

Stockage de l'énergie électrique

Table des matières

Stockage de l'énergie électrique.....	1
1. Introduction.....	2
2. Stockage sous forme d'énergie mécanique potentielle.....	2
2.1. Stockage hydraulique.....	2
2.2. Air comprimé.....	3
3. Stockage sous forme électrochimique : les batteries.....	4
4. Stockage sous forme d'hydrogène.....	5
5. Stockage inertiel.....	6
6. Stockage à l'aide de condensateurs.....	7
7. Stockage thermique.....	7
8 Exercices.....	8
Exercice 1: batterie.....	8
Exercice 2: batterie.....	8
Exercice 3: batterie.....	8
Exercice 4: volant d'inertie.....	9
Exercice 5: STEP.....	10
Exercice 6: Comparaison des différents moyens de stockage.....	11

Le stockage de l'énergie consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour une utilisation ultérieure (par extension il s'agit aussi du stockage de la matière qui « contient » cette énergie). Stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, l'alimentation énergétique de sites insulaires ou isolés.



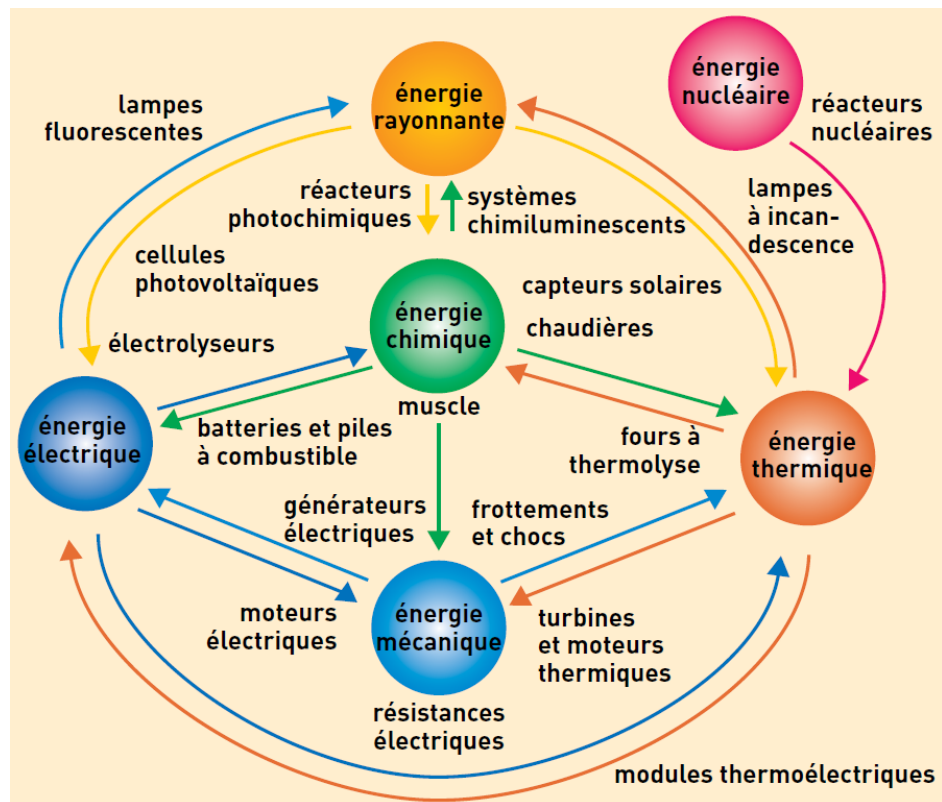
1. Introduction

Le stockage de l'électricité répond à trois grands types de besoins :

- **Ceux liés à la production nucléaire, centralisée, massive et peu adaptative.** C'est le cas de la gestion, sur le réseau de transport, de l'énergie électrique produite par les centrales actuelles, afin d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables journalière, hebdomadaire, saisonnière et, en plus, dans le futur, de la sécuriser face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente d'énergie électrique d'origine renouvelable.
- **Ceux liés à de la production autonome décentralisés et de quantité plus modeste.** L'électricité créée, en général par des sources variables (solaire, éolien) dans le cas de maisons autonomes (non raccordées au réseau) a besoin d'être stockée car souvent il y a décalage entre les heures de production et les heures de consommation.
- **Ceux liés à des applications mobiles** (téléphone portable, transports du type vélo à assistance électrique, automobile électrique ou hybride).

Les besoins n'étant pas les mêmes, il va exister différentes solutions adaptées aux différents besoins.

On notera qu'il est possible de stocker l'énergie sous forme électrique, chimique, thermique et mécanique.



