une turbine qui grâce à un alternateur produit de l'électricité.
- Une variante de ce système visant à stocker l'air comprimé dans un réservoir sous-marin profond (1000 à 2000 m), est en développement au Royaume-Uni avec E.ON
- Utilisation possible avec véhicules à air comprimé.

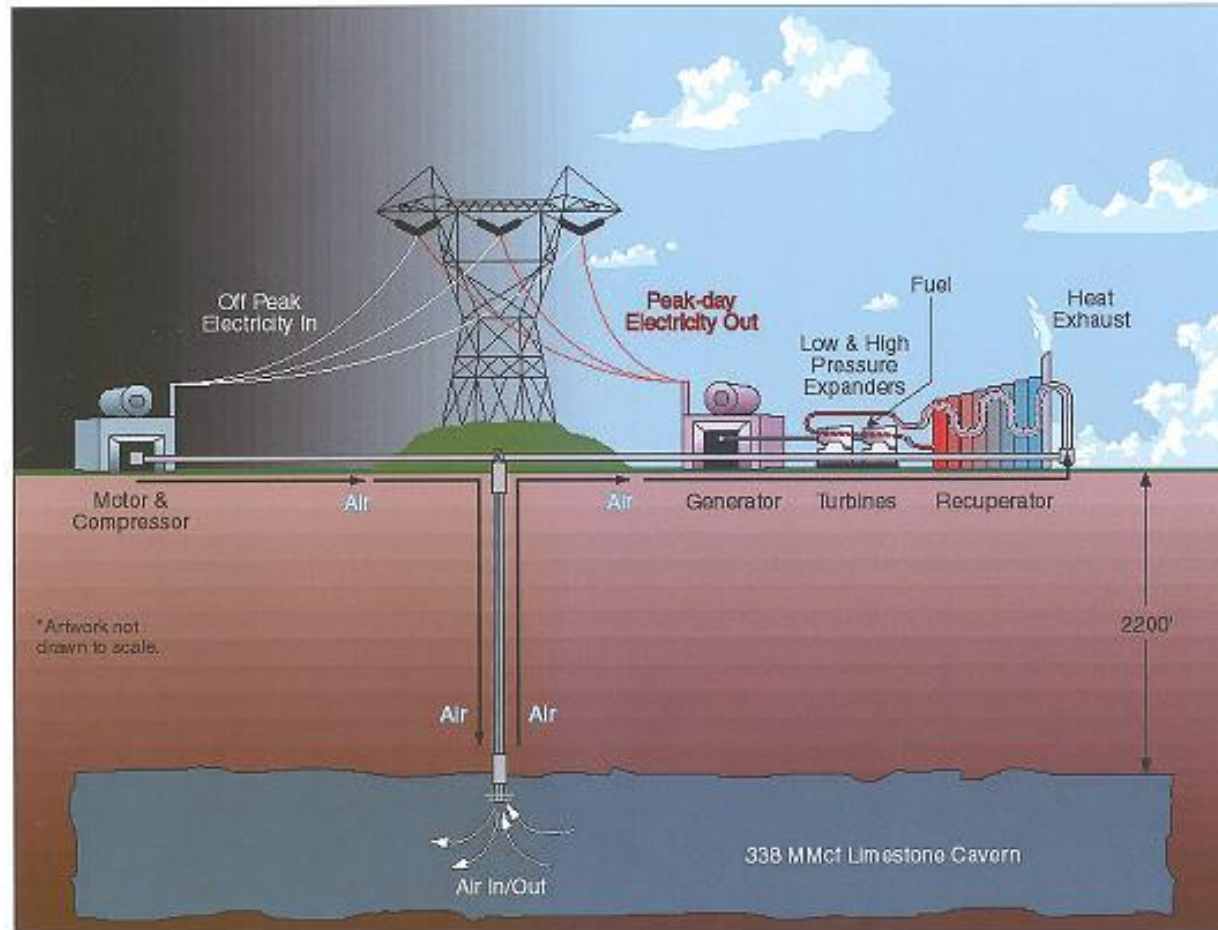
CAES sous-marin



CAES de Power South, McIntosh, Alabama

Norton Energy Storage

The CAES Cycle



Stockage d'énergie thermique : chaleur sensible

- Élévation de température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau. Limites :
 - différence de température disponible
 - déperditions thermiques du stockage
 - changement d'état que subit le matériau de stockage
- Quelques exemples :
 - Inertie thermique de certains matériaux (briques, huile)
 - Stockage par ballon d'eau chaude isolé.
 - Dans les fours réfractaires, la chaleur emmagasinée est utilisée pour la cuisson
 - Stockage d'énergie excédentaire produite par les centrales solaires le jour, afin d'être utilisée le soir et la nuit (exemple : chauffage de la ville de Krems sur le Danube).
 - Centrales solaires thermiques d'Andasol en Espagne qui peuvent stocker chacune 0,35 GWh dans des réservoirs de sels chauffés à 390 °
 - Locomotives Francq à eau surchauffée (fin XIX^e). Un réservoir d'eau de 3 m³ chauffée à 180 °C constituait la source d'énergie et permettait de tracter plusieurs wagons de tramway et leurs voyageurs sur des trajets de plus de 10 km.

Stockage thermique à Krems (Autriche)



Site d'Andasol, près de Guadix (Andalousie)



Stockage d'énergie thermique : chaleur latente

- L'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). Elle dépend de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage.
- Efficace pour des différences de températures très faibles.
- Nécessite moins de volume que le stockage par chaleur sensible.
- Ces deux stockages peuvent être utilisés pour stocker du froid.
- Quelques exemples :
