

Facts & Figures

LE STOCKAGE D'ENERGIE

ENJEUX, SOLUTIONS TECHNIQUES ET OPPORTUNITES DE
VALORISATION

Mars 2012

ENEA Consulting est une société de **conseil en énergie et développement durable pour l'industrie**. ENEA intervient en conseil stratégique, en accompagnement à l'innovation et aux projets ainsi qu'en tant qu'expert et formateur sur ces sujets.

La présente publication s'inscrit dans la politique de partage des connaissances essentielles d'ENEA, dont l'objectif est de présenter les clés de compréhension des grands enjeux de la transition énergétique et du développement durable.

Elle est le fruit de l'expérience des experts d'ENEA sur la thématique du stockage d'énergie (notamment au travers de nos prestations d'accompagnement et de conseil d'acteurs industriels) et de recherches spécifiques en interne.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage à l'Identique 2.0 France License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.

STOCKER L'ÉNERGIE : UN BESOIN EN FORTE CROISSANCE



Contexte : pourquoi stocker de l'électricité ?

L'équilibre offre / demande d'électricité, nécessaire au fonctionnement des réseaux électriques, est aujourd'hui de plus en plus fragile. Le réseau est conçu pour résister à un certain nombre d'aléas : climatiques par exemple pour la consommation (en France, une baisse de 1° C de la température en hiver entraîne une augmentation de la puissance appelée de 2,3 GW), pertes d'ouvrages pour la production, etc.

Le recours croissant à des solutions de production intermittentes d'électricité, éolien principalement, constitue une source de fragilité supplémentaire. Les fluctuations de production, dictées par les aléas météorologiques, sont indépendantes de la consommation. Il faut donc gérer des situations nouvelles : surproduction d'électricité en période de faible consommation, moyen de production sur lequel on ne peut pas compter en période de pointe.

La volatilité accrue des prix de l'électricité est un indicateur de ces tensions. Le 8 février 2012, un pic de 102 GW de consommation atteint en France a porté ponctuellement à 2 000 € le prix du MWh sur les marchés. A l'inverse, des épisodes de prix négatifs à -500 €/MWh ont été observés en Allemagne en 2010, causés par des surplus de production éolienne.

Face à ces tensions, différentes solutions dites *compensatoires* peuvent être mises en œuvre.

Le recours à des **moyens de production de pointe flexibles**, comme les centrales à gaz ou à fioul, est une option largement utilisée aujourd'hui. Néanmoins, la pénétration des énergies intermittentes à *coût marginal de production nul* affecte la rentabilité de ces moyens flexibles en faisant diminuer leur durée d'appel, par effet de décalage sur le *merit order*¹.

Les **interconnexions** sur les réseaux de transport et de distribution amortissent les fluctuations par effet de *foisonnement*. Les projets de nouvelles lignes sont cependant très coûteux et se heurtent à des problèmes d'acceptabilité, en témoignent les 14 ans de négociation pour la ligne France-Espagne, avec un coût final sept fois supérieur aux prévisions.

La **maitrise de la demande en énergie (MDE)** permet d'adapter la consommation aux fluctuations de production, notamment grâce aux contrats d'effacement qui interviennent en périodes de pointe et aux solutions de communication entre les outils de production et les postes de consommation (*smartgrids*). Efficace pour les gros consommateurs, la MDE nécessite un déploiement massif et coûteux d'outils (comptage et communication) pour toucher les particuliers.

Le **stockage d'énergie** est une solution transverse et complémentaire. Certes la filière manque de maturité, mais les avantages sont multiples :

- Un gain environnemental lié au déverrouillage du déploiement à grande échelle d'énergies décarbonées, ainsi qu'en cas de remplacement de centrales thermiques (voir p. 15)
- La capacité d'apporter des réponses centralisées ou décentralisées pour des contraintes locales ou globales
- Une indépendance vis-à-vis des ressources fossiles, avantage économique sur le long terme car une augmentation des prix de ces ressources et de celui du CO₂ est prévisible.

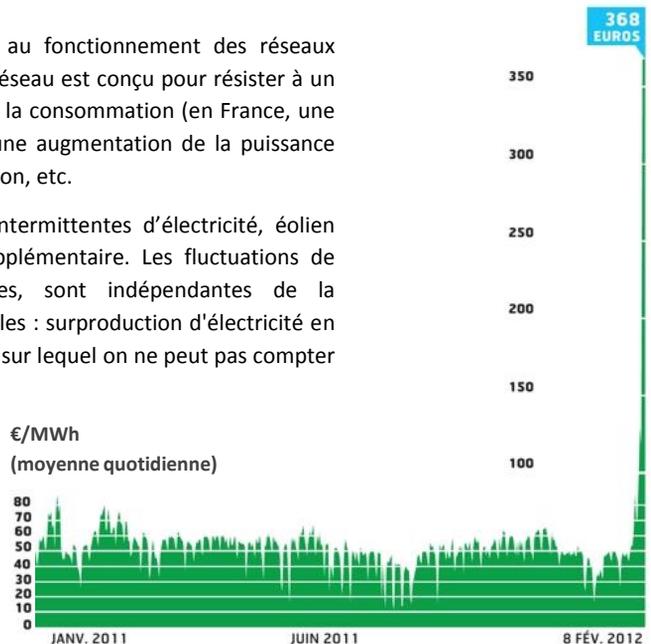


Figure 1 : Prix de l'électricité sur la Bourse Epex Spot pour livraison au lendemain (source : Les Echos, 09/02/12)

¹ Merit order : Modèle d'appel des moyens de production d'électricité disponibles par ordre de coûts marginaux de production croissant

STOCKER L'ÉNERGIE : UN BESOIN EN FORTE CROISSANCE



Le stockage d'énergie : solution technique et opportunité économique

Le stockage d'énergie répond à **un besoin technique** : c'est un atout indispensable à long terme pour permettre la décarbonation du mix électrique décidée par les politiques publiques, européennes notamment.

Le stockage d'énergie représente également **un levier économique** : c'est un moyen de tirer parti de la volatilité du marché de l'électricité pour générer des bénéfices, ou réduire les coûts induits par la consommation d'électricité. L'ensemble des acteurs ayant la possibilité de stocker de l'énergie (industriels, collectivités ou particuliers) peuvent tirer partie de cette opportunité.