2. Stockage sous forme d'énergie mécanique potentielle

2.1. Stockage hydraulique

Pour contourner la difficulté de stocker directement l'énergie électrique, il est possible de passer par une étape intermédiaire qui consiste à la convertir en une énergie mécanique potentielle que l'on donne à un fluide stockable (eau, gaz, vapeur d'eau, air comprimé, etc.), pendant une durée

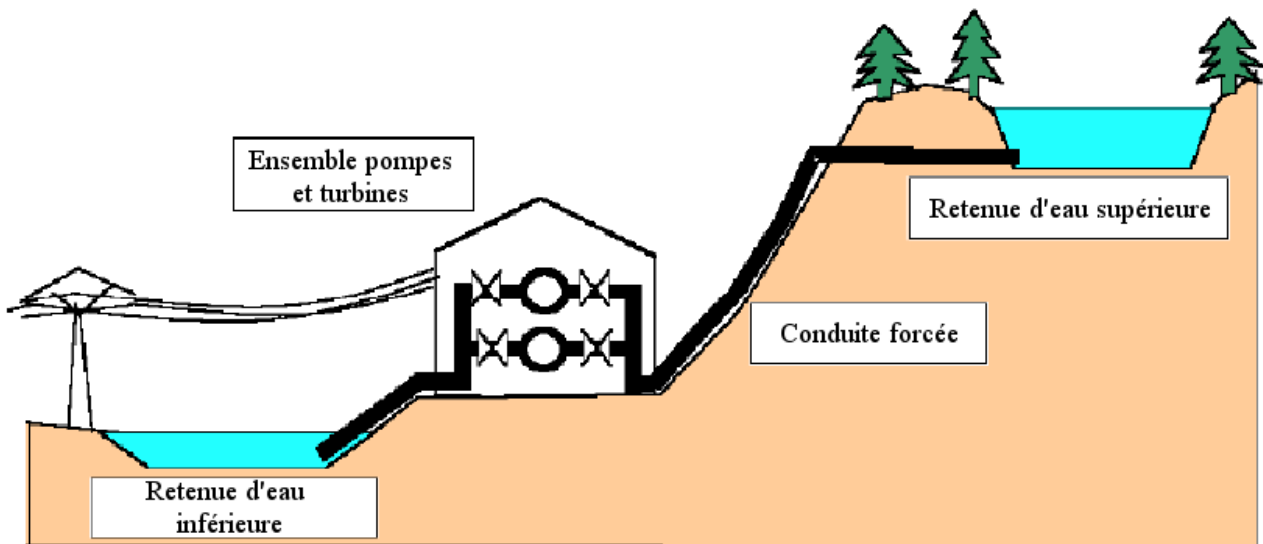
déterminée, et ensuite de reconvertir cette énergie mécanique en énergie électrique dans une turbine dédiée au fluide entraînant un alternateur.

Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est une installation de stockage hydraulique gravitaire. Elle comprend nécessairement un lac supérieur et une retenue d'eau inférieure, entre lesquels est placée l'usine hydroélectrique réversible de turbinage/pompage. L'usine est reliée au lac supérieur par des ouvrages d'adduction d'eau (conduites forcées) et vers la retenue inférieure par des canalisations.

Le principe de fonctionnement des STEP est simple : pendant les heures creuses (surproduction) on remonte l'eau par pompage pour la turbiner aux heures de pointe. Le rendement est de l'ordre de 65 à 85%.



L'énergie stockée W (en J) = $m.g.h = \rho.V.g.h$ (ρ est la masse volumique de l'eau en kg/m^3 , V le volume d'eau en m^3 , g la constante de gravitation $g= 9.81 m/s^2$ et h , en mètre, le dénivelé entre la retenue d'eau supérieure et la retenue d'eau inférieure).



Avantages des STEP : technologie éprouvée et écologique :

C'est une solution qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Le fonctionnement des STEP est éprouvé et totalement écologique. Il ne dépend d'aucun combustible, dans la limite où le pompage ne fait pas appel à de l'électricité d'origine thermique, ce qui est en principe le cas en France. La durée de stockage de l'eau dans le bassin supérieur est quelconque et la quantité peut être importante (pour le barrage de Grand maison, plus de 137 millions de m^3 d'eau). L'ensemble des matériels fait appel à une technologie classique, robuste, de très grande disponibilité.

Inconvénients des STEP : coûts d'exploitation élevés

La spécificité des sites à équiper et les investissements correspondants, leur éloignement par rapport aux grands centres de consommation, en particulier de ceux qui provoquent des pics de consommation, nécessite un transport d'énergie électrique sur d'assez grandes distances ce qui renchérit les coûts d'exploitation.

