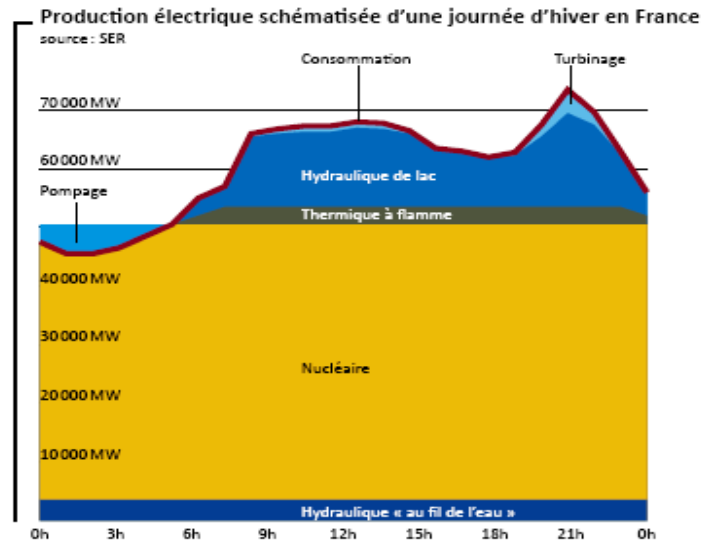


# Stockage d'électricité

## Problématique générale et revue

**Pierre ODRU**

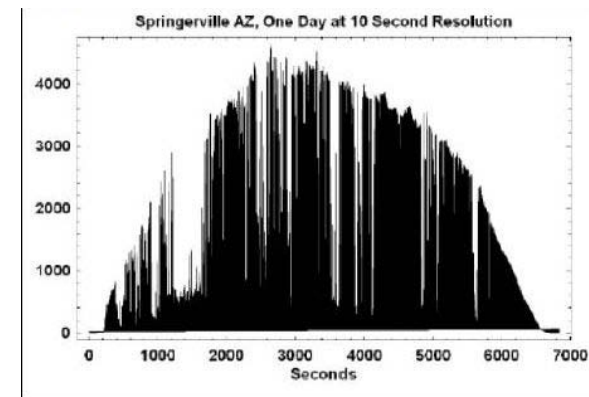
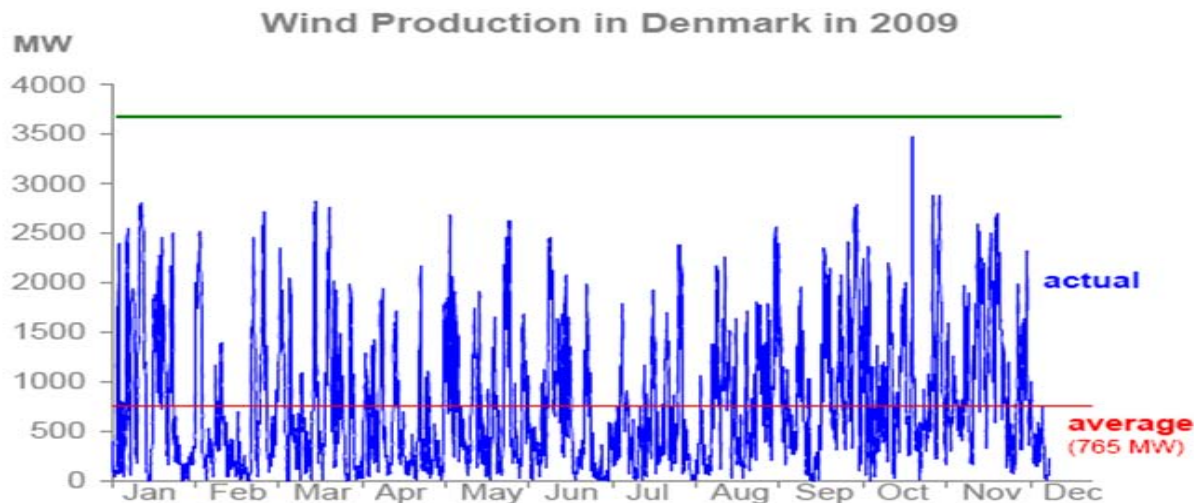
**Consultant  
Fondation Tuck**



La consommation d'électricité est irrégulière dans la journée et dans l'année. Hors l'électricité ne se stocke pas simplement et doit être consommée en direct.

Dans le scénario ancien classique:

- Centrales de base: nucléaires, thermiques, hydrauliques au fil de l'eau, stockage.
- Appoint: turbines à gaz, hydraulique de montagne, déstockage.



