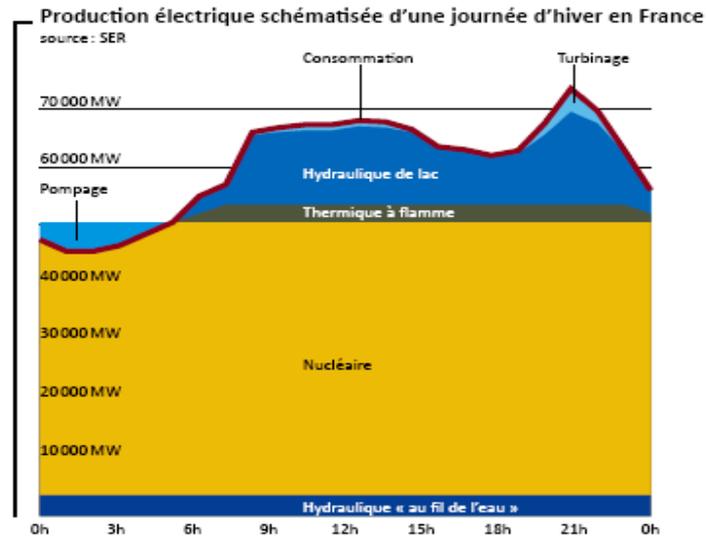


Stockage d'électricité

Etat de l'art international

Pierre ODRU

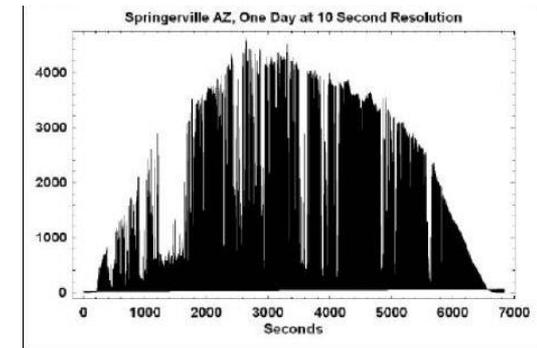
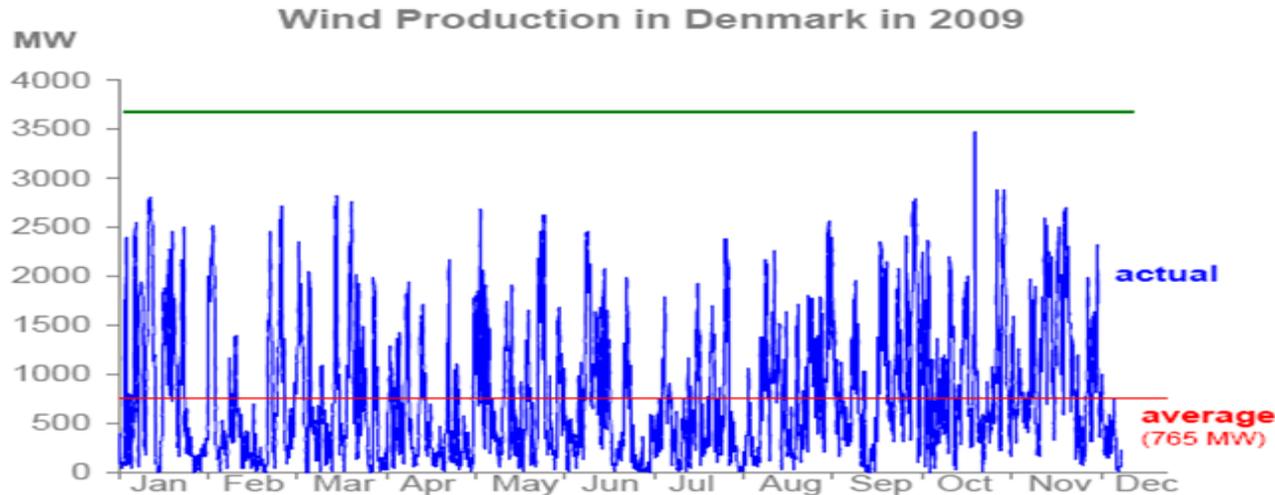
**Consultant
Fondation Tuck**