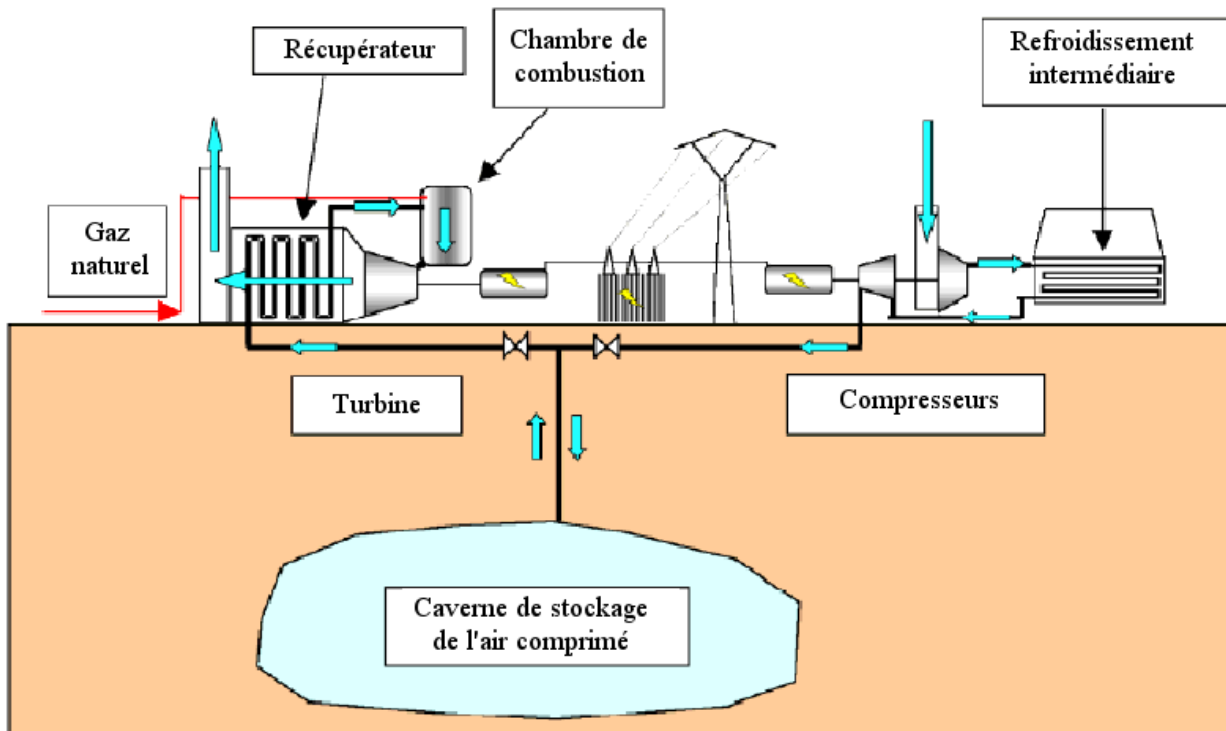
2.2. Air comprimé

On sait utiliser de l'air comprimé pour produire un travail mécanique, par conséquent il est possible de stocker de l'énergie en comprimant un gaz (en général avec un compresseur mu par de l'énergie électrique disponible). Le rendement sera médiocre, car la compression s'accompagne

d'un échauffement du gaz, sauf à récupérer la chaleur produite (cogénération air comprimé + chaleur).

A plus grande échelle, on peut utiliser des 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. Des installations de ce type ont été mises en place ou sont en projet dans différents pays mais le rendement n'est que d'environ 40 %.

Il existe une variante à gaz de CAES (Compressed Air Energy Storage), en fonctionnement depuis plus de 20 ans en Allemagne: de l'air est comprimé aux heures creuses par un turbocompresseur accouplé à la turbine à gaz, puis est stocké dans des cavités souterraines. Aux heures de pointe, l'air comprimé est co-alimenté en gaz dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz (éventuellement du type cogénération chaleur/électricité). Pour restituer 1 kWh sur le réseau, il faut consommer 0,75 kWh d'électricité en pompage, et brûler 1,22 kWh de gaz. La durée de stockage est de quelques heures.



En plus du mauvais rendement le système émet du CO₂ (combustion du gaz).

3. Stockage sous forme électrochimique : les batteries

C'est la voie la plus connue du grand public, les batteries ayant de nombreuses applications quotidiennes (véhicules, téléphones portables...). Les technologies de batteries sont multiples et possèdent des caractéristiques très variables. L'inconvénient majeur est leur faible durée de vie (Nombre de cycles charge/décharge limité ~ 100 à 1000). On peut voir la batterie comme un réservoir électricité que l'on vide (décharge) ou que l'on remplit (charge). La quantité d'électricité étant définie par l'Ampèreheure.



L'énergie stockée (capacité de la batterie) : W (en W.h) = $Q.V$, où V (en volts V) est la tension aux bornes de la batterie, Q est la quantité d'électricité stockée (en Ampère

heure A.h).

Exemple : une batterie de 2A.h est capable de fournir 2A pendant 1 heure, 4A pendant 1/2 heure, 1A pendant 2A, ... (le produit « courant*temps » reste constant et caractérise la batterie).