Cette dualité besoin technique / opportunité économique crée aujourd'hui un contexte particulièrement favorable au déploiement de solutions de stockage d'énergie.



Contraintes et opportunités réglementaires

Pour éviter que les contraintes réseaux ne deviennent un obstacle à la pénétration des énergies renouvelables, certains Etats font évoluer le cadre réglementaire favorablement aux solutions de stockage. En Californie par exemple, les cahiers des charges de nouveaux projets de production d'énergie intermittentes comportent une obligation de stockage. En France, le dernier appel d'offre éolien pour la Corse et les DOM-TOM mentionne explicitement une contrainte relative au stockage d'énergie pour une meilleure intégration au réseau.

Ces nouvelles législations offrent un cadre nécessaire au développement de la filière. Encore en gestation à ce jour, ces cadres réglementaires ont deux conséquences :

- **L'arrivée d'une nouvelle contrainte** pour les producteurs d'énergies intermittentes,
- **La naissance d'une nouvelle opportunité**, avec notamment la création d'un cadre législatif (loi NOME²) permettant de donner une valeur à la puissance mise à disposition sur le réseau (voir ci-dessous).



Une opportunité réglementaire : loi NOME et mécanisme de capacité

Dans son article 6, la loi NOME prévoit la mise en place d'une obligation de capacité pour les producteurs d'électricité, leur imposant de justifier d'une capacité physique de production égale à la puissance nécessaire à la fourniture de leurs clients. Cette obligation devrait également s'assortir de la naissance d'un marché de capacité, ceci à horizon 2017.

Une nouvelle valeur sera ainsi attribuée à la puissance rendue disponible par le stockage d'énergie, en procurant à ses détenteurs des certificats de capacité à valoriser sur un marché. Les modalités exactes ne sont pas encore connues, mais c'est une source de gains qui viendra s'ajouter aux revenus liés à la vente d'énergie. Un scénario de double valorisation de la capacité de stockage (puissance de charge et de décharge) aurait même un effet catalyseur pour la filière.

² NOME : Nouvelle Organisation des Marchés de l'Electricité

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



Comment stocker de l'énergie ?

Sauf dans des cas bien particuliers, il est difficile de stocker directement l'électricité. Il faut dès lors la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable :

Mécanique : Cette catégorie regroupe les voies les plus connues de stockage à grande échelle, les STEP³ (voir focus p. 6) et les CAES⁴ (voir focus p. 13). Elle inclut aussi les volants d'inertie, les accumulateurs hydrauliques, et plus généralement tout type de stockage d'énergie potentielle ou cinétique.

Electrochimique : Les batteries. C'est la voie la plus connue du grand public, les batteries ayant de nombreuses applications quotidiennes (véhicules, téléphones portables...). Cette catégorie comprend aussi les batteries à circulation (dont batteries Red-Ox), basées sur le même principe mais dont les solutions actives sont contenues dans des réservoirs séparés, permettant ainsi de gérer la capacité énergétique indépendamment de la puissance de la batterie. Les technologies de batteries sont multiples et possèdent des caractéristiques très variables.

Thermique : De nombreuses solutions de stockage de froid (glace, liquides cryogéniques) et de chaud (sels fondus, accumulateurs de vapeur, graviers ou billes à changement de phase...) existent et permettent de stocker l'énergie sous forme thermique (chaleur latente, chaleur sensible) avant de la restituer, le plus souvent directement sous forme de chaleur ou de froid, mais aussi parfois sous forme électrique.

Electrostatique/magnétique : Certains systèmes permettent de stocker l'énergie directement sous forme électrique : les condensateurs, qui permettent d'accumuler des électrons. Les SMES⁵, eux, la convertissent en énergie magnétique.

Chimique : Il s'agit d'utiliser l'électricité pour constituer un composant chimique, une molécule, qui a ensuite la capacité, en brûlant ou via une pile à combustible par exemple, de restituer de l'énergie. L'hydrogène et le méthanol en sont deux exemples.

Utilité : Le stockage d'utilité au sein d'un procédé permet de concentrer en heures creuses la consommation d'électricité liée à la production d'un produit intermédiaire (oxygène ou azote liquide par exemple), qui peut être stocké à bas coût et sera consommé ultérieurement (voir p. 12).



Choisir la forme de l'énergie

La forme de stockage la plus adaptée au cas particulier considéré dépendra de l'usage final (électricité parfois, mais aussi souvent chaleur, espèce chimique, utilité...).

Convertir l'énergie stockée en électricité, pour la retransformer ensuite en une autre forme d'énergie, est rarement la solution la plus efficace.

Il est par exemple possible d'éviter les pertes liées à une conversion électrique inutile en utilisant directement un stockage de chaleur pour répondre à des besoins de ce type.

³STEP : Système de Transfert d'Énergie par Pompage.

⁴CAES : Compressed Air Energy Storage.

⁵SMES : Superconduction magnetic energy storage. A très basse température, les matériaux supraconducteurs permettent de stocker de l'électricité dans des boucles, le courant pouvant y tourner indéfiniment puisque soumis à aucune perte.

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Focus technologique : Les STEP – Système de Transfert d'Énergie par Pompage

Le principe : L'eau d'un réservoir aval est pompée vers un réservoir amont pendant les périodes creuses, permettant ainsi de stocker l'énergie sous forme gravitaire. Lors des périodes de pointe, l'électricité est réinjectée sur le réseau par l'opération inverse, le turbinage.

Principal atout : Les STEP sont des solutions de stockage à grande échelle, pouvant déplacer des quantités massives d'énergie. Leur longue durée de vie (40 ans) en font l'un des moyens de stockage les moins coûteux. En France, elles sont à ce jour valorisées comme moyen d'arbitrage sur les marchés de l'électricité.

Principal inconvénient : la nécessité de trouver un site géographique adapté, réunissant deux bassins superposés, rend la construction de nouvelles STEP de plus en plus difficile et coûteuse. Les meilleurs sites sont utilisés en premier, d'où une raréfaction des capacités disponibles et une augmentation des coûts de construction. A cela viennent s'ajouter les problématiques d'acceptation sociétale, inhérentes à toute nouvelle mise en eau de réservoirs. En France, le potentiel restant est de 7 GW, mais il est peu probable qu'il puisse être un jour totalement exploité.