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:

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



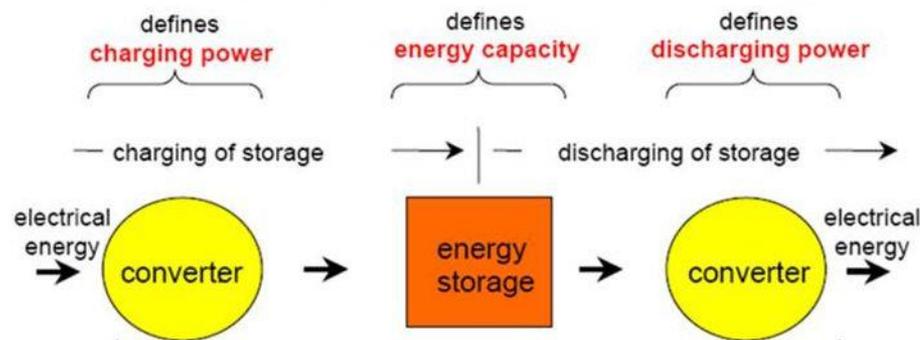
Solaire PV

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 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, etc.

Transformations réversibles:

- Stations de Transfert d'Énergie par Pompage;
- Compressed Air Energy Storage;
- 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;

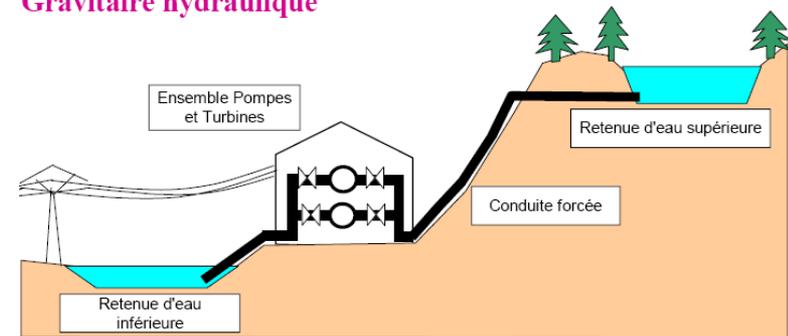
-L'eau est ensuite turbinée lorsque la demande excède l'offre.

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).

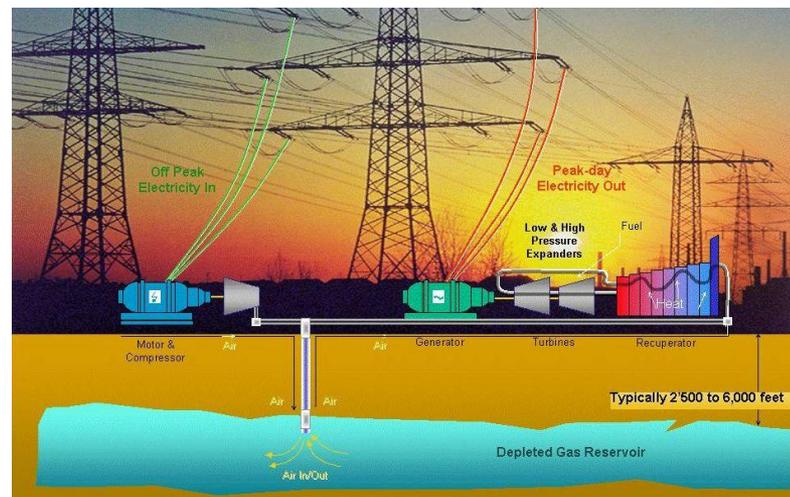
Gravitaire hydraulique



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.



