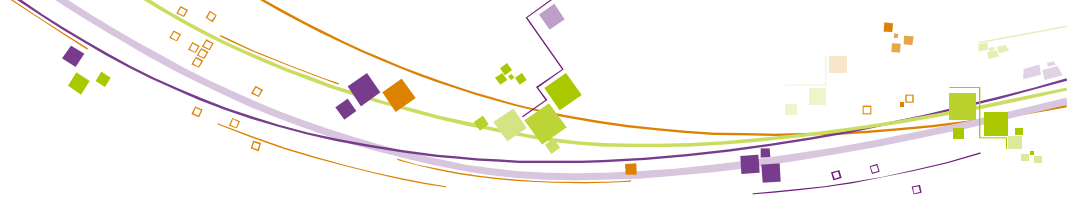


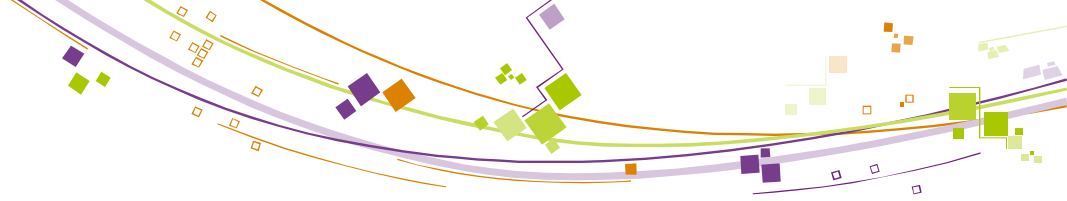
Stockage stationnaire d'énergie

Contexte général



Sommaire

- Le contexte mondial, énergie et électricité
- Le contexte national
- La place du stockage
- Les services et les technologies
- Les besoins et le marché



Le contexte mondial de l'énergie

- **Forte croissance de la demande énergétique mondiale avec forte disparité par région**
 - ➔ Prévission AIE 2012 : plus de 30 % entre 2010 et 2035 , avec de fortes hausses en Chine, Inde et Moyen Orient et une faible hausse dans les pays de l'OCDE

- **Volonté affichée de réduction des émissions de gaz à effet de serre**
 - La vision « +2°C » de l'AIE (scenario 450 ppm) n'est plus retenue
 - Le scenario médian dit « Nouvelles politiques » (NP) correspond à une augmentation de 3.6°C à 4 °C pour 2050
 - Le scenario « as usual » pourrait conduire à une augmentation de l'ordre de 6°C

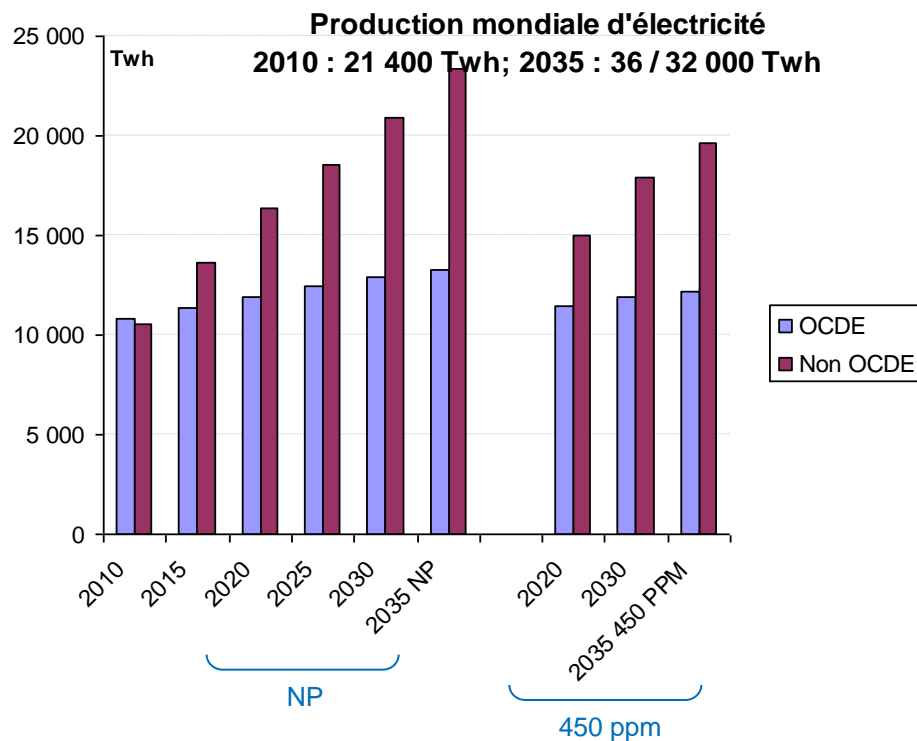
Remarque : nous venons d'atteindre le taux de 400 ppm de CO₂ !

- **Période de transition énergétique structurée autour de la diversification des sources d'énergie primaire et de l'amélioration de l'efficacité énergétique**

Le contexte mondial de l'électricité

■ Forte croissance de la production et de la consommation d'électricité dans le monde

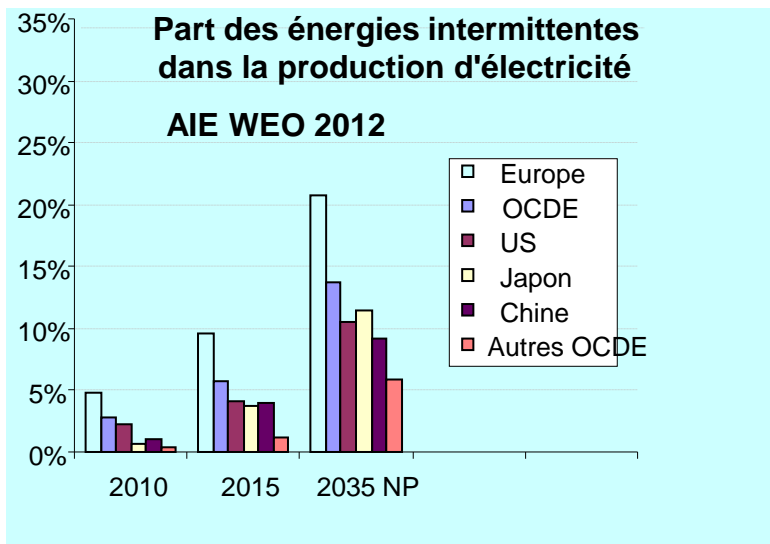
- ➔ Plus de 50% d'ici 2035, avec une forte disparité par région
- ➔ Pour les pays de l'OCDE, la consommation moyenne ne devrait pas augmenter (elle pourrait même diminuer dans certains pays) mais les périodes de pointe et les risques de congestion risquent de se multiplier.



Source : AIE WEO 2012

Le contexte mondial de l'électricité

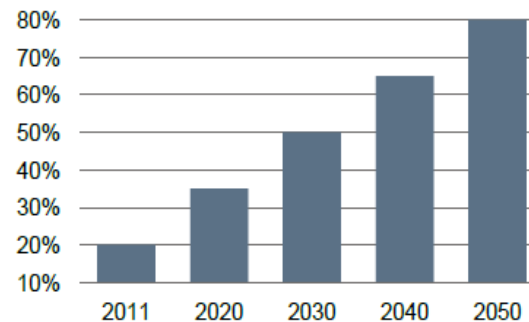
- **Diversification des sources d'énergie pour la production d'électricité**
 - ➔ Réduction de la part du nucléaire et augmentation de la part des EnR dans la production électrique mondiale dans toutes les régions (mais avec de fortes disparités), quelques soient les scenarii envisagés.