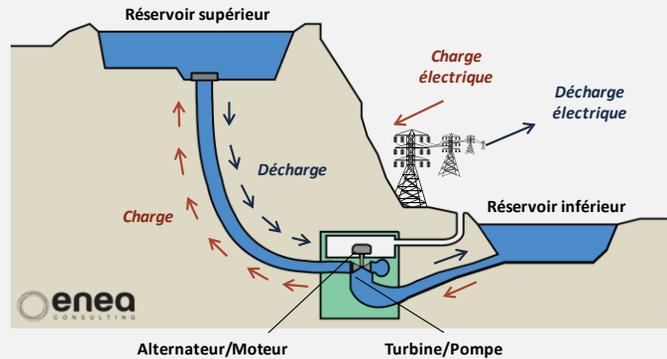


Figure 2 : Schéma de principe d'une STEP à conduit souterrain

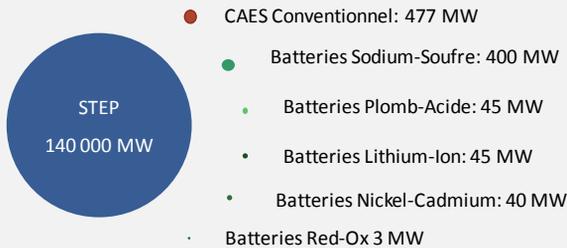


Figure 3 : Puissances de stockage installées dans le monde
(Source: EDF R&D)

Dans le monde : Plus de 100 GW sont installés, répartis sur environ 380 ouvrages qui couvrent plus de 99% des capacités totales de stockage d'électricité aujourd'hui. Ce taux est appelé à baisser du fait de la diversification des moyens de stockage, avec notamment la construction de batteries de grande capacité, 40 GW étant prévus d'ici 2030 (notamment au Japon et aux USA).

Les développements futurs : Dans le monde, 60 GW sont planifiés d'ici 2013, principalement en Asie. En Europe, 27 GW supplémentaires sont prévus d'ici 2020.

Les technologies de pompes à vitesse variable deviennent aujourd'hui la norme, augmentant la flexibilité des STEP qui peuvent désormais fournir de nouveaux services (réglage de fréquence, réglage de tension, etc.).

Afin de s'affranchir des contraintes de sites, des réflexions sont menées sur de nouveaux types de STEP. Le concept de STEP marine pourrait s'avérer intéressant, notamment dans une perspective de couplage avec des moyens de production offshore éoliens : la mer est utilisée comme réservoir inférieur et le réservoir supérieur est situé à proximité de la côte, avec un dénivelé acceptable. Une STEP marine de 30 MW existe déjà au Japon, à Okinawa.

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



De nombreuses solutions en développement

Le degré de maturité de diverses technologies de stockage est présenté ci-dessous (figure 4). Nombre d'entre elles sont encore au stade de R&D. Les STEP sortent du lot en réunissant à ce jour 99% de la puissance de stockage installée dans le monde (voir p. 6).

Les choix technologiques dépendent de nombreux paramètres, nécessitant une analyse précise pour chaque situation. De fait, chacune des technologies s'avèrera adaptée à un usage particulier. C'est la raison pour laquelle de nombreuses pistes de R&D sont actuellement explorées, avec le soutien de programmes gouvernementaux d'envergure comme celui du DoE⁶ américain ou du NEDO⁷ au Japon.

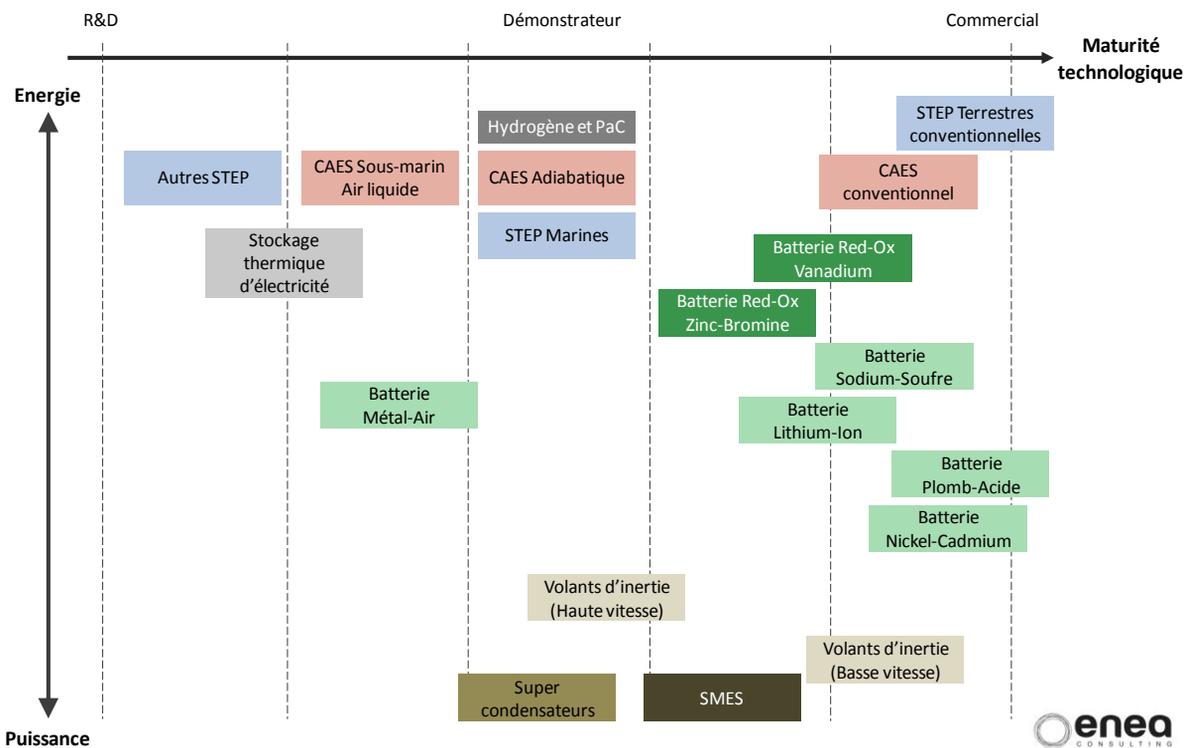


Figure 4 : Niveau de maturité technologique des différents moyens de stockage d'électricité

Typologie des moyens de stockage d'électricité

Stockage gravitaire	Stockage chimique	Stockage inertielle
Stockage à air comprimé	Stockage électrochimique	Stockage électrostatique
Stockage thermique	Stockage électrochimique à circulation	Stockage électromagnétique

⁶ DoE : Department of Energy

⁷ NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



Le choix des technologies de stockage

Pour comparer les technologies de stockage et déterminer les plus pertinentes pour un usage particulier, plusieurs facteurs techniques doivent être pris en compte. En particulier, pour le stockage stationnaire d'électricité :

- La **puissance disponible** (en MW) et la **capacité énergétique** (en MWh). La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière.
- Le **temps de réaction** est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système.
- L'**efficacité**, définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en MWh_{OUT}/MWh_{IN}).
- La **durée de vie**, qu'il est parfois préférable de définir en **nombre de cycles** de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries.

Pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme la densité énergétique (en MWh/kg ou en MWh/m³) pour la mobilité par exemple.

Le graphique ci-dessous positionne les technologies selon leurs temps de décharge et puissance typiques.

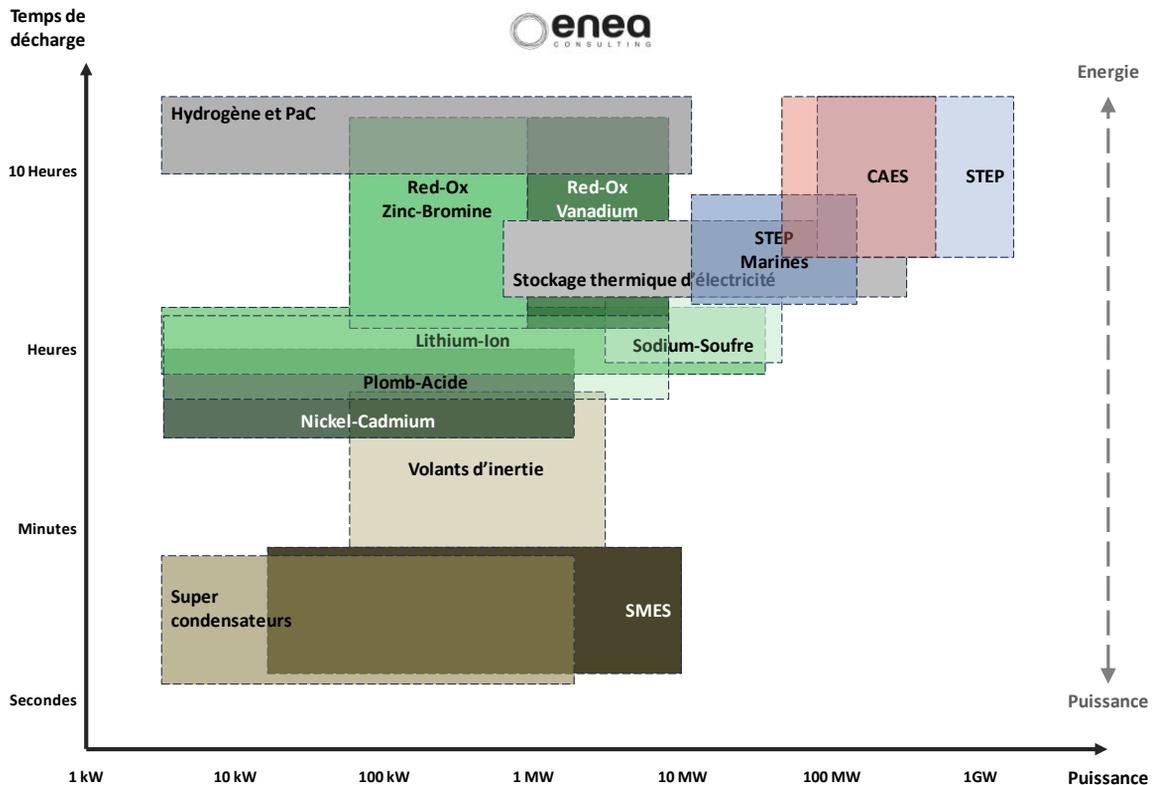


Figure 5: Cartographie des moyens de stockage stationnaire d'électricité selon leurs temps de décharge et puissance typiques

SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



Quelles technologies à quels coûts?

L'étude comparative des différentes solutions de stockage ne peut se faire sans étudier avec attention les données économiques. Pour chaque technologie, les coûts d'investissement (CAPEX), que l'on peut décliner en termes de puissance ou d'énergie, ainsi que les coûts d'opération (OPEX), sont à prendre en compte. En outre, il convient de tenir compte des coûts de remplacement (et de fait, des fréquences de remplacement) des technologies telles que les batteries.

La diversité des technologies multiplie les structures de coûts associées. Les STEP, par exemple, sont très capitalistiques, tandis que les batteries ont des coûts élevés de remplacement. Pour certains systèmes, la puissance coûte cher (les batteries à circulation par exemple), tandis que pour d'autres c'est la capacité énergétique (les supercondensateurs par exemple).

Afin de comparer de façon pertinente les coûts réels des solutions de stockage, il est essentiel d'intégrer les paramètres d'usage (durée de vie, fréquence de sollicitation, etc.). Le caractère émergent de la filière et le manque de retour d'expérience soumettent cette analyse à des incertitudes encore significatives.

Les données technico-économiques chiffrées pour les principales technologies de stockage stationnaire d'électricité sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les coûts d'investissement, issus d'une analyse de la littérature actuelle, sont fournis à titre indicatif et sont à observer avec précaution au vu de l'évolution rapide des technologies.

