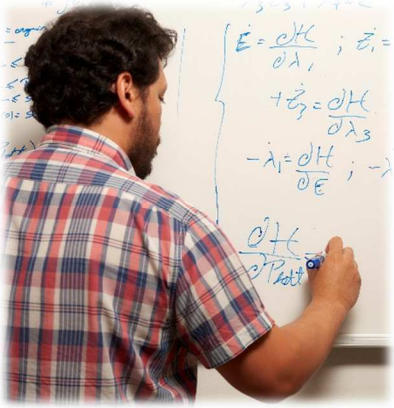
ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

DOSSIER DE PRESSE



STOCKAGE DE L'ÉNERGIE :

ENJEUX SCIENTIFIQUES & AVANCÉES DE LA RECHERCHE FRANÇAISE

ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'énergie (ANCRE) réunit :

quatre membres fondateurs

et quinze membres associés

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

SOMMAIRE

Table des matières

Le stockage, carrefour des enjeux énergétiques, climatiques et sociétaux 5

Identification des besoins en stockage & innovation 9

Où en est la recherche en France ? 16

Développement d'outils numériques pour l'opération du stockage au service de l'intégration des ENR : cas pratique des systèmes insulaires 17

L'hydrogène utilisé à des fins énergétiques : un secteur en plein essor 18

Développements IFPEN sur les batteries à circulation REDOX et le Stockage par Air comprimé AACAES 20

Le stockage souterrain de la chaleur comme composant d'un système énergétique local pour la décarbonation des bâtiments 21

Des technologies françaises prometteuses 22

Panorama des technologies de stockage 24

Mémo technique : principes généraux 32

Pour aller plus loin… 33

À propos de l'ANCRE 34

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Le stockage, carrefour des enjeux énergétiques, climatiques et sociétaux

Nos systèmes énergétiques sont en mutation. Nées de la prise de conscience d'une nécessité de préserver notre environnement et le climat, différentes transitions énergétiques s'opèrent partout dans le monde. De nombreux engagements – nationaux, européens et intergouvernementaux – ont été pris afin d'encourager cette évolution : comme la loi pour la transition énergétique et la croissance verte, le Paquet Énergie-Climat de la Commission européenne, les Accords de Paris (COP21) et récemment le Plan Climat *(cf. encadré)*. De nouvelles technologies accompagnent ces changements, mais celles-ci doivent encore bénéficier de progrès, que ce soit via des améliorations de leurs performances et des coûts réduits, ou pour en diminuer encore l'impact environnemental. Ces technologies ont bénéficié de plusieurs années de recherche mais de nouvelles ruptures technologiques seront nécessaires pour atteindre la neutralité carbone visée en 2050[1].

Qu'est-ce que le stockage ?

- Stocker l'énergie, c'est préserver ou emmagasiner une quantité d'énergie pour une **utilisation ultérieure**.
- L'énergie peut être stockée sous la forme d'énergie mécanique (hydraulique et air comprimé), électrique (supercondensateurs et stockage électromagnétique), thermique, chimique (hydrogène) et électrochimique (batteries)
- **Plusieurs étapes** successives de conversion de l'énergie, de sa récupération / captation à son stockage, puis à son utilisation, sont nécessaires.

En France, les organismes de recherche et les universités ont donc un rôle majeur à jouer en dotant la société civile et les acteurs économiques des outils et des technologies capables d'accompagner la mutation de nos usages énergétiques tout en assurant la préservation de notre environnement pour les générations futures.

Le principe de stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Ce paramètre est essentiel à la transition énergétique, car il permet de mobiliser les leviers concernant :

- la production d'électricité, responsable de 40 % des émissions de CO_2 dans le monde : le stockage de l'énergie doit permettre de mieux intégrer les énergies renouvelables (ENR)[2], souvent décentralisées et non programmables, au mix énergétique, de participer à l'équilibre de l'offre et la demande et d'apporter l'énergie nécessaire lors des pics de consommation.