Germany: renewables more important

2

The renewables' share of gross electricity generation (%)

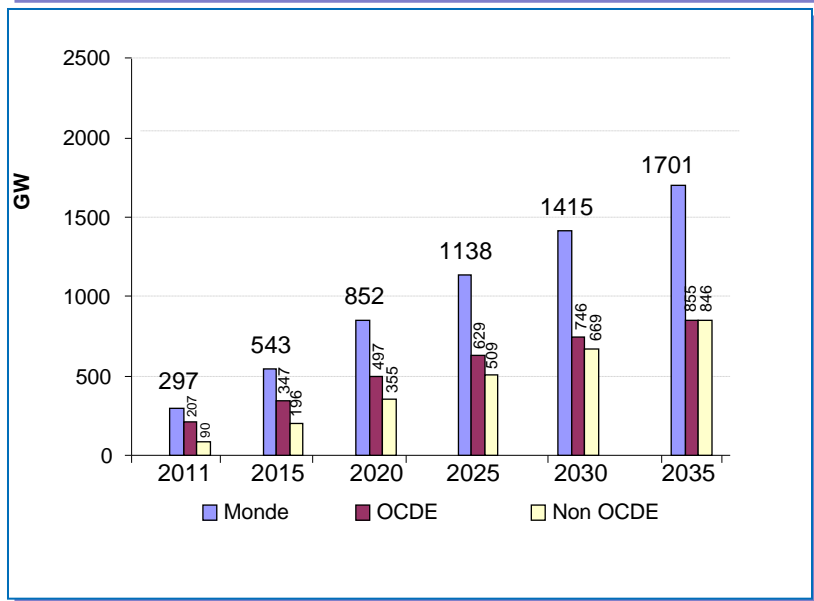


Source: Federal German government

Allemagne

Les besoins en stockage seront d'abord liés aux EnR intermittentes

Puissance installée d'éolien et photovoltaïque, scénario AIE - NP



pour AIE, en 2035, 1700 GW seraient produits via EnR intermittentes (éolien et solaire).

Si les besoins de stockage associés sont , ne serait ce que de 25% , il faudra au moins 425 GW de capacité de stockage (hors STEP associé à la production hydraulique).

A noter que Pike Research prévoit une production de 1300 GW dès 2023.



Le contexte national

- Aujourd'hui, la part des EnR dans la production électrique est modérée en France et le réseau récent, bien maillé et bien connecté en métropole. Le principal enjeu du système électrique français concerne la gestion de la pointe électrique, or :
 - De nombreuses centrales de pointe sont en fin de vie (dont TAC - turbines à combustion)
 - Une grande partie des centrales fioul devrait être fermée entre 2015 et 2020
 - Le taux d'équipement en chauffage électrique des logements est très important
 - Les installations EnR devraient se développer
- ➔ Ces différents facteurs entraînent un risque de défaillance de fourniture d'électricité lors de périodes de forte demande.
- Cas particulier des régions PACA et Bretagne et DOM-TOM
 - La Bretagne est dépendante à 90 % du reste de la France
 - La région PACA est déjà en « bout de lignes »
 - Coût important de l'électricité d'origine fossile dans les zones insulaires et isolées nationales (DOM –TOM)



Les engagements nationaux

- Objectif européen des 3x20 d'ici à 2020 ➡ -20% CO₂, 20% EnR, +20% efficacité énergétique
- 23 % d'EnR d'ici 2020 ➡ + 7 Mtep en électricité ; + 10 Mtep en chaleur et +3 Mtep en biocarburants
- Réduction de la part de l'électricité nucléaire de 78 % à 50 % d'ici 2025

MAIS :

- ➡ Passer de 80% à 50 % nucléaire = compenser 160 TWh
- ➡ 7 Mtep via EnR correspondent à 81 TWh qui seraient produits par :

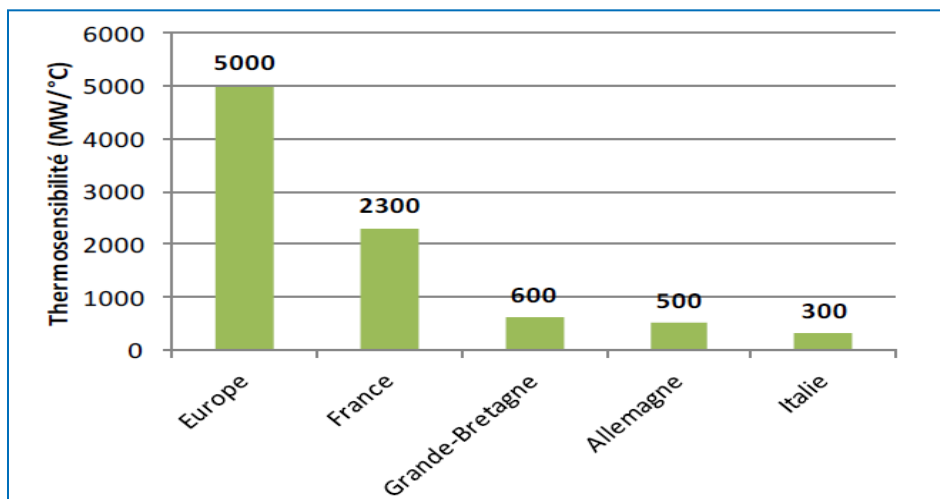
Eolien Terrestre	Eolien en mer	Solaire PV	Biomasse	Hydraulique
+ 19 000 MW	+ 6000 MW	+ 5400 MW	+ 2300 MW	+ 3000 MW

➡ **Ambitieux mais insuffisant ?**

Pour mémoire : la consommation électrique en France s'élevait à plus de 500 TWh en 2010 et la production électrique via EnR à 70 TWh, soit 13% en 2011

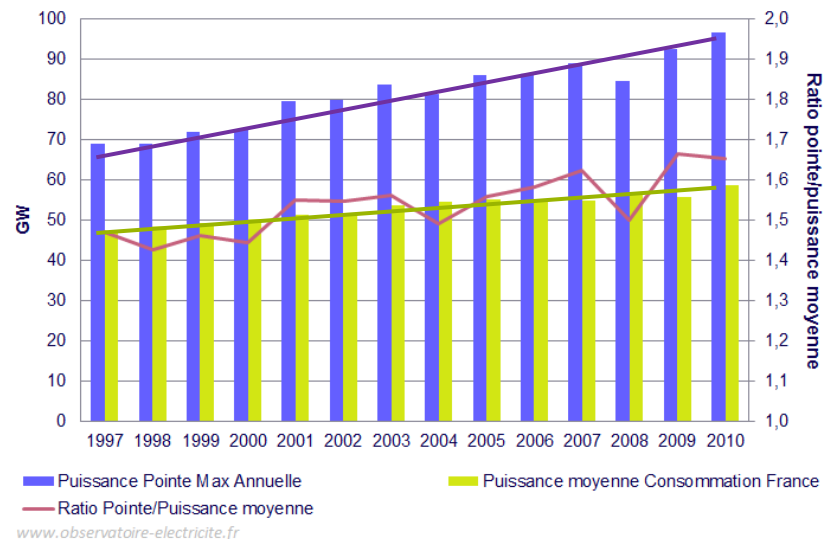
Influence du chauffage électrique en France sur la pointe de la demande