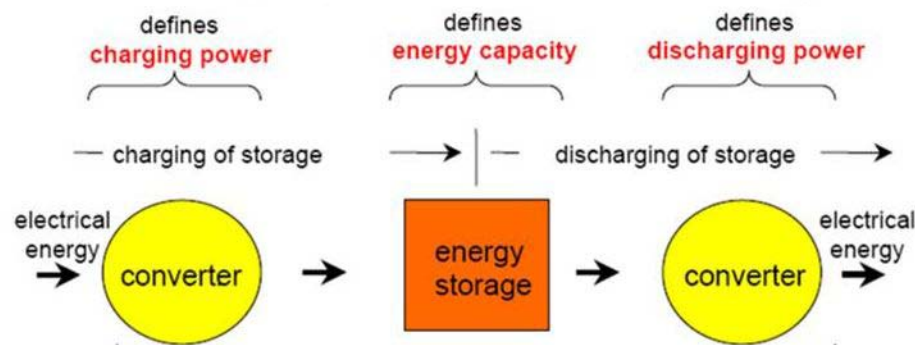
## Solaire PV

L'arrivée massive d'électricité d'origine solaire ou éolienne, intermittente et décorrélée de la demande, modifie fortement le problème:

- En cas d'excès: exporter, débrayer les sources, stocker;
- En cas d'insuffisance: importer, utiliser des moyens de back up, déstocker;
- Dans tous les cas prévoir la météo, renforcer les réseaux et piloter l'offre et la demande.



L'électricité ne se stocke pas directement mais peut l'être à partir d'une transformation réversible en un potentiel (gravitationnel, électrochimique, air comprimé...) ou en un vecteur d'énergie (hydrogène, chaleur...).



Le stockage d'électricité est déjà largement employé:

- De manière massive pour lisser les grands déséquilibres offre demande, arbitrer sur les prix, en réserve ;
- De manière plus diffuse en secours, en régulation court terme, sur les sites isolés, etc.

## Transformations réversibles:

- Stations de Transfert d'Énergie par Pompage;
- Compressed Air Energy Storage (CAES);
- Batteries électrochimiques.

## Transformations en un vecteur énergétique:

- Hydrogène et Power to Gas;
- Chaleur ou froid.

D'autres systèmes de stockage existent, adaptés aux courtes interventions de puissance: supercondensateurs, volants d'inertie, SMES...

## Principe:

-L'eau est pompée d'un bassin inférieur ou d'un cours d'eau vers un bassin supérieur en cas d'excès d'électricité;

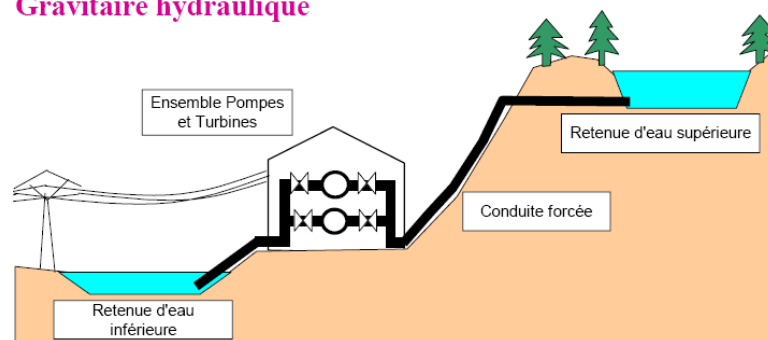
-L'eau est ensuite turbinée lorsque la demande excède l'offre.

**Les STEPs (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) représentent 99% de la puissance de stockage installée dans le monde.**

- Rendement élevé (75 à 85%), investissement élevé, mais peu de dépenses de fonctionnement, très longue durée de vie, potentiel de grosses unités (jusqu'à 3 GW);
- Empreinte environnementale, acceptabilité sociétale, raréfaction des sites en Europe.

En France la capacité installée est de l'ordre de 4,3 GW et fournit 6 à 7 TWh par an ( 1,2 % de la production).

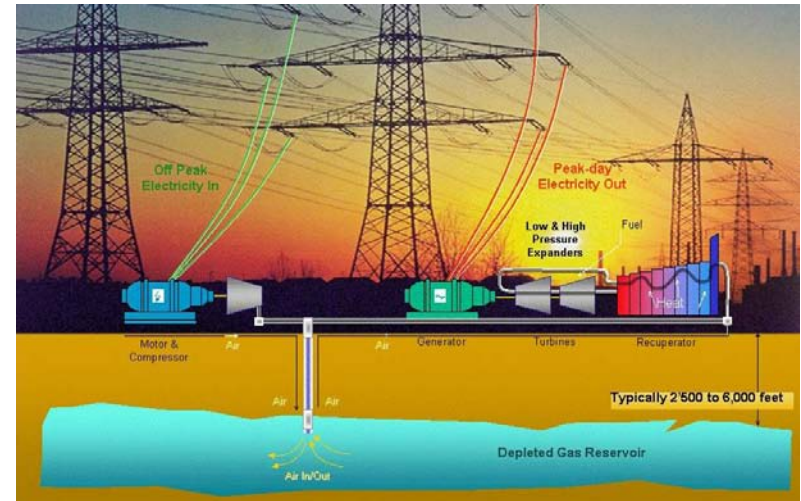
## Gravitaire hydraulique



**STEP: Station de Transfert d'Énergie par Pompage**

## Principe des CAES (Compressed Air Energy Storage):

- L'air est comprimé dans un réservoir géologique (cavernes salines) en cas d'excès d'électricité;
- L'air est ensuite turbiné lorsque la demande excède l'offre.