	Capacité disponible	Gamme de puissance	Temps de réaction	Efficacité	Durée de vie	CAPEX puissance (€/kW)	CAPEX énergie (€/kWh)
STEP	1 – 100 GWh	100 MW – 1 GW	s - min	70 – 85 %	> 40 ans	500 – 1 500	70 – 150
CAES	10 MWh – 10 GWh	10 – 300 MW	min	50 % (1 ^{ère} gén.) 70 % (AA-CAES)	> 30 ans	400 – 1 200	50 – 150
Hydrogène et Pile à Combustible	10 kWh – 10 GWh	1 kW – 10 MW	s - min	25 – 35 %	5 – 10 ans	6 000	< 500
Batteries Sodium-Soufre	< 100 MWh	< 10 MW	ms	75 – 85 %	2 000 – 5 000 cycles	500 – 1 500	150 – 500
Batteries Lithium-Ion	< 10 MWh	< 10 MW	ms	85 – 95 %	2 000 – 10 000 cycles	1 000 – 3 000	300 – 1 200
Batteries Red-Ox Flow	< 100 MWh	< 10 MW	ms	65 – 80 %	2 000 – 12 000 cycles	500 – 2 300	100 – 400
Volants d'inertie	5 – 10 kWh	1 – 20 MW	ms	> 90 %	100 000 cycles	500 – 2 000	2 000 – 8 000
SMES	1 – 10 kWh	10 kW – 5 MW	ms	> 90 %	20 – 30 ans	300	> 10 000
Super condensateurs	1 – 5 kWh	10 kW – 5 MW	ms	90 – 95 %	500 000 cycles	100 – 500	10 000 – 20 000

Figure 6 : Comparaison de différentes technologies de stockage (liste non exhaustive). Les valeurs présentées sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatif.

OPPORTUNITES DE VALORISATION



La nécessité de raisonner par services

Au-delà du coût des technologies, l'heure est aujourd'hui à la recherche de rentabilité économique, condition *sine qua non* au développement de la filière. Ce constat impose de raisonner par services : les voies de valorisation sont multiples, et spécifiques à chaque type d'acteur. L'identification précise des besoins permet de définir les services adaptés, puis de faire les choix technologiques en fonction des paramètres dimensionnants (ratio énergie/puissance, réactivité nécessaire, fréquence de sollicitation...).

Quels services pour quels acteurs ?

Différents acteurs trouveront des bénéfices à stocker de l'énergie (voir le détail p. 11). Les producteurs d'électricité y verront par exemple un outil d'arbitrage sur les marchés de gros (voir ci-contre). Les consommateurs industriels peuvent de leur côté minimiser la puissance électrique souscrite auprès de leur fournisseur. Pour les gestionnaires de réseau, la plupart des services système (réglage de fréquence, de tension...) peuvent être fournis par le stockage d'électricité.

Cumuler les services pour résoudre l'équation économique

Des voies de valorisation nouvelles apparaissent avec la pénétration des énergies intermittentes. Le couplage du stockage d'énergie avec un moyen de production d'électricité intermittente permet de consolider la puissance installée, ou de lisser les fluctuations court terme dues aux aléas météorologiques.

De manière générale, la gamme de services potentiellement fournis par le stockage d'énergie n'est encore que partiellement exploitée, notamment du fait du vide réglementaire qui subsiste aujourd'hui (voir p. 4).

La recherche de voies de valorisation multiples est la clé pour parvenir à la rentabilité économique.



Une première voie de valorisation : l'arbitrage sur les marchés de l'énergie

Les déséquilibres entre l'offre et la demande d'électricité se traduisent sur les marchés de gros par des écarts de prix entre les périodes de pointe et les périodes creuses.

Le stockage d'énergie permet à un producteur de bénéficier d'un gain en flexibilité grâce auquel il peut choisir d'injecter sur le réseau l'électricité lorsque son prix est élevé, ou au contraire d'en soutirer lorsque son prix est plus bas. C'est aujourd'hui la principale voie de valorisation du stockage d'énergie.

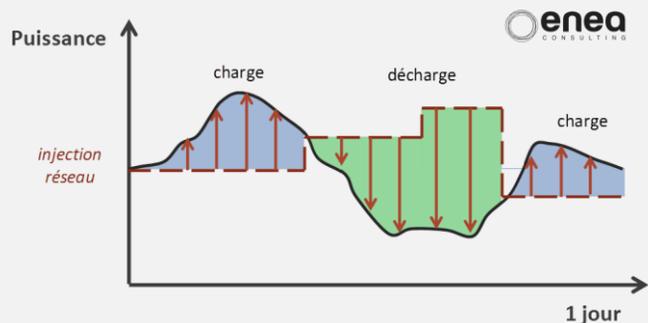


Figure 7 : Illustration d'un processus d'arbitrage : report de production d'électricité journalière grâce au stockage

STEP, CAES, H₂ ou stockage thermique sont adaptés à un tel arbitrage à l'échelle de la journée ou de la semaine.

Les incertitudes élevées sur les évolutions du marché de l'électricité impactent négativement les décisions d'investissement reposant sur la valorisation de ce service : c'est aujourd'hui le cas pour deux STEP aux Pays-Bas totalisant 1,3 GW de puissance installée et une capacité de 16 GWh ; la rentabilité économique est encore trop incertaine pour valider la construction.

OPPORTUNITES DE VALORISATION

Territoires

- Intégrer le stockage d'énergie comme composante d'une stratégie de développement des énergies intermittentes
- Sécuriser l'approvisionnement énergétique du territoire et diminuer sa dépendance aux énergies fossiles
- Générer le consensus autour d'une politique énergétique cohérente sur le plan environnemental
- Créer un tissu industriel sur un secteur innovant et en pleine émergence

Gestionnaires de réseau

- Optimiser économiquement ses infrastructures en reportant les investissements de renforcement du réseau
- Intégrer la production d'énergie intermittente en s'assurant d'une fourniture stable d'électricité
- Sécuriser les prévisions d'équilibre d'offre / demande en optimisant les capacités de pointe et d'effacement
- Disposer de services systèmes plus efficaces mettant à profit les performances des moyens de stockage

Producteurs dispatchables⁸

- Mettre à profit le stockage comme outil d'arbitrage sur les marchés de l'énergie
- Optimiser le dimensionnement de ses installations en couplant production et stockage
- Anticiper les futures obligations de capacité et profiter de la mise en place du marché d'échanges
- Se prémunir contre les risques économiques moyen et long terme (augmentation du prix des énergies fossiles et du CO₂)

Producteurs intermittents

- Anticiper les contraintes réglementaires sur l'obligation de stockage pour les producteurs intermittents
- Consolider sa puissance installée dans l'optique de participer au futur marché de capacités
- Développer les synergies technologiques entre moyens de productions intermittents et stockage d'énergie pour accroître sa compétitivité