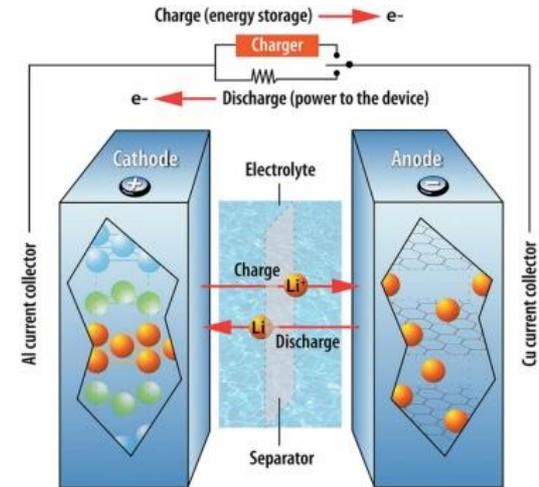
CAES: Compressed Air Energy Storage

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;
- Deux gros systèmes dans le monde, deux 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 est aujourd'hui plus élevé que les deux précédents systèmes. Durée de vie, autodécharge, rendement...

Toutefois leur souplesse d'utilisation est beaucoup plus grande: adaptation instantanée aux fluctuations offre demande, pas de contraintes d'implantation et leur prix baisse fortement, notamment Lithium-ion..

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)	164 000	437	1666 (**)
Prévu, en cours (MW)	21 700	1157 (*)	1397
Prévu/installé	13,2 %	265 %	100 %
Nombre total de systèmes	352	19	715

Source: DOE energy storage database

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.

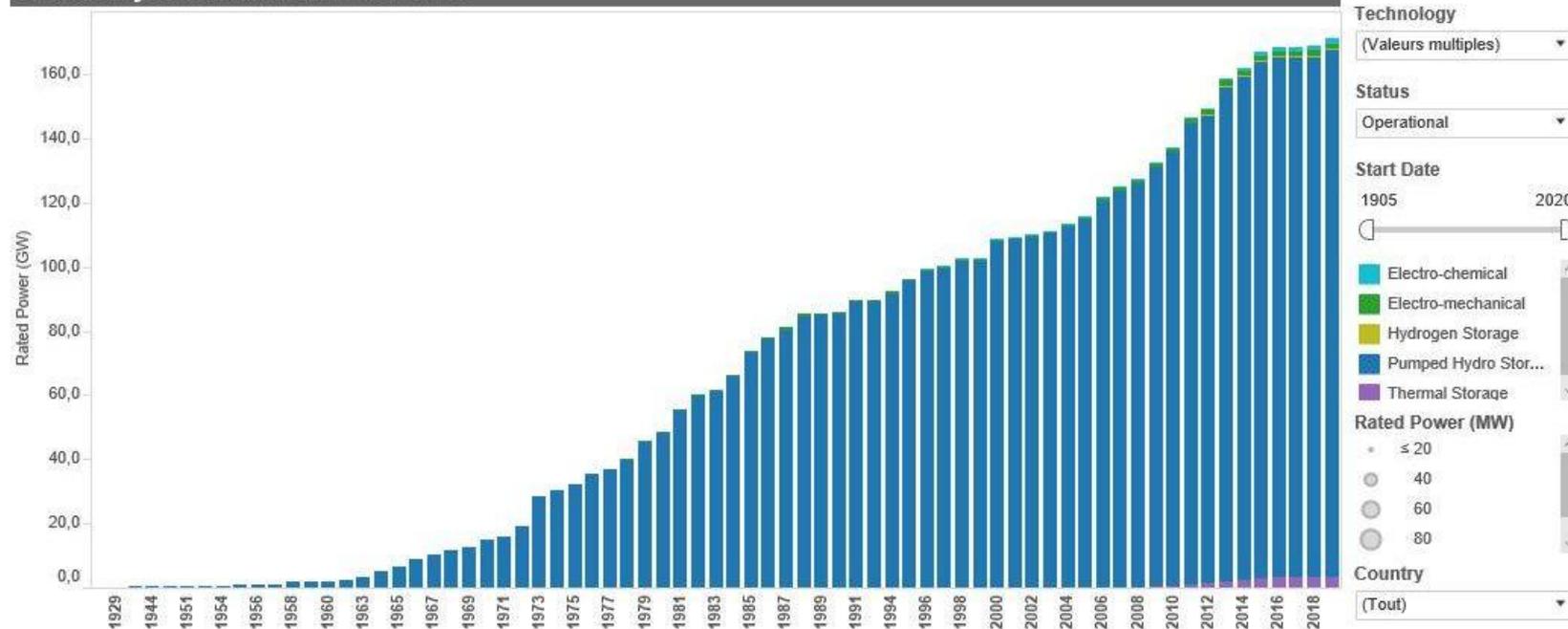
Les STEPs représentent plus de 99% de la puissance installée dans le monde et restent de très loin la première source de stockage d'électricité prévue (95%).