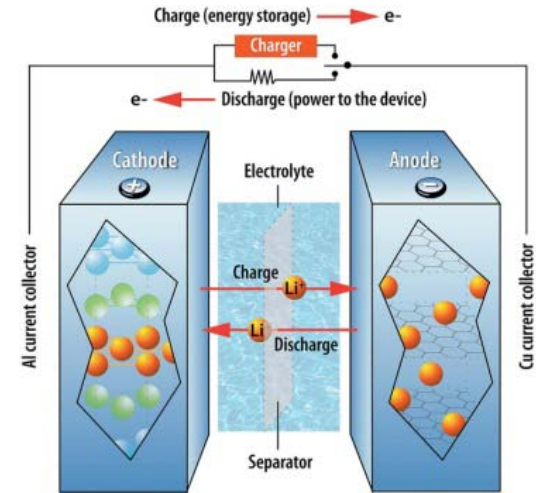
CAES: Compressed Air Energy Storage

**En version CAES, rendement de l'ordre de 50% et nécessité d'utilisation de gaz naturel.**

- Sites géologiques complémentaires des Steps; si caverne saline disponible, coûts de stockage du même ordre; moindre empreinte environnementale directe;
- Deux gros systèmes dans le monde, trois autres en cours de développement;
- Tentative de s'affranchir du gaz naturel par stockage de chaleur (AACAES, un projet en Allemagne, serait en difficulté ?).

## Principe:

- Réactions électrochimiques réversibles
- Extension des batteries classiques (Plomb, Lithium, Ni-Cd...) au stockage stationnaire;
- Batteries spécialement conçues: NaS, Redox Flow...



Batterie Lithium Ion

**Le coût des batteries, notamment Lithium ion, baisse fortement. Durée de vie dépendant du nombre et de l'amplitude des cycles, autodécharge, rendement...**

**Leur souplesse d'utilisation est grande: adaptation instantanée aux fluctuations offre demande, pas de contraintes d'implantation, forte densité énergétique..**

**Leur développement massif nécessitera de grandes quantités de matière.**

**Déjà bien utilisées dans les réseaux restreints ou en autonomie.**



|                          | STEPS   | Air Comprimé | Batteries |
|--------------------------|---------|--------------|-----------|
| Puissance installée (MW) | 169 000 | 437          | 1775 (**) |
| Prévu, en cours (MW)     | 14 250  | 1160 (*)     | 1374      |
| Prévu/installé           | 8,4 %   | 265 %        | 77 %      |
| Nombre total de systèmes | 352     | 19           | 955       |

### Remarques:

\* Les 200 MW de l'ACAES d'Adele seraient abandonnés selon certaines sources

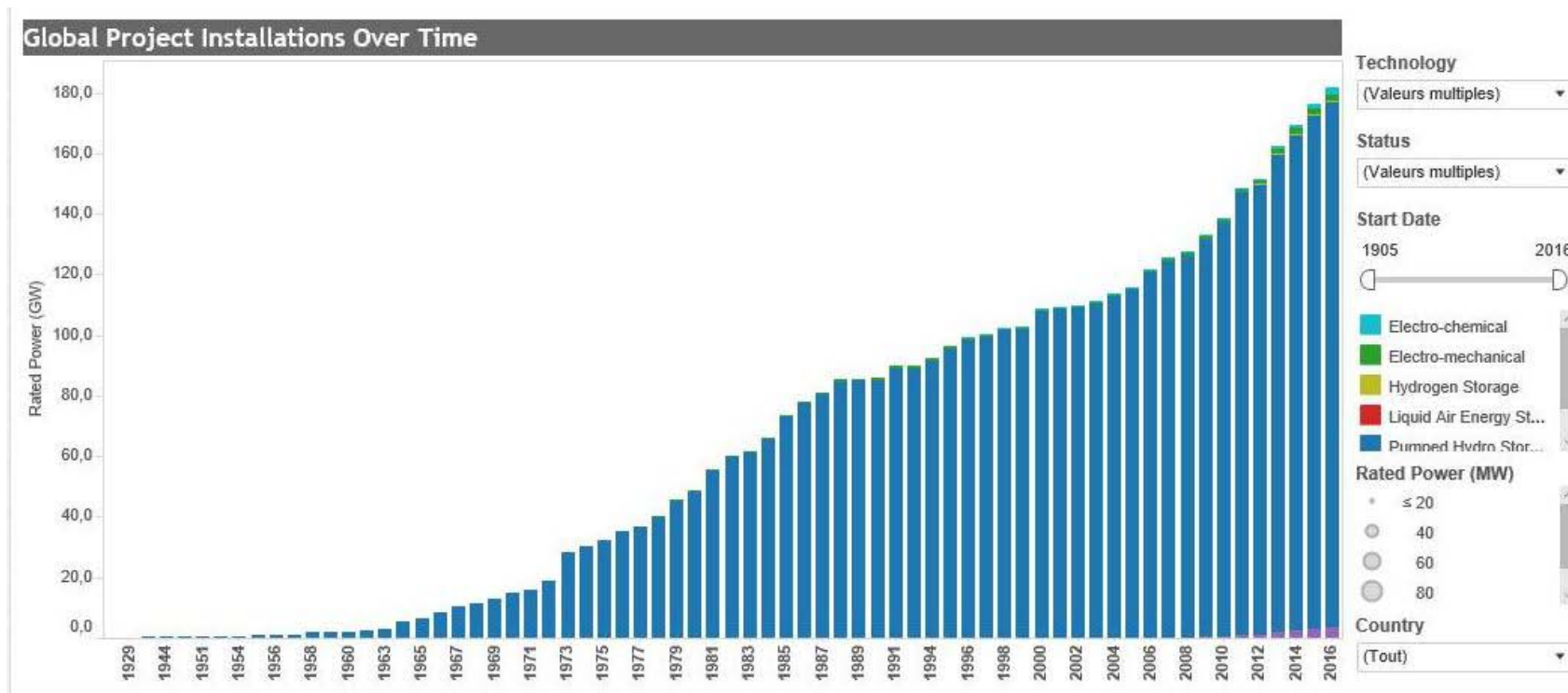
\*\* Il existe une importante différence entre les données du DOE et celles du constructeur de batteries NaS (NGK) de l'ordre de 250 MW.