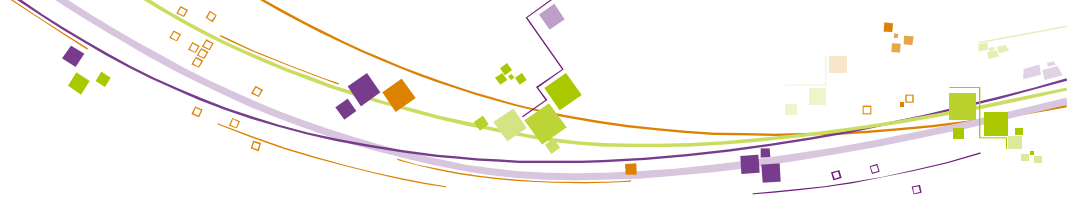
➔ Forte sensibilité de la demande aux périodes de grand froid liée au déploiement du chauffage électrique. Ainsi, en hiver, une baisse de température moyenne de 1°C entraîne une augmentation des consommations de 2 300 MW. D'après RTE, la France compte ainsi pour quasiment 50% de la sensibilité de la pointe européenne à la température.



sensibilité à la température de la demande de pointe

Ce gradient est de plus en plus en augmentation, entraînant une croissance des besoins en puissance de pointe plus rapide que la croissance de la puissance moyenne de consommation d'énergie

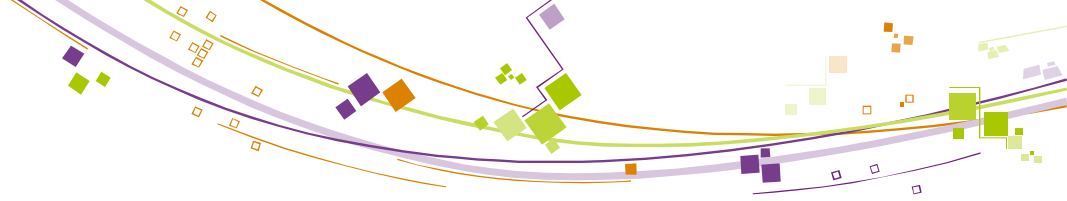




Le stockage dans le contexte électrique

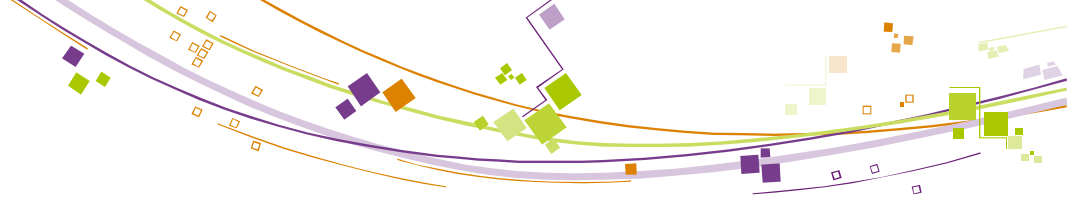
- La disponibilité en énergie et la stabilisation des réseaux sont les conditions *sine qua non* de l'équilibre du système électrique dans le nouveau contexte général de l'énergie.
- La notion de flexibilité entre production et consommation est aussi primordiale pour couvrir les besoins à l'instant t.
- Plusieurs solutions sont possibles : le recours à des moyens de production flexibles (centrales thermiques), maîtrise de la demande avec les smart grids et l'effacement, amélioration de l'interconnexion des réseaux, et stockage, mais aucune ne se suffira à elle même.

Le stockage est donc une solution nécessaire, tant pour sa réponse à des besoins en capacités supplémentaires qu'en puissance rapide. A ce titre, il constituera un vrai levier pour aider à une mise à disposition sûre et flexible de l'électricité.



Intérêt actuel pour le stockage d'énergie

- Des solutions installées existent déjà, la quasi-totalité via les STEP pour des stockages de grosse capacité ou via des batteries conventionnelles pour des zones isolées, des microgrids non connectés (lead acid notamment)
- L'intérêt du stockage dans certaines régions du monde :
 - Au Japon , le stockage est vu comme nécessaire par la nature insulaire de son réseau électrique (faiblement interconnecté)
 - En Allemagne et en Italie par la forte pénétration des EnR et le manque de réseaux Nord-Sud
 - Les Etats-Unis souffrent de réseaux vieillissants et mal connectés conjointement à une pénétration rapide d'EnR dans certains états (Californie)
 - La France métropolitaine, en comparaison, est beaucoup moins sujette à ces problématiques, mais doit gérer des fragilités régionales
- Des évolutions de réglementation sont indispensables pour que le marché du stockage stationnaire d'énergie se développe notamment en Europe où ses apports indéniables sur certains services doivent être valorisables



Les différentes fonctions du stockage

- Le stockage permet d'ores et déjà de répondre (très marginalement) à différents types de fragilité du réseau électrique, tels que :
 - Une forte pénétration des énergies intermittentes
 - Un manque de robustesse du réseau intérieur
 - Un réseau non ou mal interconnecté avec l'extérieur
 - Un déficit temporaire en capacités de production
- Pour évaluer le potentiel du stockage stationnaire d'énergie, il est nécessaire de pouvoir répondre à plusieurs questions :
 - Quel type de stockage à quel niveau de la chaîne ?
 - Quelle(s) technologie(s) pour quel(s) service(s) ?
 - A quel(s) service(s) va t-il falloir répondre rapidement ?

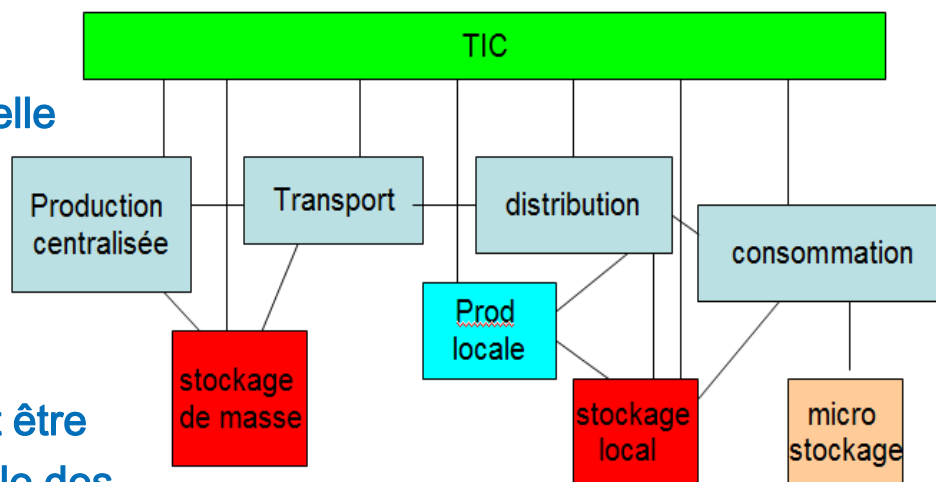
➔ Le développement du stockage stationnaire d'énergie, qui peut se positionner sur tous les maillons du réseau électrique, est lié à l'évolution des différents usages auxquels il peut répondre et des technologies qui leur sont liés.