Consommateurs

- Trouver un optimum économique à sa consommation d'énergie en intégrant le stockage au cœur de son activité et de ses procédés
- Générer des revenus d'effacement grâce aux dispositifs actuels et anticiper la mise en place du marché de capacités
- Sécuriser son approvisionnement en énergie et s'assurer de la qualité d'alimentation pour ses installations

Figure 8 : Valeur et enjeux du stockage d'énergie pour les acteurs clés du développement de la filière en France

⁸Dispatchable : qualifie les moyens de production d'électricité pouvant s'adapter de manière flexible aux contraintes d'appel du réseau (centrales gaz, fioul, etc.), en opposition aux moyens de production d'énergie fatale ou à certains moyens de production de base moins flexibles

OPPORTUNITES DE VALORISATION



Intégrer le stockage d'énergie aux procédés – le stockage d'utilités

Les technologies de stockage électrique disponibles aujourd'hui sont encore souvent trop chères ou pas assez matures. D'autres solutions ingénieuses peuvent parfois être trouvées, combinant rentabilité et faisabilité technique dès aujourd'hui.

Intégrer le stockage d'énergie aux procédés industriels

De nombreux procédés industriels contiennent des étapes consommatrices d'énergie qui pourraient se prêter à du stockage d'utilité. L'intérêt, du fait des faibles variations dans les coûts de l'énergie, était jusqu'alors relativement faible, voire inexistant. Aujourd'hui cependant, il est possible d'utiliser ce potentiel comme levier d'efficacité économique et de flexibilité opérationnelle. Le procédé le plus emblématique est probablement le stockage d'air comprimé au cœur du fonctionnement d'une turbine à gaz : ce sont les CAES. (voir focus p. 13). Mais c'est un principe qui peut s'appliquer à nombre de procédés mettant en jeu de l'électricité.

Bien que ces solutions de stockage ne correspondent pas à du stockage d'électricité, il s'agit bien de stockage d'énergie, qui permet d'agir sur les profils de consommation d'électricité et participe à la maîtrise de la demande.

Exemple : Le captage du CO₂ émis par les centrales à charbon est un procédé très gourmand en électricité : jusqu'à un tiers de l'électricité produite peut être ainsi autoconsommée pour la purification des fumées. Certaines méthodes utilisent des composés chimiques, les amines, pour capter le CO₂ ; un chauffage permet ensuite de régénérer les molécules en libérant le CO₂ pur, étape très énergivore. Une solution envisagée est de stocker les amines contenant le CO₂ pendant les heures de pointe, quand le besoin d'électricité est maximal, pour les régénérer ensuite en heures creuses, quand l'énergie est moins chère. Cette solution, jugée encore trop coûteuse aujourd'hui, n'en ouvre pas moins la voie à un tout nouveau type de réflexion sur le sujet.



Points clefs pour l'intégration du stockage à un procédé industriel

Identifier de telles solutions demande une maîtrise des procédés industriels en jeu ainsi que des principes techniques qui sous-tendent les technologies de stockage. Il faut faire preuve de créativité, tout en gardant le pragmatisme économique et technique nécessaire à toute application industrielle.

Les clefs pour le succès d'une telle intégration sont :

- Sélectionner les procédés fonctionnant de préférence de manière intermittente
- Identifier les éléments stockables
- Minimiser l'ajout d'étapes procédés
- Utiliser l'énergie présentant la forme et la qualité la plus adaptée et la moins coûteuse
- Identifier les contreparties (perte de souplesse opérationnelle, limites dans la capacité de prédiction des besoins pour dimensionner le stockage, nouvelles pertes associées à la décorrélation de procédés jusqu'ici intégrés)
- Optimiser les modes d'opération de l'outil de stockage
- Identifier toutes les voies de valorisation du procédé ainsi modifié qui, combinées, permettront d'assurer une rentabilité suffisante pour déclencher l'investissement :
 - Tirer parti des variations de prix de l'électricité
 - Eventuellement être rémunéré pour fourniture de services au réseau.

OPPORTUNITES DE VALORISATION

Focus technologique : CAES – Compressed Air Energy Storage

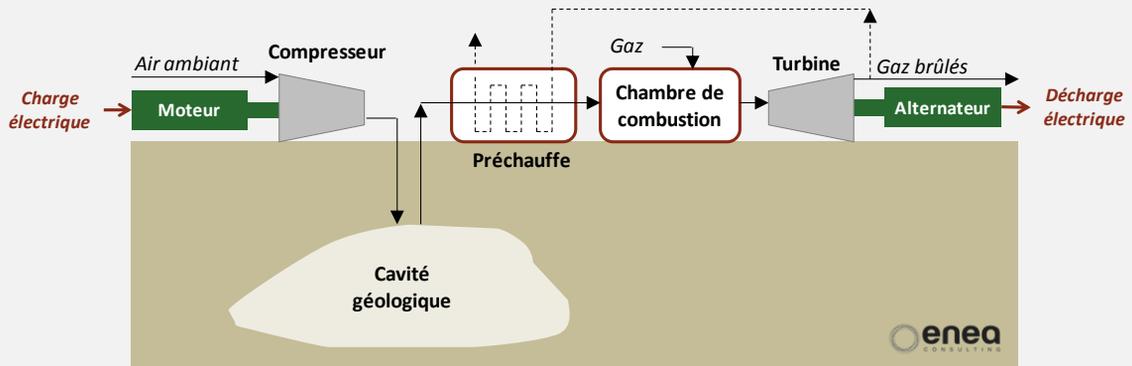


Figure 9 : Schéma de principe d'une installation CAES souterrain

Le principe : Stocker de l'air comprimé en heure creuse pour le délivrer en heure de pointe.

L'idée : Une turbine à gaz utilise environ un tiers de sa puissance pour comprimer l'air à l'entrée, puissance qui dès lors n'est pas vendue au réseau. Choisir de perdre cette puissance en heure creuse plutôt qu'en heure de pointe permet de faire des économies substantielles : c'est un bon exemple d'intégration d'un stockage d'énergie dans un procédé industriel, en tirant parti d'une étape de compression très coûteuse en énergie mais inévitable. Le stockage permet de décorrérer la consommation électrique de son utilisation. Ici, c'est grâce à une caverne souterraine (ou en réservoirs de surface pour les petites installations) qui peut contenir une quantité suffisante d'air comprimé. S'agissant de cavernes creusées, les contraintes de site sont bien moindres que pour des stockages de gaz naturel ou de CO₂ par exemple, qui eux sont stockés dans la porosité des roches. Il est donc possible d'en construire quasiment partout, à des coûts variant de 0,5 à 25 €/kWh.