Le taux de croissance attendu de l'Air Comprimé et des batteries (notamment Lithium) est cependant beaucoup plus important.

DOE Global Energy Storage Database

Last Updated 16/08/2016 13:25:38

Global Project Installations Over Time

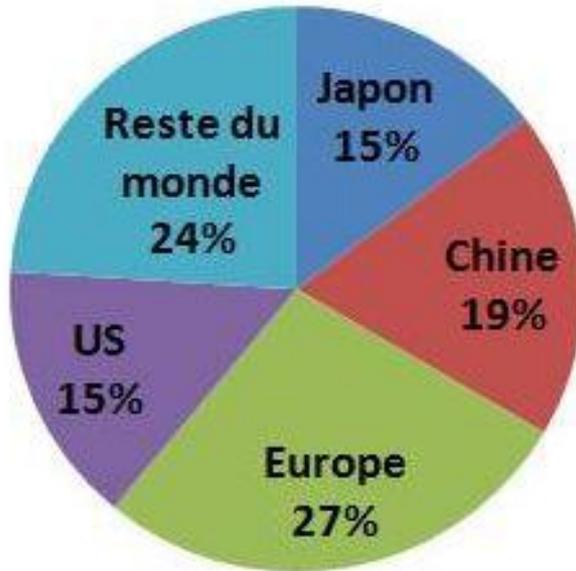


Croissance dans le temps, toutes technologies. En bleu: STEPs