La chaîne de valeur de l'électricité

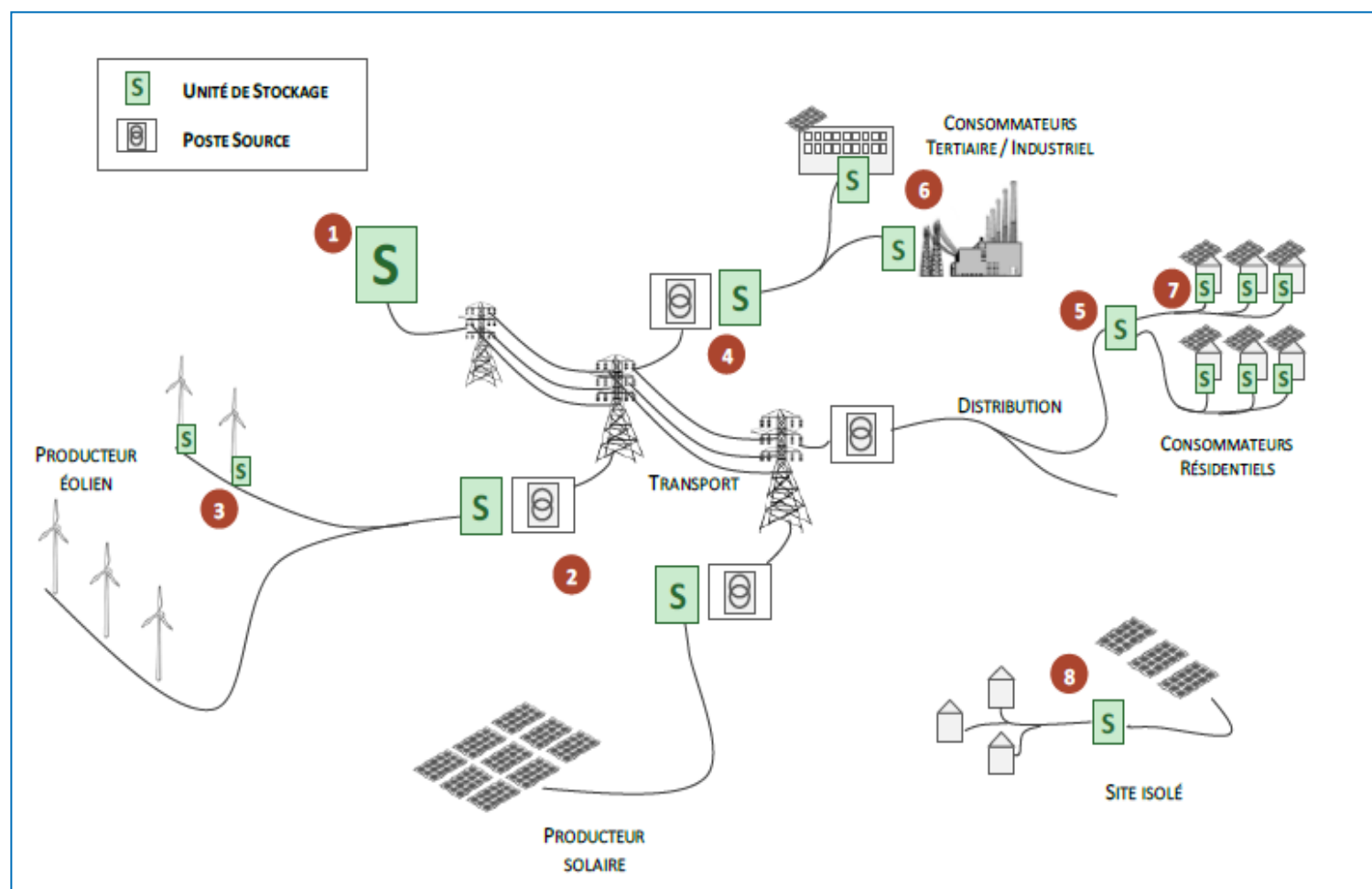
- La chaîne de valeur de l'électricité est en pleine évolution notamment avec le développement des "smart grids" et des TIC (technologies de l'information et de la communication) qui devraient permettre de gagner en efficacité via la flexibilité du système ; les pointes de consommation seraient limitées grâce à une meilleure maîtrise de la demande.

- Le système entier change en passant d'une gestion centralisée et unidirectionnelle de l'énergie (la chaine linéaire classique) à une gestion répartie et bidirectionnelle de l'énergie.

Dans ce nouveau cadre, le stockage peut être envisagé à plusieurs étapes sur l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur de l'électricité



Un besoin d'unités de stockage de toute taille sur tous les maillons du réseau électrique



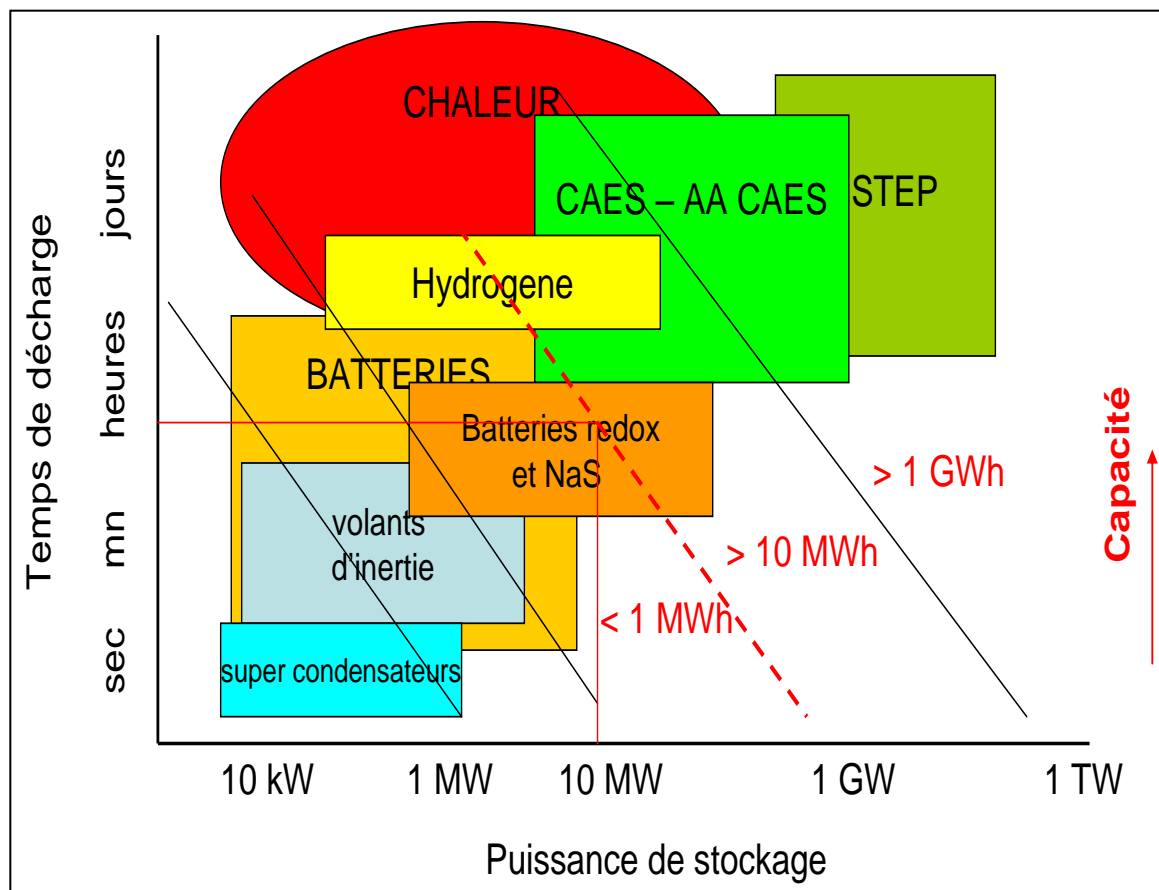
Gamme des services rendus par le stockage sur le système électrique