[1] Objectif fixé en France notamment dans la feuille de route du Ministère de la transition écologique et solidaire

[2] En France, les ENR ont représenté près de 16 % de la quantité d'énergie consommée sur l'année 2016. En Europe, elles représentaient 4 % en 1990 et 16,5 % 2015, l'Union européenne ayant fixé l'objectif d'atteindre 20 % en 2020. Sources : site du Ministère de la transition écologique et solidaire, Ifri)

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

- la mobilité (premier secteur émetteur de CO_2 en France) : le stockage de l'énergie doit permettre de décarboner l'énergie utilisée par les transports[3] et les systèmes électroniques embarqués – de plus en plus prégnants dans tous nos usages.
- le bâtiment (premier secteur émetteur de CO_2 en Europe) : les stockages thermiques doivent permettre de décarboner la production de chaleur en hiver et de froid (climatisation) en été.

L'apport indispensable de la recherche française

La recherche doit répondre à ces enjeux en proposant des technologies de stockage performantes et durables, tenant compte des systèmes de gestion et distribution de l'énergie associés. Les compétences, ainsi mobilisées, couvrent des secteurs et applications très diversifiées : de la microélectronique à la thermique, en passant par l'électrochimie, l'hydrogène et la thermohydraulique. Mobilisant ces savoir-faire, les chercheurs s'attèlent à :

- augmenter les performances énergétiques des systèmes de stockage (capacité de stocker plus d'énergie, plus longtemps, avec des pertes réduites etc.) ;
- minimiser l'impact environnemental des technologies mobilisées (en réduisant – voire en s'affranchissant – des éléments critiques, les quantités de matériaux requis, les volumes et surfaces mobilisés, en favorisant le recyclage etc.) ;
- optimiser le modèle économique associé à chaque technologie et, *de facto*, favoriser leur démocratisation et leur essor sur le marché (limiter les coûts à l'investissement, atteindre une maturité facilitant l'industrialisation des processus, présenter des coûts de fonctionnement compétitifs etc.).

L'ampleur attendue de ces transformations, qui vise à s'assurer la soutenabilité de nos systèmes aux générations futures, constitue aussi un potentiel de valorisation économique auquel la recherche française contribue *via* des transferts de technologies aux industriels.

[3] Le secteur des transports est responsable de 80,7 % des émissions de CO_2 en France.

L'Alliance comme coordinatrice des compétences françaises

À travers ses nombreuses contributions[4] à l'élaboration des politiques publiques tant au niveau national qu'européen, l'Alliance veut promouvoir une communauté des sciences pour l'énergie et faire émerger les ruptures scientifiques et technologiques requises par la transition énergétique. Si le secteur des transports reste le premier émetteur de CO_2 en France, la nécessité de rupture technologique pèse particulièrement sur le stockage massif de l'énergie et le captage / stockage / recyclage du CO_2 par exemple.

Les experts et scientifiques français ont ainsi identifié, dès 2015, deux leviers indispensables pour atteindre l'objectif de limitation du réchauffement climatique à 2°C :

- l'importance, pour éviter l'émission de 40 à 50 milliards de tonnes de CO_2 en 2050, de mobiliser un portefeuille large de technologies. Plus d'une centaine ont été identifiées, dont le panel et l'ampleur du déploiement varieront suivant les groupes de pays ;
- la nécessité d'un effort sans précédent dans l'innovation et la recherche dans l'énergie, car les performances technologiques actuellement disponibles impliqueraient un investissement conséquent en cas de déploiement immédiat et un impact environnemental encore trop important.