La puissance ne rend pas compte de l'énergie stockée.

Source: DOE energy storage database (2017)

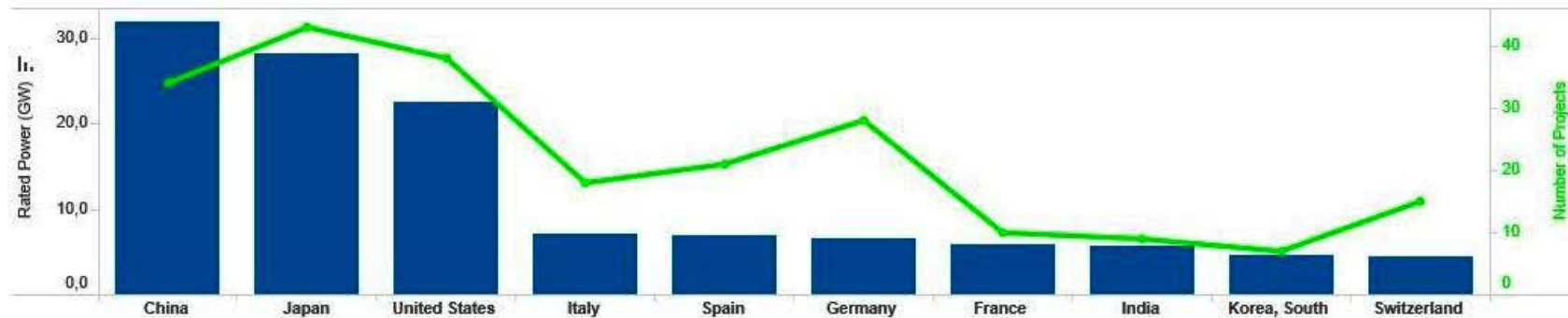
Les STEPs représentent plus de 99% de la puissance installée dans le monde et restent de très loin la première source de stockage d'électricité prévue (85%).

Les taux de croissance attendus de l'Air Comprimé et des Batteries (notamment Lithium) sont cependant beaucoup plus importants.

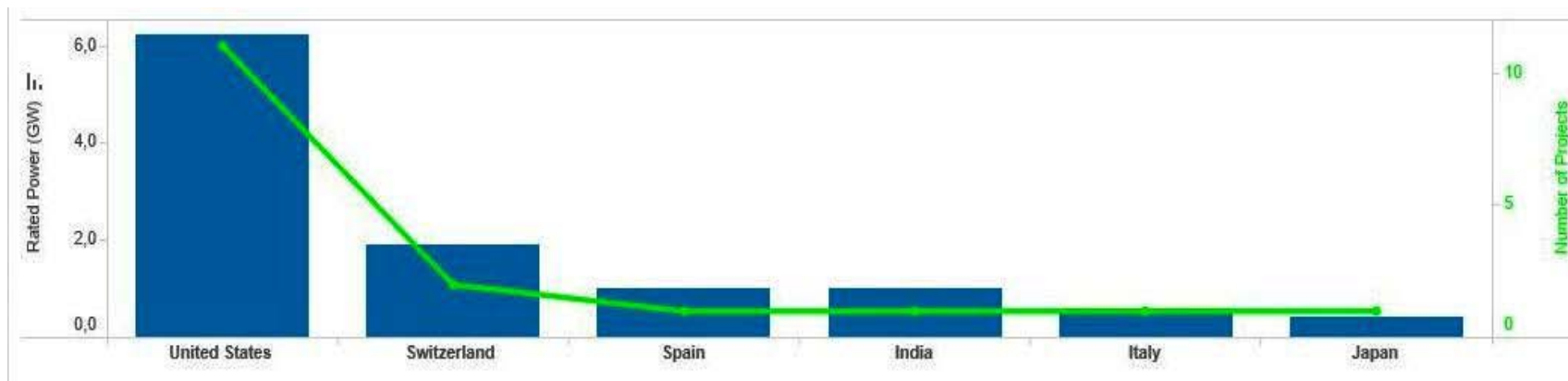


Croissance dans le temps, toutes technologies, depuis 1929.