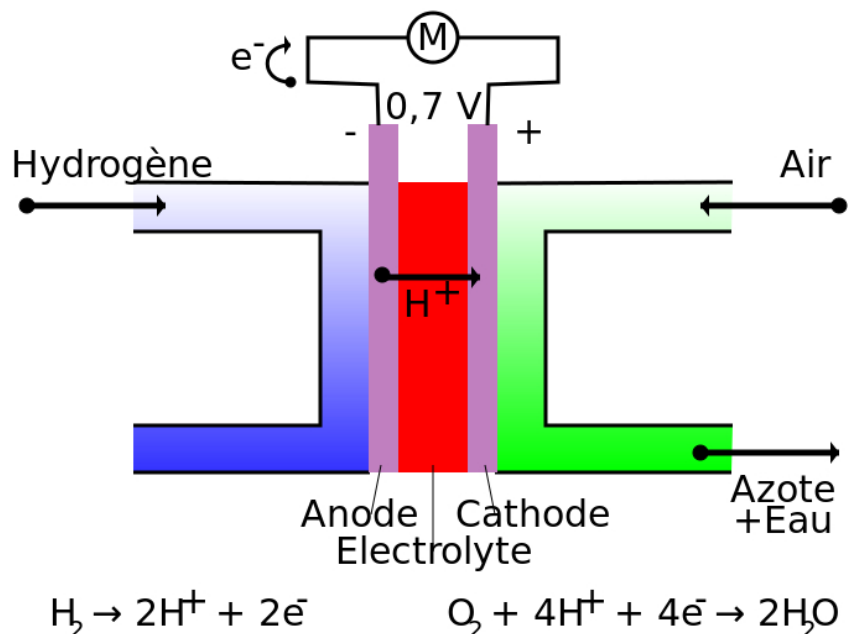
4. Stockage sous forme d'hydrogène

Dans les années 1980, une production de masse d'hydrogène avait été envisagée pour stocker de façon indirecte l'énergie électrique. L'idée consistait à profiter des heures creuses de consommation pour faire fabriquer par les centrales nucléaires de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cela présentait l'avantage d'assurer une marche sans contraintes thermiques des équipements de génération de vapeur des centrales nucléaires et à maintenir constante leur production d'électricité.

Ce projet a été rapidement abandonné pour des raisons économiques et technologiques. (à l'époque on ne savait pas reconvertir l'hydrogène en énergie électrique sans utiliser de piles à combustibles). Aujourd'hui on sait brûler l'hydrogène dans des centrales électriques spécialement équipées, et l'hydrogène stocké peut être considéré comme un stockage indirect de l'électricité.

La pile à combustible :

Le principe de la pile à combustible est l'inverse d'une électrolyse. La réaction chimique produite par l'oxydation et la rencontre de gaz produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8V, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200°C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.



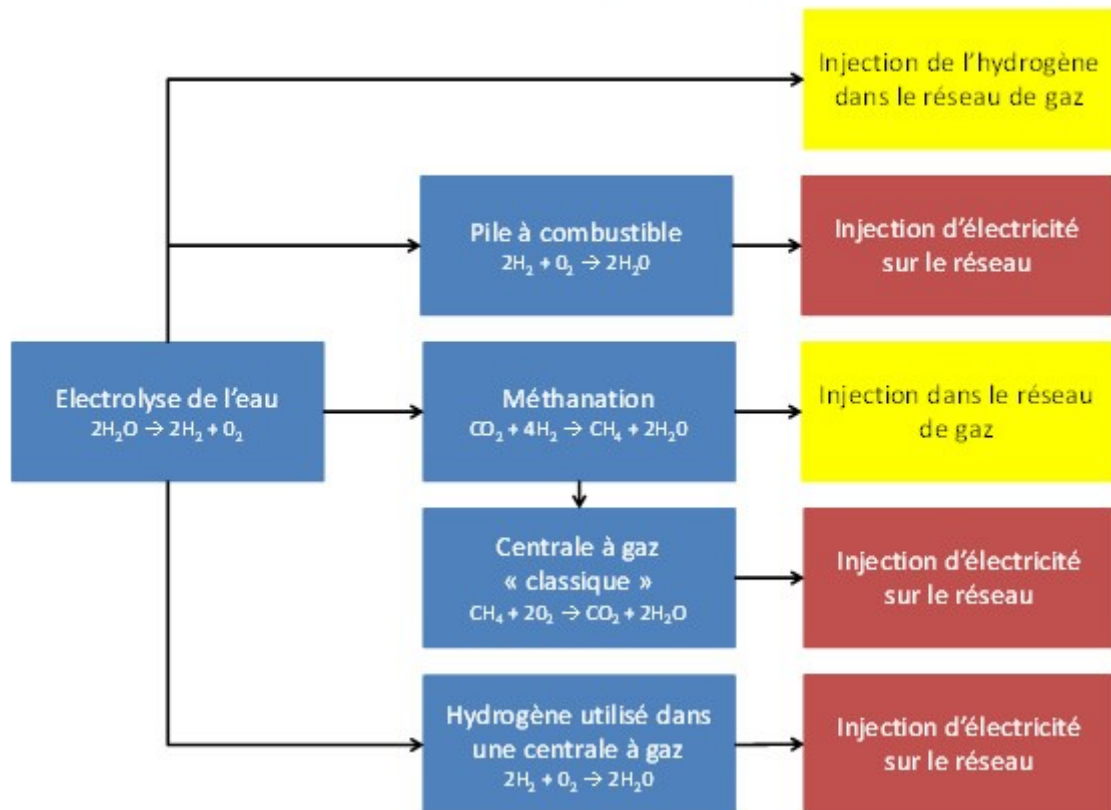
Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système.