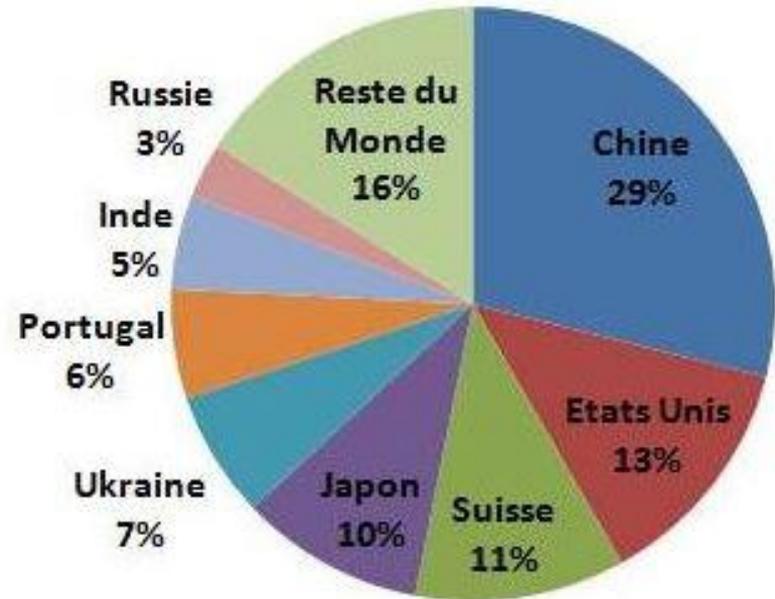


Le stockage d'électricité

STEPS: existant et tendances

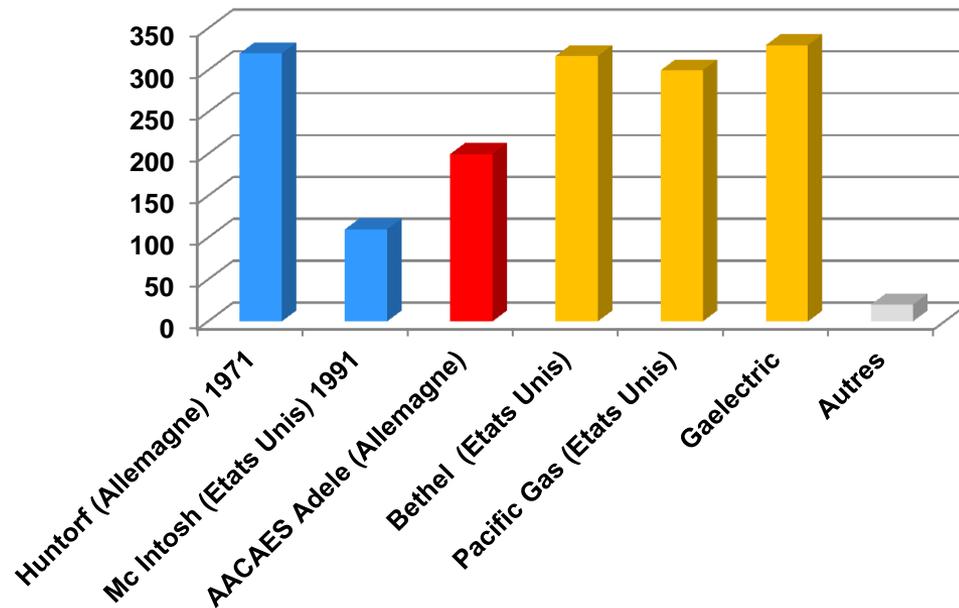


Puissance STEPS: répartition existant dans le monde (DOE 2015)



Puissance STEPS: répartition nouveaux projets dans le monde (DOE 2016)

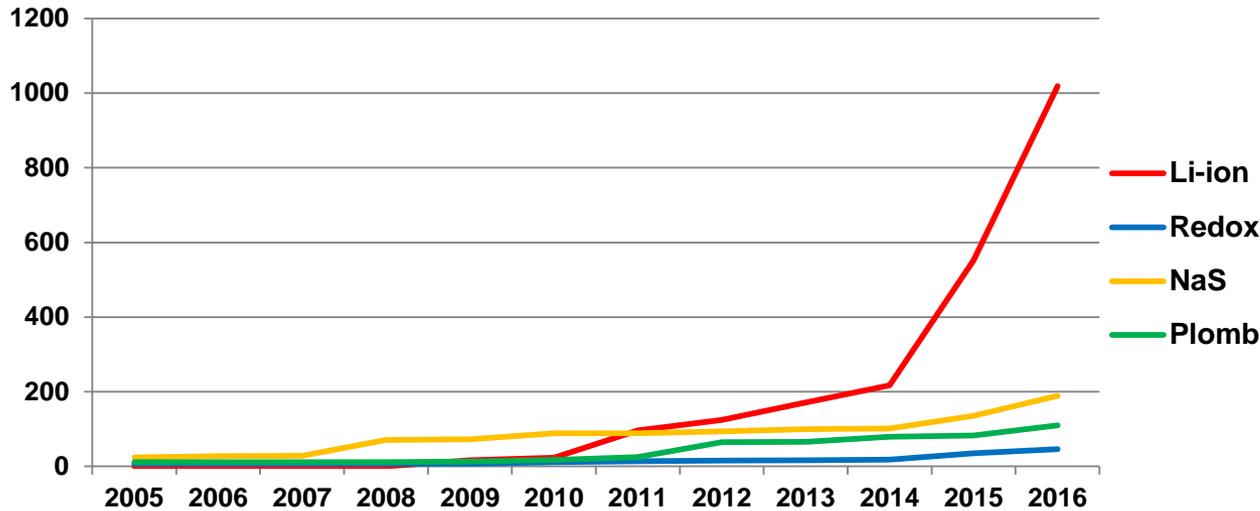
Puissance (MW)