En bleu: STEPs

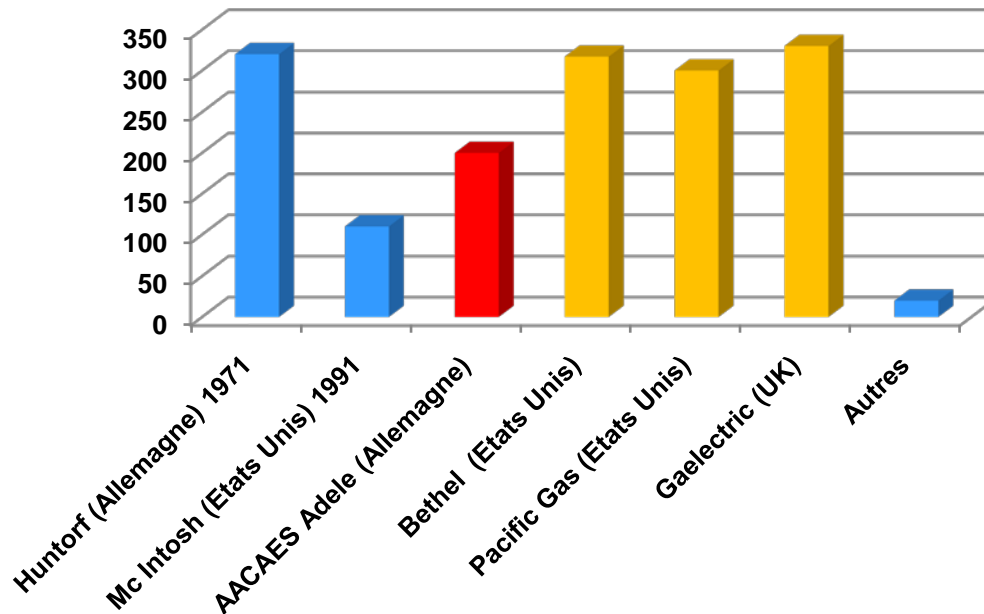


Puissance STEPs: répartition existant dans le monde (DOE 2016)



Puissance STEPs: répartition nouveaux projets dans le monde (DOE 2017)

Puissance (MW)



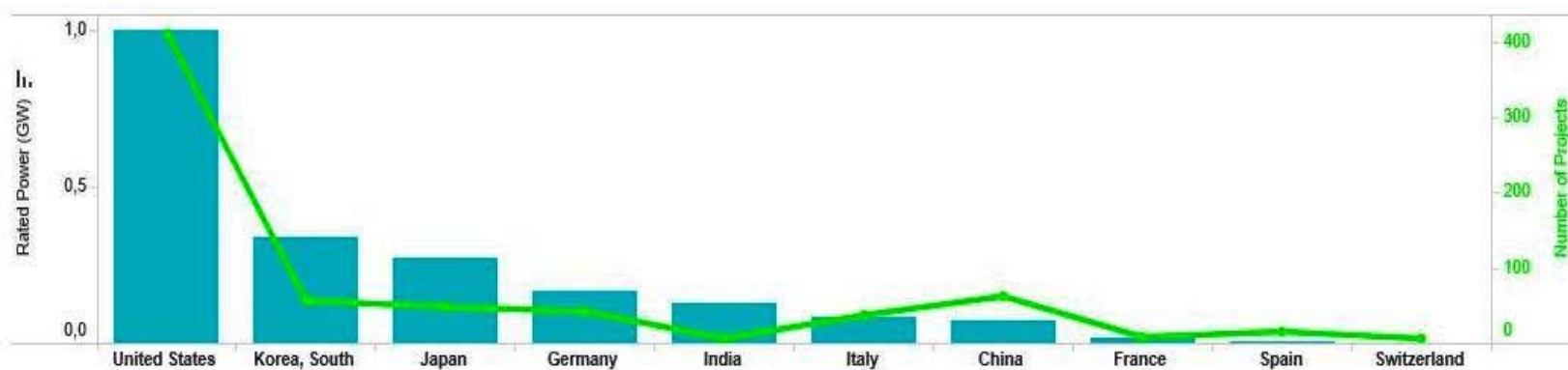
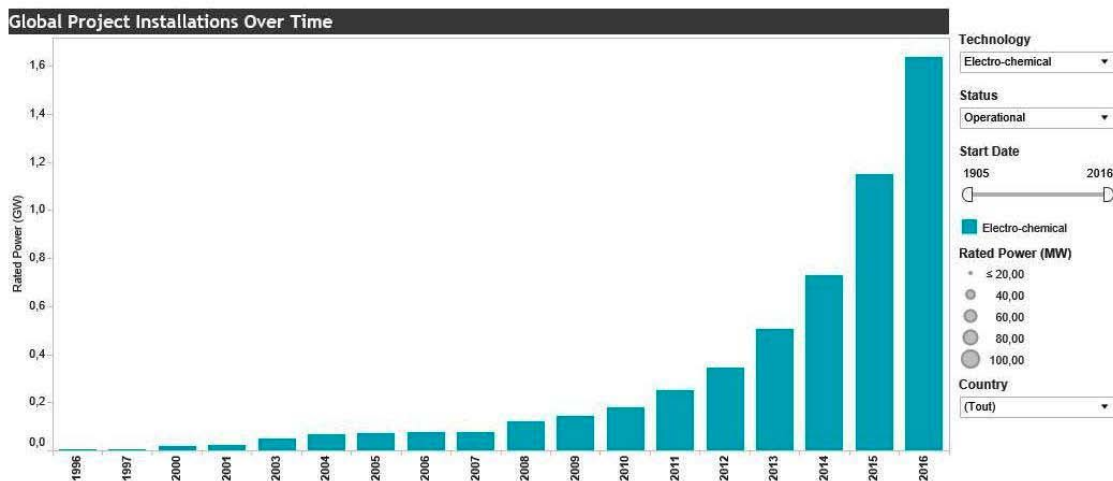
Bleu: existantes  
 Rouge: AACAES (?)  
 Orange: annoncé