Il existe aussi deux types de piles à combustible au méthanol :

- Les piles RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est reformé pour produire l'hydrogène qui alimentera la pile.
- Les piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est directement oxydé dans le cœur de la pile et ne nécessite pas d'être reformé.

Contrairement aux piles utilisant l'hydrogène, celles-ci ne sont pas "propres" car elles rejettent du CO₂ et même du monoxyde de carbone (CO).

Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène



L'intérêt de ce type de système réside :

- dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

5. Stockage inertiel

Un volant d'inertie moderne est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone ou en métal entraînée par un moteur électrique.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min pour le modèle ci-contre) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'énergie est alors stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique, elle pourra ensuite être restituée instantanément en utilisant le moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie.



Ce stockage se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique et, réciproquement, conversion dont les machines électriques sont naturellement le siège suivant qu'elles sont génératrices (si elles sont entraînées) ou motrices (si elles sont entraînantes).

Le rendement est de l'ordre de 80% à 95 %. Le principal avantage est sa rapidité de mise en service (utile en cas de micros coupures).



L'énergie stockée W (en J) = $\frac{1}{2} J \Omega^2$ (le volant, dont l'inertie est J en kg.m^2 , tourne à la vitesse angulaire Ω en rad.s^{-1}) avec $J = \frac{1}{2} m.r^2$ pour un cylindre en rotation (m = masse en Kg, r = rayon en mètre).

6. Stockage à l'aide de condensateurs

Le stockage par condensateurs est utilisé principalement en électronique, c'est-à-dire en basse tension et en faible énergie, dans les alimentations à tension continue (redressement).

Accessoirement, le stockage par condensateurs peut être utilisé comme source de puissance impulsionnelle. Sa limitation est la durée de vie réduite des condensateurs, qui supportent mal un trop grand nombre de cycles de charge/décharge

Les supers condensateurs de puissance :

Apparu vers 2000, le super condensateur de puissance est un composant électrotechnique dédié au stockage de puissance plutôt qu'à celui d'énergie. Il se présente sous la forme d'une cellule élémentaire (ressemblant physiquement à un condensateur électrolytique), dans laquelle le stockage est de type électrostatique et non pas électrochimique. Cela permet d'obtenir des puissances massiques élevées (de l'ordre de 10 kW/kg) et supportant de 500 000 à 1 million de cycles de charge/décharge.

Les cellules élémentaires des super condensateurs peuvent fournir ou absorber des puissances unitaires très élevées avec une constante de temps de quelques dizaines de secondes.



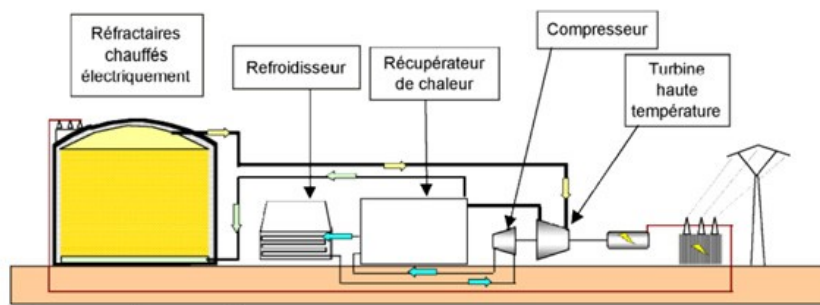
L'énergie stockée W (en J) = $\frac{1}{2} CV^2$ (C est la capacité du condensateur en Farad F et V la tension à ses bornes en V).

7. Stockage thermique

De nombreuses solutions de stockage de froid (glace, liquides cryogéniques) et de chaud (sels fondus) existent.

Par exemple on chauffe des sels fondus et quand on a besoin de récupérer l'énergie on récupère la chaleur de ces sels pour en faire de l'électricité. A l'heure actuelle leur utilisation n'est pas répandue.