- **Services d'arbitrage**
 - Arbitrage financier sur les écarts de prix entre heures creuses et heures pleines
 - Lissage de la courbe de production et de la courbe de charge
- **Services d'assurance capacitaire**
 - Approvisionnement de pointe au niveau de la production
 - Ecrêtage des pics de consommation (réduction de la pointe)
 - Consolidation de la capacité disponible pour production EnR
- **Services systèmes ou de soutien au réseau**
 - Régulation de la fréquence (réserves primaire et secondaire)
 - Mécanisme d'ajustement (réserve tertiaire)
 - Régulation de la tension
 - Traitement des congestions
 - Black starts
 - *Réduction des investissements en nouvelles centrales thermiques ou en compléments de réseaux de distribution (service indirect)*
- **Services aux consommateurs**
 - Garantie de fourniture
 - Qualité de l'onde de tension

Les modes de stockage (à ce jour)

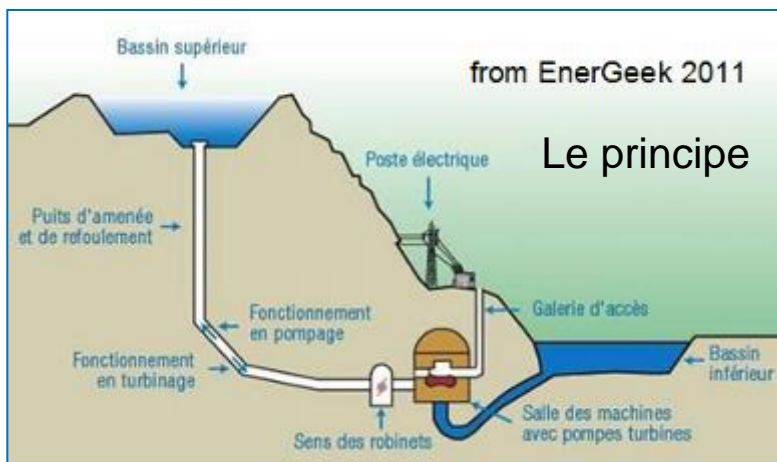
- **Énergie mécanique (potentielle ou cinétique)**
 - Stockage gravitaire par Transfert d'Energie par Pompage (STEP)
 - Stockage par air comprimé (CAES: Compressed Air Energy Storage)
 - Volants d'inertie
- **Énergies électrochimique et électrostatique**
 - Batteries,
 - Condensateurs, super-conducteurs
- **Énergie thermique et thermochimique**
 - Chaleur sensible ou chaleur latente,
 - Energie par sorption
- **Énergie chimique**
 - Hydrogène , méthanation, etc.

Les technologies de stockage

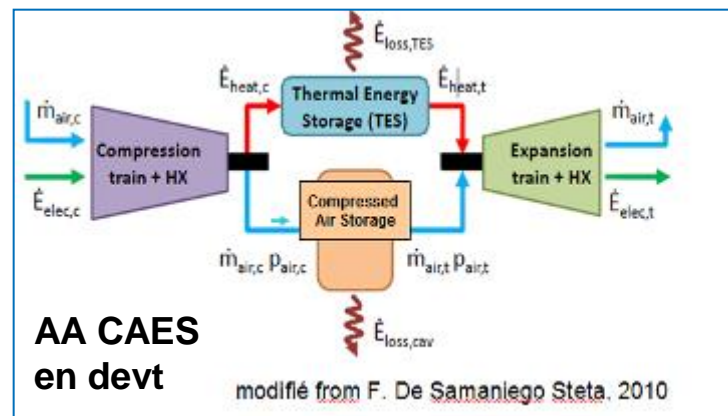
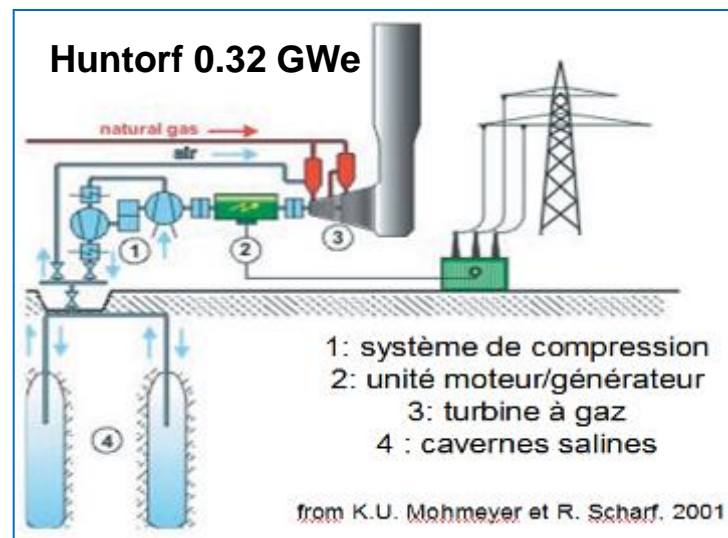