Les coûts d'investissements des CAES sont compétitifs avec les coûts des STEP ; ils varient entre 400 et 1200 €/kW. Aujourd'hui, deux unités CAES sont en fonctionnement, une à Huntorf (Allemagne) de 290 MW et une seconde en Alabama (Etats-Unis) de 110 MW ; d'autres unités sont à l'étude.

Principal inconvénient : Contrairement au cas de la turbine à gaz, la chaleur des gaz post-compression est perdue. Le rendement global du système est alors inférieur à 50%.

Les solutions : Le AA-CAES, (*Advanced Adiabatic CAES*) intègre un système de stockage thermique pour récupérer ces flux de chaleur lors de la phase de compression. Le AA-CAES nécessite encore un effort de recherche pour diminuer les coûts du stockage thermique. Un premier pilote de 2,7 GW est prévu pour 2013 en Ohio (Etats-Unis).

OPPORTUNITES DE VALORISATION



Un cas particulier de stockage d'utilité : le stockage thermique

Le stockage thermique est un cas particulier de stockage d'utilité, mature, et capable de répondre aux besoins des industriels, des bâtiments tertiaires, et même des particuliers. L'exemple le plus probant est sans doute le stockage diffus dans les ballons d'eau chaude pour l'habitat. Stocker l'eau chaude durant les périodes creuses permet d'éviter les surconsommations d'électricité lors des périodes de pointe. De manière similaire, des solutions de stockage de froid efficaces existent pour les besoins en climatisation des bâtiment collectifs, ou pour la production de froid industriel (voir ci-dessous).

Le stockage thermique peut aussi être utilisé pour réguler la production de certaines sources d'énergie renouvelable. Les centrales solaires thermodynamiques à concentration peuvent être adossées à un moyen de stockage thermique qui leur permet de stabiliser leur production d'électricité.

Des améliorations et des innovations sont bien sûr attendues, mais des solutions matures, économiques, existent d'ores et déjà. Qu'il s'agisse de froid ou de chaleur, ces solutions, basées sur le stockage de glace, d'eau chaude, de sels fondus ou de matériaux à changement de phase, sont disponibles et commencent à se généraliser.



Zoom sur le stockage de froid : les matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase solide-liquide, comme de l'eau, stockent le froid la nuit pendant les heures creuses pour le restituer en heures pleines, durant la journée.

Utilisé pour la réfrigération industrielle ou la climatisation collective en complément de groupes froid, ce système permet d'optimiser la facture énergétique en évitant de soutirer de l'électricité de pointe. C'est également un moyen de limiter les investissements du fait de la diminution de la puissance des équipements de production de froid. Enfin, l'impact environnemental peut être réduit dans les cas où l'électricité de pointe est plus carbonée que l'électricité de base.

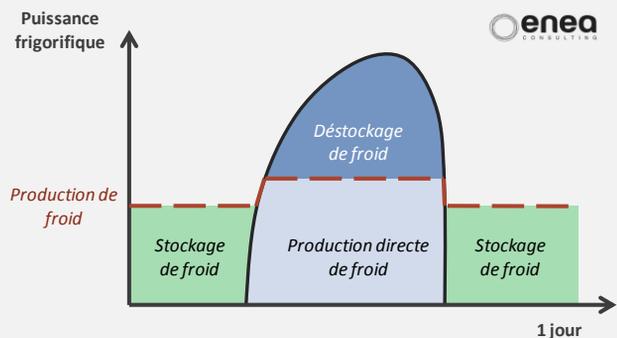


Figure 10 : Illustration de l'impact du stockage de froid pour limiter la production frigorifique pendant les périodes de pointe

Les systèmes de stockage de froid disponibles sont abordables, à 1500 €/kW et 250 €/kWh. Leur efficacité est élevée (de l'ordre de 90% et plus).

AU-DELA DE L'ÉCONOMIE : UN IMPACT GLOBAL



Le stockage d'énergie, élément clé d'un mix énergétique décarboné

Au-delà des intérêts techniques et économiques, le stockage d'énergie s'inscrit dans une stratégie globale pour parvenir à un mix énergétique décarboné.

Le déploiement à grande échelle des énergies intermittentes ne pourra se faire sans le développement lié de solutions compensatoires. Le recours actuel à des moyens de production émetteurs de CO₂ pour pallier les aléas de production d'énergie renouvelable est à long terme peu compatible avec le but recherché. Le couplage des énergies intermittentes renouvelables et du stockage trouve tout son sens dans une recherche de cohérence environnementale des politiques énergétiques.

A court terme, ces deux types de solutions compensatoires s'avèreront complémentaires. Les centrales thermiques flexibles gagneraient en effet à être couplées à des solutions de stockage : le fonctionnement des turbines en régime partiel affecte leur rendement et accroît les facteurs d'émission de gaz à effet de serre ; par ailleurs, des démarrages et arrêts trop fréquents impactent leur durée de vie. Combiner production fossile et stockage d'énergie constitue ainsi une voie d'amélioration à la fois opérationnelle et environnementale.

Plus généralement, le contenu CO₂ de l'électricité produite dépend des moyens de production appelés pour suivre la demande. De fait, la sollicitation des moyens de production fossile pour la semi-base et la pointe peut entraîner une augmentation des émissions de CO₂, notamment lors de périodes de forte consommation. Stocker l'électricité à faible contenu carbone en période creuse (à l'échelle du producteur ou du consommateur) pour l'utiliser en période de pointe permet de limiter les émissions de CO₂ de la production électrique. La valeur de ce gain environnemental sera déterminé par le mix énergétique propre à chaque territoire.

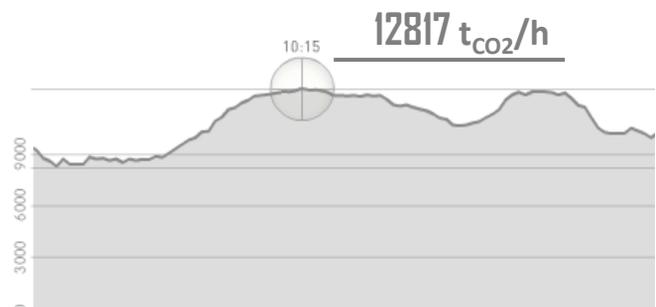


Figure 10 : Contenu carbone de l'électricité en France pendant la journée du 8 février 2012 (Source: RTE)

De manière plus prospective, il est légitime de se poser la question de la prise en compte des projets de stockage dans le cadre des mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto (Mise en Œuvre Conjointe et Mécanisme de Développement Propre).