Schéma d'une installation de stockage thermique



Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

8 Exercices

Exercice 1: batterie

Soit une batterie 3A.h sous 24V

1. Calculer l'énergie contenue dans la batterie pleine (en W.h et en Joules).
2. Cette batterie alimente un vélo à assistance électrique qui consomme en moyenne un courant de 0,4A. Combien de temps faut-il pour que la batterie se décharge complètement ?
3. Cette fois le vélo attaque une montée et consomme 2,7A. Combien de temps faut-il pour que la batterie se décharge complètement ?
4. La batterie est au départ complètement chargée. Ensuite on l'utilise pendant 1h30 à 1,2A. Quelle est la charge finale (quantité d'électricité) de la batterie ?

Exercice 2: batterie

1. Une batterie a fournie une quantité d'électricité de 20.000 Coulombs pendant une minute. Calculer l'intensité du courant débité par la batterie (1A = 1 Coulomb pendant 1 seconde).
2. Une batterie d'accumulateurs se décharge complètement en 2 heures lorsqu'elle débite 8 Ampères. Calculer la capacité de la batterie en ampères-heures.
3. Une lampe à incandescence fonctionne 6 heures par jour et est traversée par un courant de 0,7 A. Calculer en Ampères-heures la quantité d'électricité consommée en un mois de trente jours.
4. Que doit-il se passer pour que cette batterie alimente notre lampe ?

Exercice 3: batterie

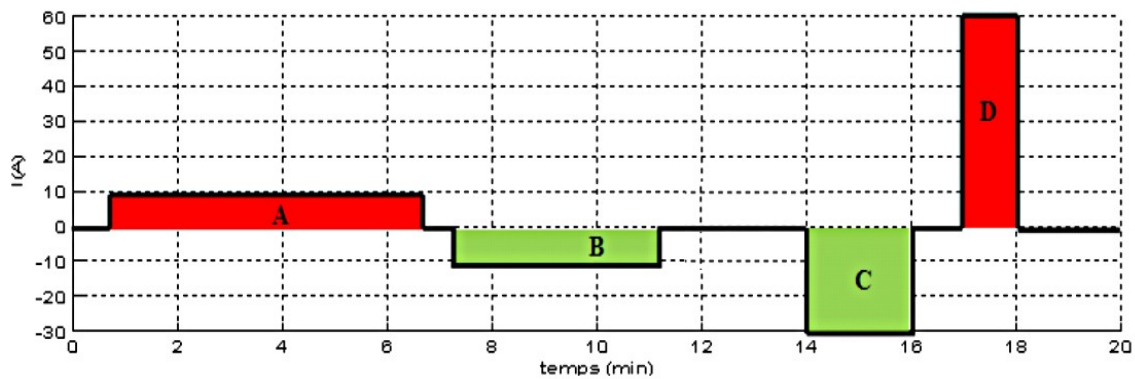
On dispose d'une batterie 12 V de 20 A.h.

1. Calculez la capacité énergétique complète en W.h de la batterie.

On étudie le comportement de cette batterie lors de deux cycles définis par :

Cycle 1 : zone A (décharge à 10 A pendant 6 min) puis zone B (charge)

Cycle 2 : zone C puis zone D.

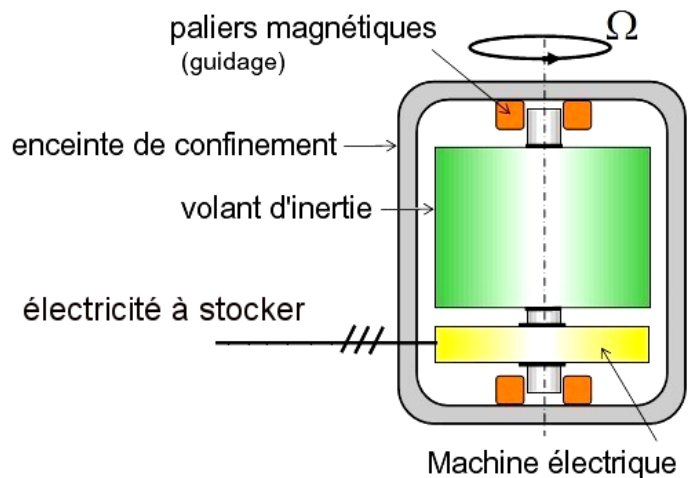


2. Calculez les quantités d'électricité fournie ($Q > 0$ en décharge) et reçue ($Q < 0$ en charge) lors du cycle 1.
3. Calculez les quantités d'électricité fournie ($Q > 0$ en décharge) et reçue ($Q < 0$ en charge) lors du cycle 2.
4. L'état de charge initial étant de 60 %, déduisez-en l'état de charge de la batterie après ces 2 cycles (attention aux signes).

Exercice 4: volant d'inertie

Nous allons stocker de l'énergie électrique à l'aide d'un volant d'inertie (vitesse entre 8000 et 16000 tour/min, diamètre du cylindre = 120 cm, poids = 900 kg). Le système est en mesure de restituer environ 85% de l'énergie emmagasinée.