Source: DOE

**Puissance des principales Unités Air Comprimé existantes ou à venir dans le monde (MW). Le classement en énergie ne donnerait pas le même résultat, le projet Bethel en représenterait les 2/3.**

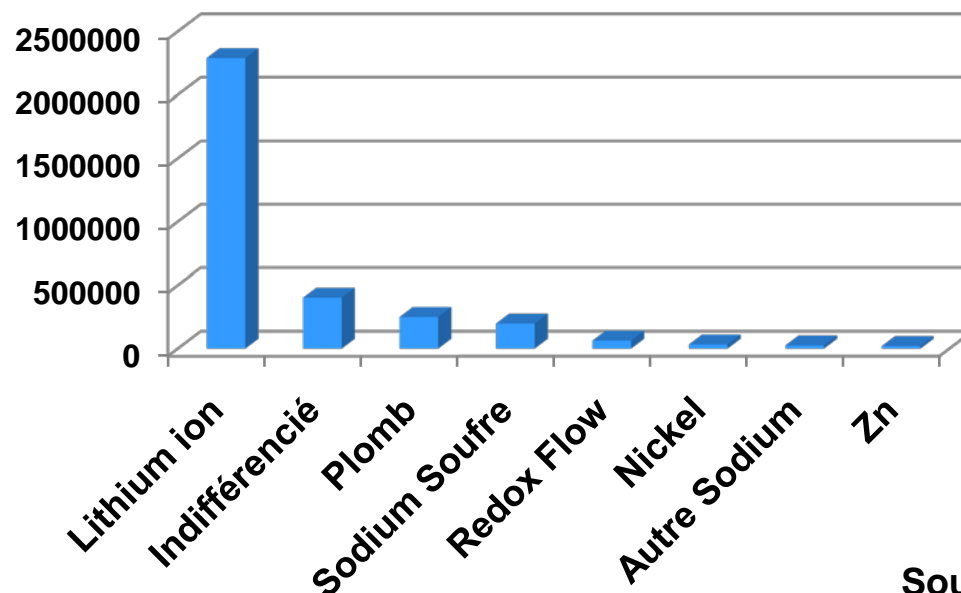
Puissance installée de 1996 à 2016

(source DOE energy storage database).



Puissance installée et nombre d'installations par principaux pays.

**Puissance  
installée et  
prévue  
(kW)**



Source: DOE 2017

En 2017 le lithium ion, qui n'existait pas en 2008, représente plus de 70% de la puissance installée ou prévue dans le monde. A noter qu'en énergie le Sodium Soufre (NaS) et le Redox Flow seraient mieux placés. Le constructeur du NaS annonce des chiffres supérieurs à ceux recensés dans la base du DOE.

L'électricité peut aussi être transformée en un autre vecteur énergétique qui peut ensuite être utilisé comme tel, ou retransformé en électricité après stockage.

- Transformation en hydrogène et Power to Gas;
- Transformation en chaleur ou en froid;
- Centrales solaires thermodynamiques.

## Transformation réversible:

**Electricité -> électrolyse -> stockage -> pile à combustible -> électricité**

La densité énergétique de l'hydrogène est plus élevée que celles des précédents systèmes. Le stockage à grande ou très grande échelle pourrait se faire dans des sites géologiques ou dans le réseau de gaz naturel. Toutefois le rendement actuel est faible (35%) et les coûts élevés.