Quelques explications

Les STEP



Le CAES



Quelques explications

Les Batteries

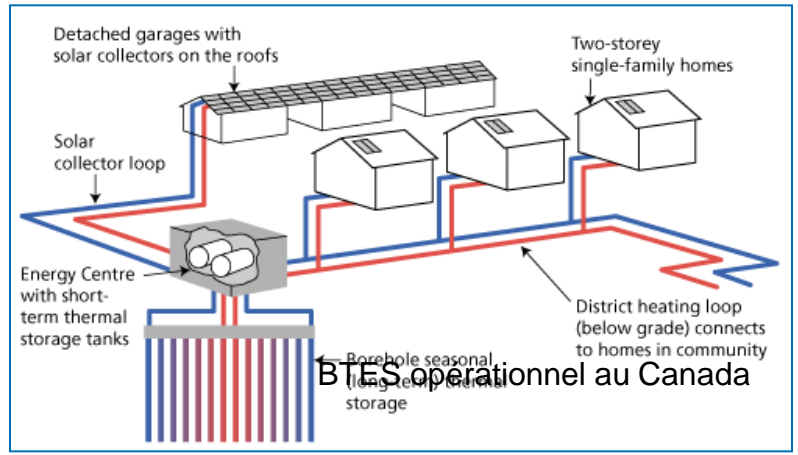


32 MW lithium-ion battery for a 98 MW wind farm (US)

34 MW NAS alongside 51 MW Wind Farm



La chaleur



BTES opérationnel au Canada



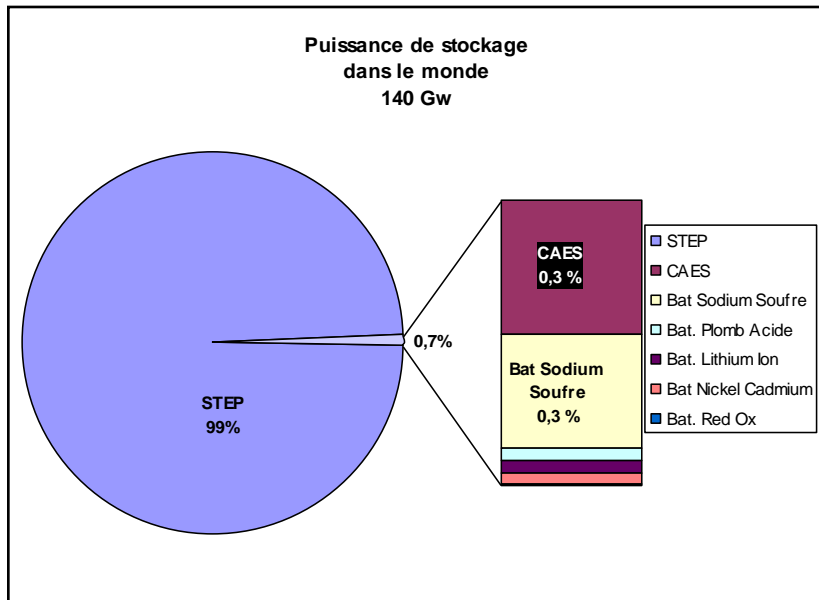
Tour solaire PS 10, près de Séville (10 MW), qui utilise des sels fondus comme fluide caloporteur et comme moyen de stockage

Les caractéristiques des technologies de stockage

eneq		Gamme de puissance	Capacité disponible	Temps de décharge	Cyclabilité (Durée de vie)	Temps de réaction	Efficacité
Stockage gravitaire	STEP Terrestres	100 MW - 1 GW	1 GWh - qq 100 GWh	qq h - qq 10h	(> 40 ans)	qq s - qq min	70 - 85 %
	STEP Souterraines	100 MW - 1 GW	qq GWh	qq h - qq 10h	(> 40 ans)	qq s - qq min	70 - 80 %
	Tube Hydraulique souterrain	100 MW - 1 GW	1 MWh - qq 100 MWh	qq 10 min - qq h	(> 30 ans)	qq s - qq min	75 - 80 %
	STEP Marines	10 - qq 100 MW	100 MWh - qq GWh	qq h	(> 30 ans)	qq s - qq min	70 - 80 %
Stockage à air comprimé	CAES Conventionnel	qq 100 MW	100 MWh - 10 GWh	qq h - qq 10h	(> 30 ans)	qq min	< 50 %
	CAES Adiabatique	qq 100 MW	100 MWh - 10 GWh	qq h - qq 10h	n/a	qq min	> 70 %
	CAES Hydro-pneumatique	10 kW - qq 10 MW	1 MWh - qq 100 MWh	qq h	(> 20 ans)	qq s - qq min	70 - 85 %
	CAES sous-marrin	qq 100 MW	100 MWh - 10 GWh	qq h - qq 10h	(20 - 30 ans)	qq min	> 70 %
	Stockage à air liquide	qq 100 MW	1 MWh - qq GWh	qq h - qq 10h	(20 - 40 ans)	qq min	70 - 85 %
Stockage Thermique	Stockage thermique d'électricité	1 MW - qq 100 MW	10 MWh - 1 GWh	qq h	(20 - 30 ans)	n/a	70%
Stockage chimique	Hydrogène et Pile à combustible	1 kW - qq MW	qq 10 kWh - qq GWh	qq h - qq 10h	(5 - 10 ans)	qq s (à chaud) - qq min	25 - 35 % (visé: 40%)
Stockage électrochimique	Batterie Plomb-Acide (Pb-A)	1 kW - 10 MW	< qq 10 MWh	qq h	500 - 3000 c (5 - 15 ans)	qq ms	75 - 85 % (Avancé)
	Batterie Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	1 kW - qq MW	< qq 10 MWh	qq min - qq h	1000 - 5000 c (10 - 20 ans)	qq ms	60 - 70 %
	Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)	1 kW - qq 10 MW	< qq 10 MWh	qq h	2000 - 10000 c (10 - 20 ans)	qq ms	85 - 95 %
	Batterie Sodium-Soufre (Na-S)	qq 10 MW	qq 100 MWh	qq h	2000 - 5000 c (< 15 ans)	qq ms (à chaud)	75 - 85 %
	Batterie Métal-Air	n/a	n/a	qq h - qq 10h	100 - 300 c	qq ms	0,5
Stockage électrochimique à circulation	Batterie Red-Ox Zinc-Bromine (Zn-Br)	< 1 MW	< 10 MWh	qq h - qq 10h	2000 - 5000 c (=10 ans)	qq ms	65 - 75 %
	Batterie Red-Ox Vanadium (VRB)	qq MW	qq MWh	qq h - qq 10h	> 12000 c (10 - 20 ans)	qq ms	70 - 80 %
Stockage électrostatique	Super-condensateurs	1 kW - qq MW	qq kWh	qq s - qq min	> 500000 c	qq ms	90 - 95 %
Stockage électromagnétique	Inductances supra-conductrice	1 kW - qq MW	qq kWh	qq s - qq min	(20 - 30 ans)	qq ms	> 90 %
Stockage inertiel	Volant d'inertie (Basse Haute Vitesse)	100 kW (HV) - qq MW	1 kWh - qq 10 kWh	qq min (BV) - qq h (HV)	≈ 100000 c (> 15 ans)	qq ms	> 90 %

Puissance de stockage par technologie

Projections à 10 et 20 ans



Source : ENEA, 2011

	Puissance (GW)		
	2012	2022 (1)	2030 (2)
STEP	130.5	158	160
CAES	0.7	25	133
Chaleur	1.4	6	
Batteries	1.5	60	140
Autres	0.3	20 ?	