1. Déterminer la vitesse de rotation (en rad/s puis en tour/min) si le système fournit une énergie de 25 kWh.
2. Comment peut-on augmenter facilement l'énergie stockée par un volant d'inertie ?
3. Calculer la puissance fournie pour 15 min de décharge complète.
4. Pourquoi les paliers de guidage sont-ils de type « magnétique » ?



Exercice 5: STEP

La centrale électrique (STEP) de « Grand'maison» présente les caractéristiques suivantes :

Capacité de la retenue :

140 MILLIONS de m³

Hauteur de chute : 926,5 m

12 groupes qui permettent de turbiner jusqu'à 217 m³/s

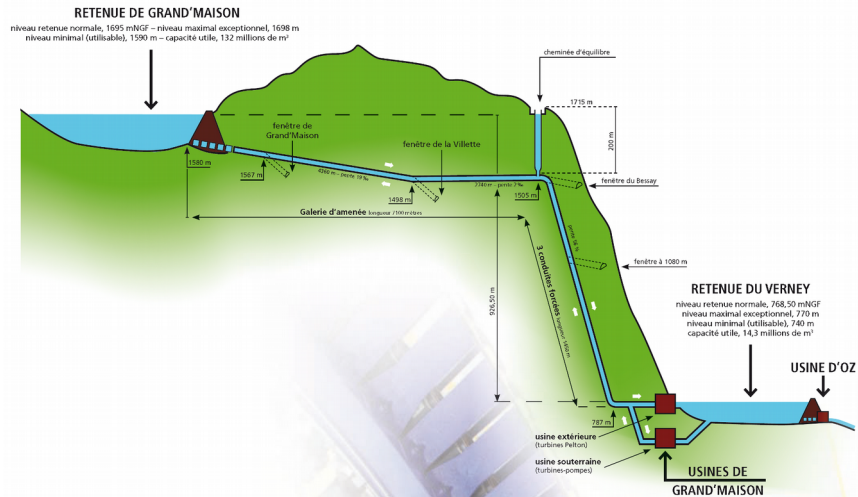
8 groupes permettent de pomper jusqu'à 135m³/s