Bleu: existantes
 Rouge: en construction (?)
 Orange: annoncé

Source: DOE

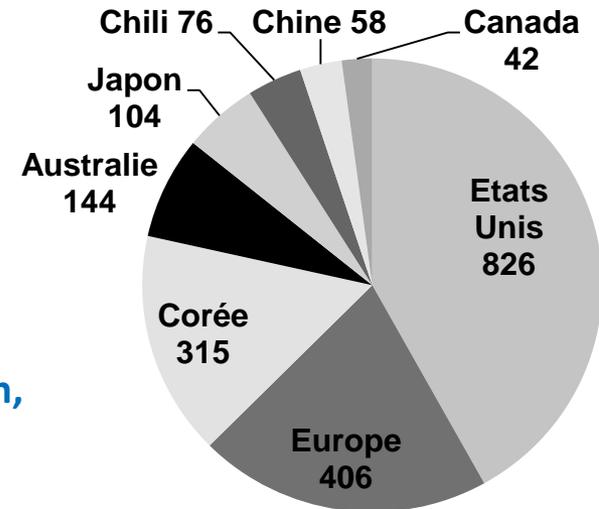
Puissance des principales Unités Air Comprimé existantes ou à venir dans le monde (MW). Le classement en énergie ne donnerait pas le même résultat, le projet Bethel en représenterait les 2/3.



Croissance dans le temps des technologies de batteries en MW (DOE). En 2016 le lithium représente les 2/3 de la puissance installée, à partir de 0 en 2008.

NB1: selon le constructeur NGK le poids du NaS serait beaucoup plus important (400 MW+)
 NB2: Les batteries Redox et NaS sont mieux positionnées en énergie que plomb et lithium.

Répartition ensemble des projets Li-ion, puissance (MW) Monde (DOE, 2016).



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.

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 échelle peut se faire dans des sites géologiques ou dans le réseau de gaz naturel. Toutefois le rendement est faible (35%), les coûts élevés, et l'électrolyse mal adaptée aux sources intermittentes.

Utilisation directe (Power to gas):

Pas de transformation inverse coûteuse (rendement 60%):

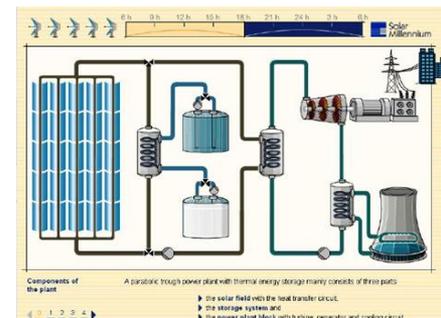
- injection en quantité importante possible d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel,
- utilisation industrielle,
- stations services hydrogène,
- transformation en méthane ou méthanol possible si disponibilité de gaz carbonique (notamment d'origine biomasse).

Les centrales solaires thermodynamiques produisent un fluide chaud (sels fondus) qui peut être stocké et utilisé en cas de nébulosité ou pour couvrir les besoins du soir (hors soleil).

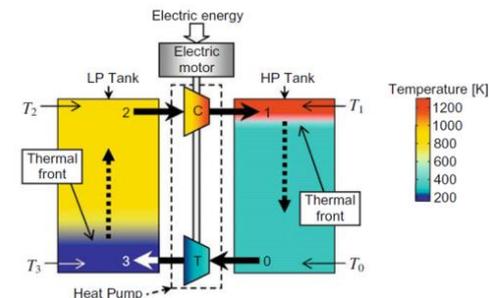


La transformation d'électricité excédentaire en chaleur ou froid existe déjà à travers de nombreuses petites unités. C'est le premier mode de stockage de l'électricité nucléaire en France.

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.