Sources : (1) Visiongain 2012 et IEA 2012
(2) BCG 2010

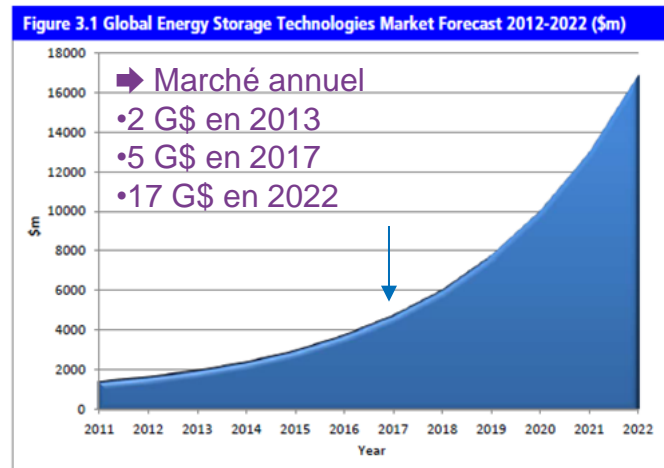
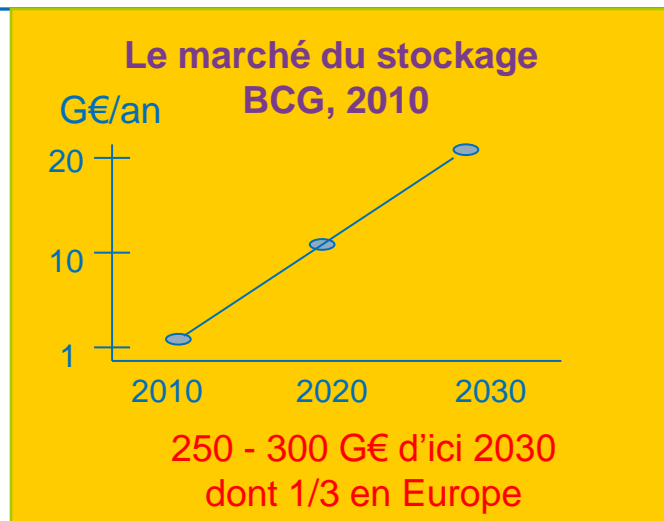
Mis à part les besoins en grosse capacité qui devraient continuer à se développer (12 GW supplémentaires en STEP prévus en Europe d'ici 2022, essentiellement dans l'arc alpin), les microgrids et le stockage local et résidentiel semblent constituer les segments les plus rapidement accessibles, économiquement et sociologiquement parlant, et les plus attractifs pour répondre aux besoins des zones isolées, mal connectées et des pays en voie de développement.

Evaluation du marché global

➔ Eléments bibliographiques

- Business Green estime que le marché cumulé du stockage d'énergie pourrait atteindre 500 G€ d'ici 2030
- Pike Research prévoit un marché cumulé de 122 G€ d'ici 2020
- BCG un marché stationnaire annuel de 10 G€ en 2020 et cumulé de plus de 250 G€ d'ici 2030
- Visiongain envisage un marché annuel de 5 G\$ en 2017 et 17 G\$ en 2022 (avec démonstrateurs)

➔ Un développement prévisible soutenu du marché mondial du stockage avec un décollage dès 2017

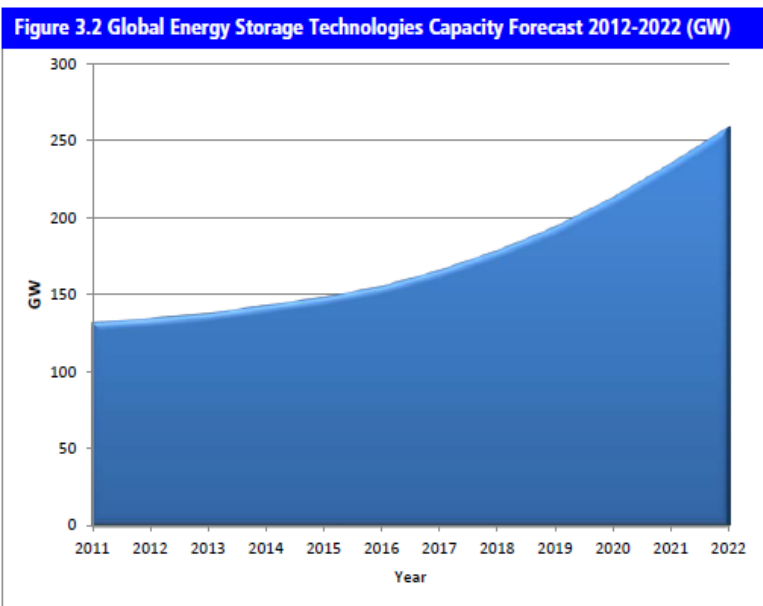


Source: Visiongain 2012



Le marché du stockage par technologie

➔ Croissance 2012-2022 évaluée à + 125 GW (134 en 2012 ; 259 en 2022) , correspondant à un investissement de 70 G\$, dont 17,5 G\$ en Europe



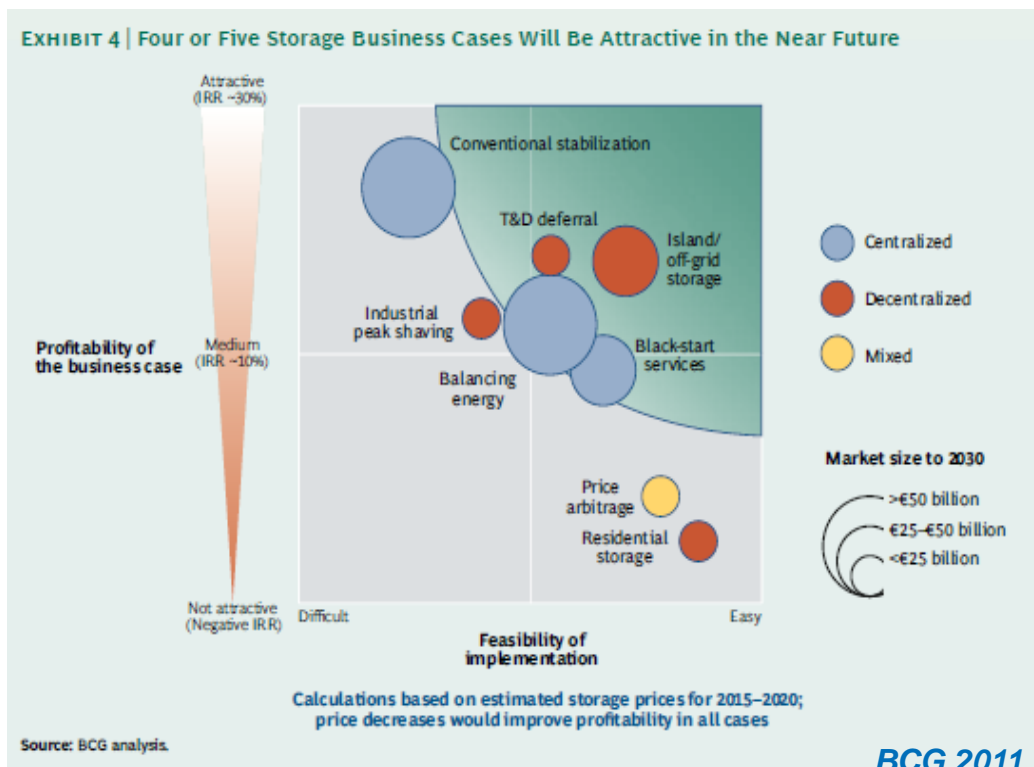
Source: Visiongain 2012

	Capacités		Investissements	
	(%)	(GW)	(%)	(G\$)
STEP	20	25	10	7
CAES	20	25	17	12
Batteries (toutes)	45	56	30	21
Autres	15	19	43	30

Une vision du marché par service

Trois domaines d'application seraient plus particulièrement concernés d'ici à 2030 par le développement du stockage d'énergie (source : BCG 2011) :

- **Equilibrage d'énergie** avec lissage de la production et de la pointe
➔ plus de 50 G€ (cumulés)
- **Stockage en zones non connectées et isolées**
➔ 25 à 50 G€ (cumulés)
- **Black Start et traitement des congestions**
➔ 25 à 50 G€ (cumulés)