Puissance de production : 1800 MW

$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

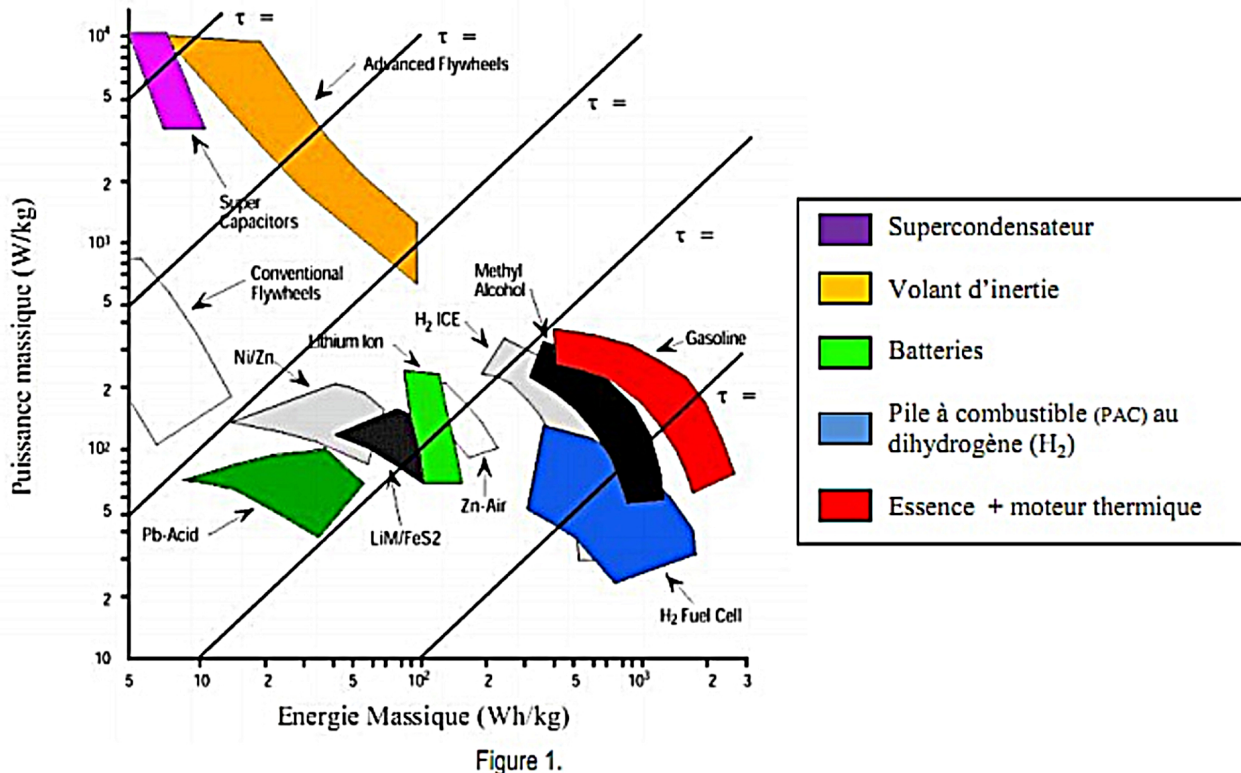
CO₂ économisé : 1 500 000

Tonnes par an



1. Donner la formule de l'énergie potentielle stockée par la retenue d'eau (en fonction de la masse volumique de l'eau ρ , de la hauteur de chute h , de l'accélération de la pesanteur g et du volume d'eau v).
2. Donner la formule générale liant la puissance et l'énergie.
3. Dédire des 2 questions précédentes la formule de la puissance (hydraulique) en fonction de la masse volumique de l'eau de la hauteur de chute, de g , du temps t et du volume d'eau.
4. Sachant que le débit $Q = v/t$, en déduire la formule de la puissance hydraulique (en fonction de la masse volumique de l'eau ρ , de la hauteur de chute h , de l'accélération de la pesanteur g et du débit d'eau Q).
5. Sachant que le débit total turbiné de manière instantanée par la centrale est de $217 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, déterminer la puissance nominale (maximale) hydraulique dont la centrale dispose potentiellement.
6. Déterminer la quantité d'énergie disponible dans l'hypothèse où l'on viderait le barrage.
7. La productivité moyenne est de 1420 GWh / an et la consommation moyenne en pompe de 1720 GWh / an. Qu'est-ce que cela signifie ?

Exercice 6: Comparaison des différents moyens de stockage



Le diagramme de Ragone (figure 1) permet de comparer différents moyens de stockage. On porte en abscisse l'énergie massique et en ordonnée la puissance massique, deux grandeurs prépondérantes en matière de stockage embarqué.

Nous nous intéressons ici à une automobile dont il faut assurer le déplacement.

1. Les transports routiers sont caractérisés par de longues distances parcourues à vitesse régulière. Cela correspond-il à des appels de puissance ou à un besoin d'autonomie ?
2. Quelle est actuellement la source d'énergie communément utilisée pour propulser les véhicules ? Justifiez ce choix à partir du diagramme de Ragone.

On estime à 20 kW.h l'énergie nécessaire à l'autonomie de notre véhicule à 110 km/h sur route plate, par vent nul pendant 1 heure (autonomie de 110 km). Calculez, pour assurer cette autonomie :

3. la masse d'un pack de supercondensateurs (on donne W massique = 6 Wh / kg).
4. la masse d'une batterie Li-Ion (on donne W massique = 150 W.h / kg).
5. la masse de carburant SansPb98 (on donne W massique = 12.3 kW.h / kg).
6. la masse de dihydrogène alimentant une pile à combustible (Fuel Cell en anglais). On donne l'énergie massique du dihydrogène (H_2) : 40 kW.h/kg.
7. Reprenez le calcul en considérant l'énergie massique (1.5 kW.h / kg) du dihydrogène incluant le poids du réservoir permettant de maintenir le gaz sous pression (350 bar)

8. Analysez les résultats précédents.

Nous nous intéressons maintenant au cas d'une automobile hybride. L'hybridation des véhicules (machine thermique en cycle routier et machine électrique en cycle urbain) permet d'utiliser le moteur thermique au mieux de ses performances (c'est-à-dire avec le meilleur rendement) et ainsi tirer le meilleur parti de l'énergie embarquée, réduisant la consommation d'essence et les émissions de CO₂.

9. Les transports en ville sont caractérisés par des démarrages et des arrêts fréquents. Cela correspond-il à des appels de puissance ou à un besoin d'autonomie ?

10. A partir du diagramme de Ragone, donnez les deux moyens de stockage les plus appropriés.

On estime à 30 kW le besoin en puissance lors d'une phase d'accélération.

11. Calculez la masse d'une batterie Li-Ion (100 W / kg) permettant de fournir cette puissance.

12. Calculez la masse d'un pack de supercondensateurs (3000 W / kg) permettant de fournir cette puissance.

13. Si notre supercondensateur a une puissance disponible de 3000W/kg, en déduire, à partir du diagramme de Ragone, les valeurs de l'énergie massique disponible.

14. En prenant la valeur max d'énergie disponible (relevé sur le diagramme) et en estimant que la puissance demandée est maximale, combien de temps peut durer la phase d'accélération (condensateur entièrement chargé au départ) ?

Nous avons pour finir un véhicule électrique.

15. Quelle est alors la masse de l'ensemble {batterie + supercondensateurs} assurant respectivement le besoin en autonomie et celui d'appel de puissance ?