## Utilisation directe (Power to gas):

**Pas de transformation inverse coûteuse (rendement 60%):**

- injection en quantité importante possible d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel,
- utilisation industrielle,
- stations services hydrogène,
- transformation en méthane ou méthanol possible si disponibilité de gaz carbonique (notamment d'origine biomasse).



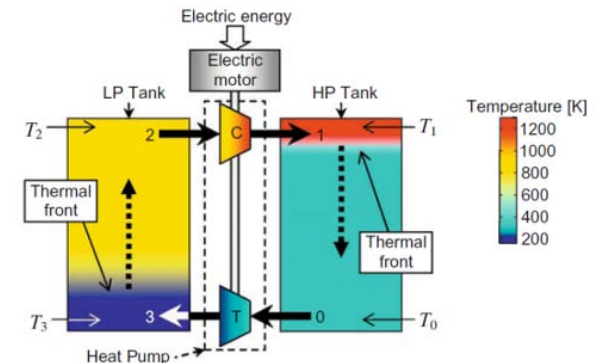


La transformation d'électricité excédentaire en chaleur ou froid existe déjà à travers de nombreuses petites unités. C'est le premier mode de stockage de l'électricité nucléaire en France.

Le stockage de froid est un excellent moyen de stockage de l'électricité. Une très grosse installation existe à La Défense.

A noter que le stockage de longue durée et le transport de la chaleur sont un autre important sujet du solaire thermique.

Il existe des projets de stockage de l'électricité (avec restitution) par pompage thermique à haute température. Moins volumineux que l'air comprimé, moins cher si pas de site géologique propice.

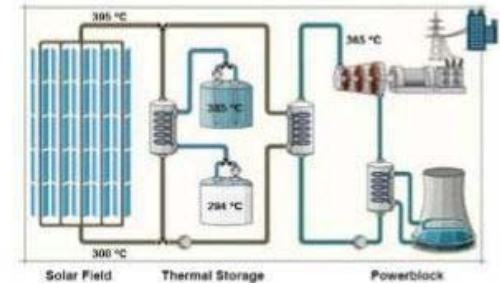


Les centrales solaires thermodynamiques fournissent un fluide chaud qui va alimenter un cycle thermodynamique classique. Le fluide chaud peut être stocké à différentes échelles de temps:

- De l'ordre de l'heure il permet de s'affranchir du passage d'un nuage;
- De l'ordre de plusieurs heures il permet d'atteindre et de couvrir la pointe de consommation du soir, voire la nuit.

Les stockages de longue durée sont réalisés très majoritairement à partir de sels fondus.

On notera que le laboratoire PROMES propose d'utiliser des vitrifiats de déchets amiantés.



Centrale solaire à miroirs paraboliques



Réservoirs de sels fondus

|                          | Hydrogène | Chaleur<br>Froid | Sels fondus |
|--------------------------|-----------|------------------|-------------|
| Puissance installée (MW) | 14        | 819              | 2502        |
| Prévu, en cours (MW)     | 4         | 52               | 250         |
| Prévu/installé           | 28%       | 6%               | 10%         |
| Nombre total de projets  | 13        | 165              | 41          |

Source:  
DOE energy storage database

Les stockages de chaleur par sels fondus correspondent au solaire thermodynamique. C'est le second système de stockage, très loin derrière les STEPs. Espagne et Etats Unis.

Bien que peu développé le stockage via l'hydrogène progresse, essentiellement en Allemagne.

Le stockage par chaleur et froid ne comprend pas les installations individuelles, très nombreuses par exemple en France.