 - Des matériaux à changement de phase (MCP) sont utilisés dans le solaire thermique et actuellement étudiés pour améliorer l'inertie thermique des bâtiments.
 - Les pompes à chaleur, notamment les réfrigérateurs, congélateurs et climatiseurs, utilisent des fluides changeant de phase comme caloporteurs. Ceux-ci ne stockent pas à proprement parler de chaleur, l'emmagasinant uniquement le temps du transport.

Autres formes de stockage

- Supraconductivité
- Antimatière

Facteurs à prendre en compte

- Puissance disponible en MW
- Capacité de stockage en MWh
- Réactivité
- Densité électrique lorsque la portabilité est en jeu
- Durée de vie
- Vitesse de charge (véhicules électriques)
- Efficacité kWh in and out
- Coût d'investissement
- Emprise au sol (besoin en foncier)
- Sécurité, environnement, recyclage
- Coûts d'exploitation et de maintenance
- Consommation des auxiliaires et coût d'achat de l'énergie

Financement

- Qui pour financer les unités de stockage?
 - Le gestionnaire du réseau?
 - Les consommateurs?
 - Les opérateurs de stockage qui factureront aux bénéficiaires?
- Plusieurs approches :
 - Adjonction d'unités de stockage gérées par l'exploitant. Le producteur a alors la responsabilité de la livraison, avec volumes prévisibles et garantis;
 - La stabilité incombe au gestionnaire du réseau, avec à la clé économies d'échelle, centralisation des moyens mais perte de souplesse de gestion.

Conclusion

- Enjeu primordial.
- L'indépendance énergétique :
 - Pour les états,
 - Pour les individus
 - Pour les entreprises
- Le stockage est essentiel :
 - Pour la production d'énergie
 - Reconstitution d'un stock d'énergie potentielle à partir d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat.
 - Indispensable quand l'énergie est variable dans le temps, comme c'est le cas des EnR fluctuantes (solaire, éolienne).

Les devises Shadok



IL VAUT MIEUX POMPER MÊME S'IL NE SE PASSE
RIEN QUE RISQUER QU'IL SE PASSE QUELQUE CHOSE
DE PIÈRE EN NE POMPANT PAS.