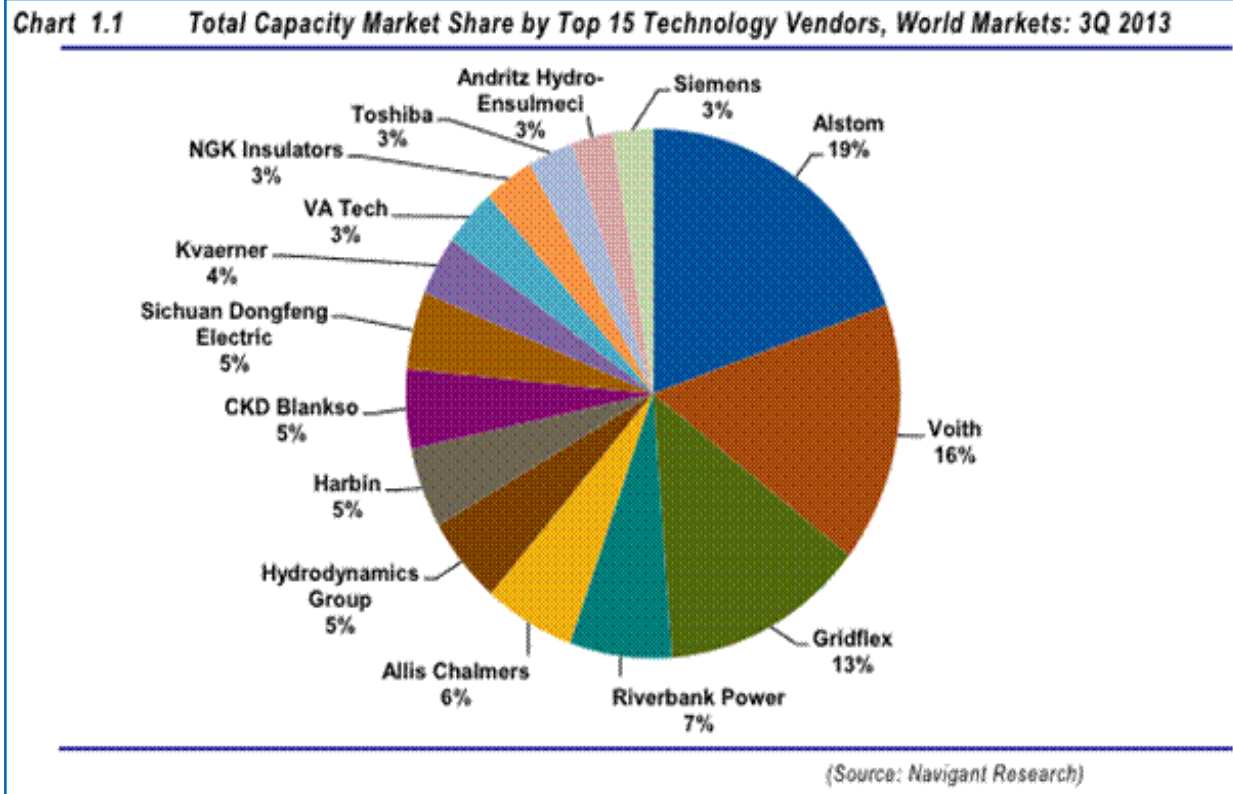
Les Acteurs actuels du marché

Une étude récente (Aout 2013) de Navigant Research montre que le français Alstom serait leader avec 19% du marché, suivi par l'allemand Voith avec 16% puis l'américain Gridflex avec 13%.

Ces trois compagnies sont positionnées sur les STEP.

(+10 GW installés entre 2007 et 2012)

Les asiatiques travaillent majoritairement sur le développement de batteries.



Le coût du stockage/services/technologies

Technology	Total cost (\$/kW)	Cost ((\$/kWh)
Bulk Energy storage to support System & EnR integration plusieurs 100t MWh		
STEP	1500-4000	250-430
CAES underground	960-1250	60-120
Na-S batteries	3200 moy	500-550
Adv. Lead-acid batt.	2000-5000	425-1000
Vanadium Redox	3100-3700	620-740
Zn/br Redox	1450-1750	300-350
Adv. Redox (Fe/Cr – Zn/air)	1450-1900	300-380
Energy storage for Frequence regulation & EnR integration de 0,5 à 10 MWh		
Flywheel	1950-2200	7800-8800
Li-ion Batt	1085-1550	4350-6200
Adv. Lead-acid batt.	950-1590	2770-3800

Technology	Total Cost (\$/kW)	Cost ((\$/kWh)
Energy storage for T&D grid support applications de qq MWh à 10z MWh		
CAES aboveground	1950-2150	390-430
Adv. Lead-acid Batt.	2000-4600	625-1150
Na-S batteries	3200-4000	450-550
Zn/Br Redox batt.	1670-2015	340-1350
Vanadium Redox	3000-3300	750-830
Adv. Redox (Fe/Cr – Zn/air)	1200-1900	325-1500
Li-ion Batt.	1800-4000	900-1700
Energy storage for commercial & industrial applications de 01. à qq MWh		
Adv. Lead-acid batt.	2800-4500	700-460
Na-S batteries	3200-4000	450-550
Zn/Br Redox batt.	2200-2500	440-480
Vanadium Redox	2400-3000	900-1250
Li-ion Batt	3000-4400	950-1900

Source : EPRI 2010

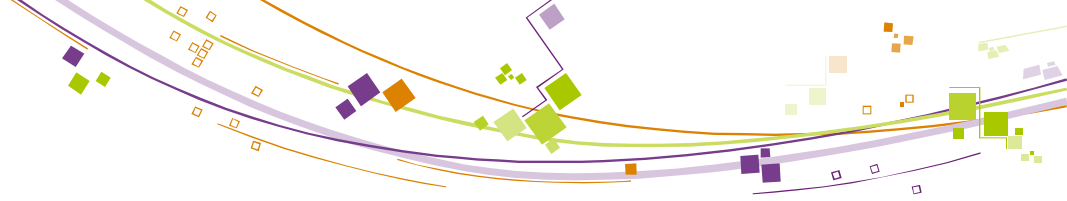
Le coût d'une même technologie peut ainsi varier considérablement en fonction du service (taille/cyclage) de quelques centaines (STEP et CAES) à quelques milliers de \$ par kWh suivant l'application

Le développement du stockage massif d'énergie reste conditionné par différents facteurs

- Un besoin de régulation et de législation avec une forte hétérogénéité des cadres réglementaires européens (Allemagne, France, Italie, Suisse) et un contexte réglementaire de plus en plus favorable aux Etats-Unis
- Un besoin de réduire les coûts tout en atteignant un degré de rentabilité acceptable : Le cadre financier permettant de faire décoller le marché n'est pas encore clair et les business models du stockage d'énergie restent à trouver
- Un intérêt croissant des pouvoirs publics nationaux et européens sur ce sujet avec un financement adéquat
- ...

Les éléments de décision pour réaliser une installation de stockage

- la taille du besoin : local, territorial, national ou européen
- l'emprise géographique / écologique du moyen : barrages, cavités, paysages , pollution ...
- la temporalité des marchés et les clients (quand ?pour qui?)
- les investissements versus les services rendus
- les coûts de maintenance et la durée de vie (ROI)
- les considérations économiques de l'énergie (prix des MP...)
- les décisions politiques (C02, gaz de schistes...)
- le contexte réglementaire
- Etc...



ANNEXES



Innovater les énergies

www.ifpenergiesnouvelles.fr