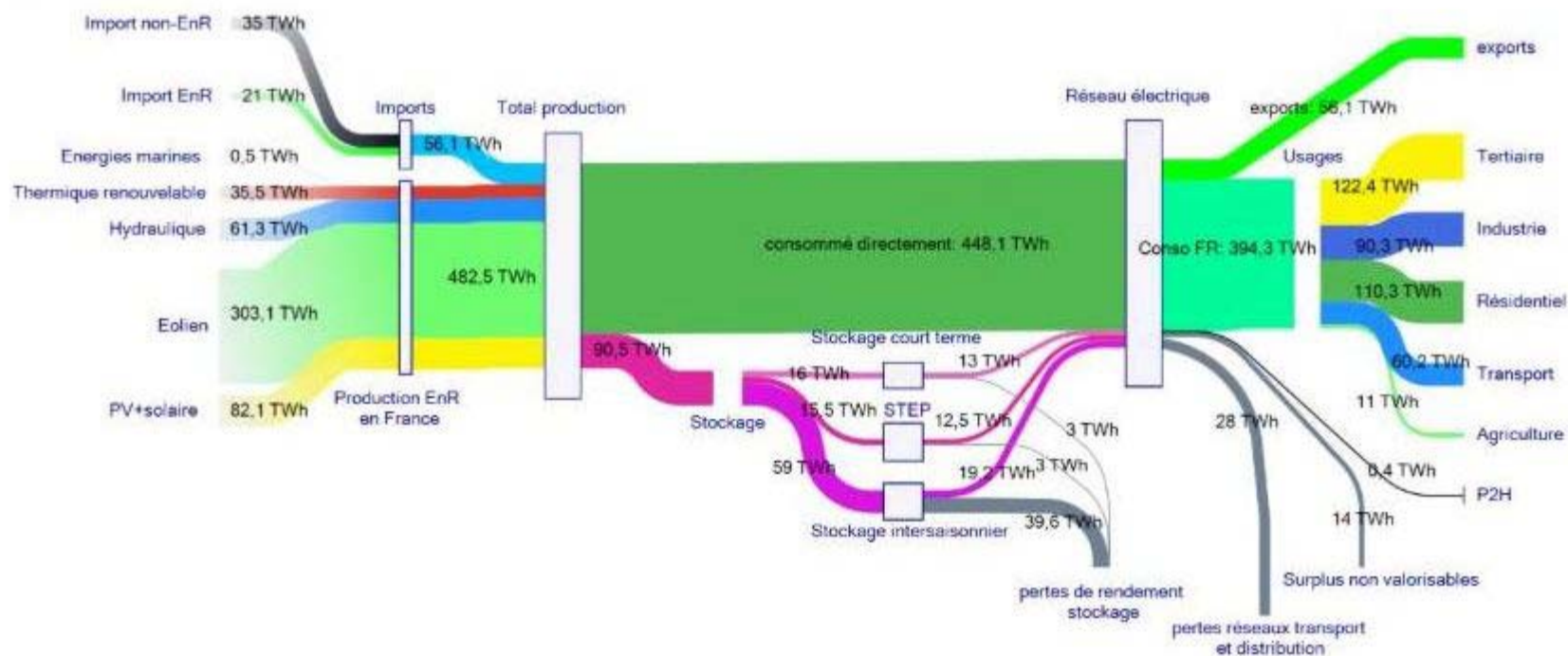


Figure 49 - Flux d'énergie du cas de référence

Le stockage d'énergie (en violet) est à base de batteries, de STEP, et de power to gas, avec pour ce dernier un faible rendement.

**Le Stockage de l'électricité est l'un des moyens susceptible de permettre aux réseaux électriques d'admettre de grandes quantités d'énergies renouvelables intermittentes et décalées par rapport à la demande. Les technologies en sont généralement complexes et coûteuses.**

**Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage représentent 99% de la puissance installée dans le monde, et devraient continuer leur développement.**

**Les autres systèmes, bien que toujours marginaux, connaissent une très forte croissance. Certains (Air Comprimé, Power to Gas) pourraient contribuer au stockage de masse. Le Power to Gas devra fortement baisser ses coûts. Les batteries, notamment au lithium, connaissent une baisse de prix spectaculaire et peuvent apporter de nombreux services complémentaires.**

**La transformation réversible ou non en chaleur est aussi une option en forte croissance.**

**Les prévisions pour atteindre les objectifs très élevés de renouvelables demandent d'augmenter de plusieurs ordres de grandeur les technologies autres que STEPs.**

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

[pierreodru@aol.com](mailto:pierreodru@aol.com)

## Puissance de stockage installée et à venir (MW)

|           |          | STEPS | (AA)CAES | Batteries | Hydrogène<br>P to G |
|-----------|----------|-------|----------|-----------|---------------------|
| France    | Installé | 5900  | 0        | 7,5       | 0,15                |
|           | A venir  | 0     | 0        | 6,5       | 0                   |
| Allemagne | Installé | 6700  | 321      | 139       | 8,7                 |
|           | A venir  | 300   | 200 (?)  | 107       | 1,8                 |

Source: DOE energy storage database

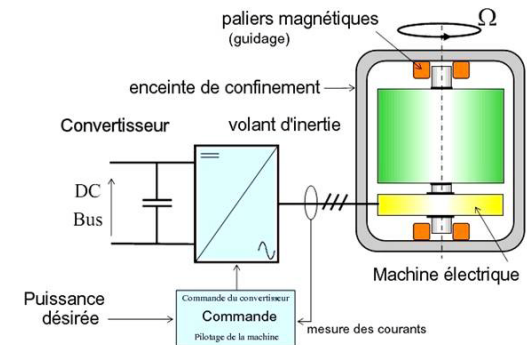
**Scénario Fraunhofer: 70 GW de Power to Gas et 95 GW de back up par centrales gaz.**

**Scénario ADEME 100% renouvelable: 36 GW de stockage, dont 17 GW intersaisonnier (Power to Gas), 7 GW hebdomadaire (Steps) et 12 GW infra journalier (ACAES, batteries).**

Outre le stockage d'énergie à grande échelle pour les renouvelables il y a nécessité renforcée de compenser en puissance instantanée sur le réseau. Volants d'inertie, supercondensateurs, SMES disposent d'une énergie importante sur de courts instants.

Les volants d'inertie sont constitués d'un disque en acier (pour le stationnaire) sustenté magnétiquement tournant à grande vitesse dans le vide.

Près d'un GW installé dans le monde.



Les supercondensateurs sont constitués à partir d'électrodes de charbons actifs présentant de très grandes surfaces et d'un électrolyte.