AU-DELA DE L'ECONOMIE : UN IMPACT GLOBAL



Impact social : Rôle du stockage d'électricité pour l'accès à l'énergie dans les PED⁹

Sur le terrain, la faiblesse des solutions actuelles de stockage est depuis bien longtemps un frein à l'accès à l'énergie pour le développement. Si des solutions utilisant des énergies renouvelables sont déjà relativement accessibles, elles restent hors de portée des populations les plus défavorisées.



Figure 11 : Une école du projet « Lumière Par l'Ecole » mené par Electriciens Sans Frontières dans le nord du Sénégal, évalué par ENEA Consulting dans le cadre de son mécénat de compétences



Figure 12 : Batteries utilisées pour du battery-swap en Tanzanie par EGG-Energy, social business accompagné par ENEA Consulting sous forme de mécénat de compétences

Des batteries au plomb sont généralement utilisées, mais les remplacements fréquents complexifient l'équation économique pour les populations à faible revenu. La durée de vie de ces dernières est en outre fortement réduite par les climats chauds. Des systèmes plus performants permettraient de rendre les énergies renouvelables vraiment accessibles en zones décentralisées.

ENEA Consulting a par exemple étudié les opportunités de l'hybridation énergies renouvelables et de production hydrogène par électrolyse, en milieu rural décentralisé, afin d'améliorer l'accès à l'électricité, ou de fiabiliser les réseaux pour les services essentiels comme les hôpitaux notamment. Au-delà de leur coût bien trop élevé aujourd'hui, la fiabilité, la durée de vie et l'indépendance de ces solutions face à des réseaux souvent peu robustes sont des atouts suffisamment forts pour susciter l'intérêt des industriels et des acteurs de la société civile.

⁹PED : Pays En Développement

LE STOCKAGE D'ÉNERGIE AUJOURD'HUI



Ce qu'il faut retenir

Le marché de l'électricité de plus en plus volatil, les contraintes technologiques d'intégration des énergies intermittentes dans le réseau, et la nécessité d'un meilleur impact environnemental, plaident en faveur d'un développement du stockage d'énergie. Le stockage possède des atouts non négligeables et trouvera logiquement sa place en complément des autres solutions compensatoires (interconnexions, production flexible et maîtrise de la demande).

Cet enjeu concerne, de façon différenciée, tous les acteurs (producteurs et consommateurs d'électricité, gestionnaires de réseaux d'électricité). Pour chacun d'entre eux les choix technologiques différeront en fonction des besoins spécifiques identifiés et des services potentiels fournis par les solutions de stockage. Chaque système de stockage d'énergie présente ses propres avantages, inconvénients et gammes d'utilisation. Il est d'ailleurs important de réfléchir au stockage d'énergie et pas seulement d'électricité : le stockage d'utilités, thermique en particulier, représente une opportunité à saisir.

Le contexte actuel est particulièrement propice à une réflexion des acteurs sur le sujet du stockage, qui doit se baser sur une approche par services plutôt que par technologies. Il s'agit aujourd'hui de saisir les opportunités déjà rentables, mais aussi d'anticiper les évolutions technologiques, économiques et réglementaires à venir. Pour que ces évolutions voient le jour, des obstacles de natures diverses doivent être surmontés :

- Un travail législatif doit être mené pour créer l'environnement réglementaire propice encore manquant. Les réflexions actuelles autour du mécanisme de capacité français vont dans ce sens
- Certaines technologies poseront des problématiques d'acceptation sociétale qu'il convient d'anticiper dès maintenant
- Un effort de R&D est encore à fournir dans la plupart des familles technologiques pour parvenir à des solutions économiquement viables

Le stockage d'énergie constitue un levier technique difficilement contournable pour intégrer les moyens de production intermittents au sein d'un mix énergétique décarboné. Il représente également une opportunité économique pour nombres d'acteurs. Des premières solutions sont techniquement disponibles ; et l'évolution du contexte économique les rend de plus en plus rentables. De nombreuses innovations et des ruptures technologiques sont attendues dans ce secteur en devenir.

POUR EN SAVOIR PLUS :

Electricity storage association : <http://www.electricitystorage.org/>

Sandia National Laboratories : [*Energy storage for the electricity grid : benefits and market potential assessment guide*](#)

ENEA Consulting : [*Application des systèmes hydrogène pour les besoins du développement à horizon 2020-2025*](#)

Auteurs : Louis-Marie JACQUELIN, Olivier LACROIX, Mathieu BORDELEAU

contact@enea-consulting.com

Nous sommes



Une société de conseil indépendante, créée en 2007, agréée organisme de recherche et de formation.

Une équipe de 25 personnes aux parcours complémentaires : dirigeants de l'industrie, spécialistes de l'énergie et du développement durable, entrepreneurs, ingénieurs procédés.

Nos clients

- Producteurs et consommateurs d' énergie
- Industriels
- Investisseurs
- Ingénieries, Equipementiers
- Développeurs de technologies
- Institutionnels et Acteurs sociaux



CORPORATE



OPERATIONS

OFFRES



- Prospective énergie, environnement, société



- Filières émergentes



- Nouveaux marchés



- R&D et Innovation

- Investissement



- Management de l'énergie

- Ingénierie

- Expertise & formation

EXPERTISES TECHNIQUES



- Efficacité énergétique



- Valorisation de déchets



- Bioénergies & biocarburants



- Energies nouvelles

- Stockage d'énergie



- Captage & stockage du CO₂

- Hydrogène & PAC

- Ecologie industrielle

- Acceptabilité sociale

Notre engagement



Contribuer à l'accès à l'énergie pour tous :

- **1 500 jours de mécénat** réalisés, soit **45 missions**
- **25 partenaires**, des missions dans **18 pays**
- **15 rapports** d'étude diffusés librement
- Un **programme de R&D** sur la mesure d'impact