	Hydrogène	Chaleur Froid	Sels fondus
Puissance installée (MW)	14	819	2392
Prévu, en cours (MW)	4	47	365
Prévu/installé	28%	6%	15%
Nombre total de projets	13	165	41

Source:
DOE energy storage database

Les stockages de chaleur par sel fondu correspond au solaire thermodynamique. C'est le second système de stockage, très loin derrière les STEPs. Essentiellement 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.

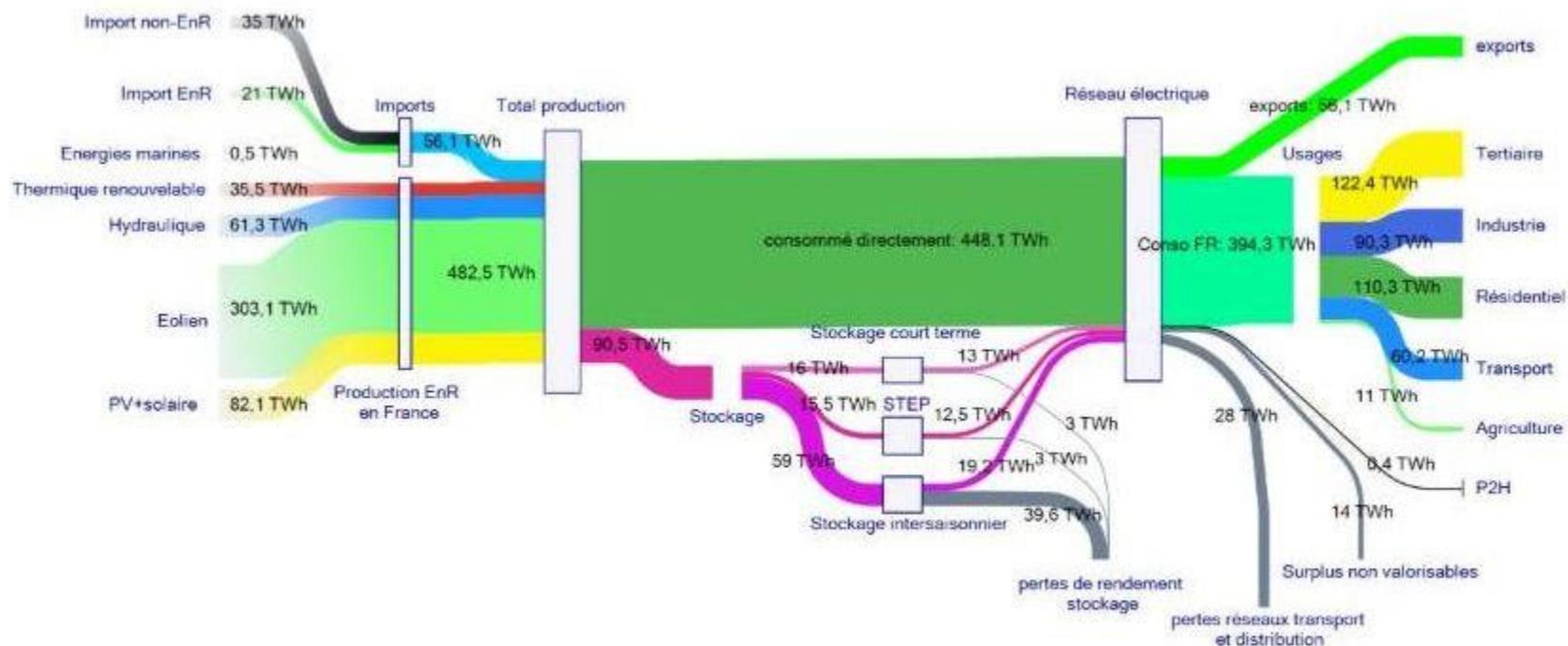


Figure 49 - Flux d'énergie du cas de référence

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.

Puissance de stockage installée et à venir (MW)

		STEPS	(AA)CAES	Batteries	Hydrogène 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).

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