© LGodart - CEA

« *Les communautés scientifiques françaises et européennes ont pour responsabilité de faire émerger les connaissances et les technologies qui permettront aux filières industrielles de participer à la transition énergétique mondiale. Dans ce but, l'alliance Ancre permet de décloisonner les travaux des principaux organismes et universités de notre pays, et d'éclairer les pouvoirs publics dans leur rôle de pilotage de la stratégie de R&D pour l'énergie. L'engagement de l'Ancre au service de cette double mission est essentiel au regard des enjeux climatiques : nous avons une responsabilité majeure vis-à-vis des générations futures.* »

Christophe Gégout, Président de l'Ancre

[4] Scénarios Decarbonization Wedges Wedges sur les technologies clés pour lutter contre le réchauffement climatique à l'échelle de la planète ; scénario énergétique élaboré pour la France à l'horizon 2050, construit sur les actions et objectifs chiffrés de la loi pour la transition énergétique et la croissance verte (LTECV) et de la Programmation pluriannuelle pour l'énergie (PPE).

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Les engagements de la France pour la transition énergétique

La COP21

Le premier accord universel pour le climat, approuvé par 195 États et l'Union européenne (196 délégations) le 12 décembre 2015, reconnaît la notion de justice climatique, tient compte pour chaque sujet de la responsabilité différenciée des pays et de leurs capacités respectives à la lumière des circonstances nationales. Il confirme l'objectif central de contenir l'augmentation de la température moyenne de la planète en deçà de 2 °C (voire 1,5 °C d'ici la fin du siècle), prévoit que les 100 milliards de dollars par an visés pour 2020 devront être un plancher pour l'après 2020 et qu'un nouvel objectif chiffré devra être défini au plus tard d'ici 2025.

Le Paquet énergie-climat 2030

En 2014, l'Union européenne a fixé trois grands objectifs pour 2030 : réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % (par rapport aux niveaux de 1990) ; porter la part des énergies renouvelables à au moins 27 % ; améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 27 %. Ce paquet constitue un prolongement du paquet énergie-climat 2020 (fixant les objectifs pour 2020).

La loi française de transition énergétique pour la croissance verte

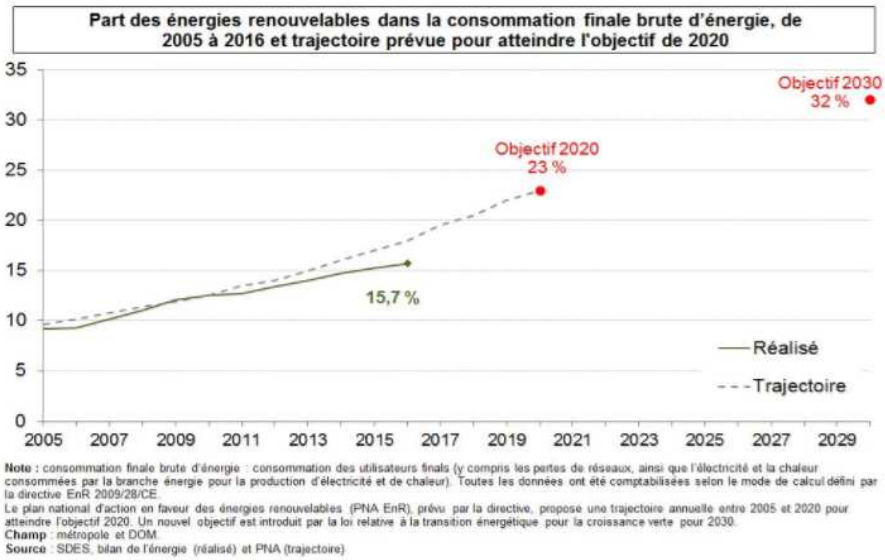
Parue au *Journal Officiel* le 18 août 2015, cette loi vise à permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement, fixant notamment la réduction : des émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 (puis 75 % d'ici 2050) ; de la consommation énergétique finale de 20 % en 2030 (50 % en 2050).

Plan Climat 2017

Avec le Plan Climat, lancé en 2017 par le Ministère de la transition écologique et solidaire, la France accélère l'application opérationnelle de l'Accord de Paris et dépassera ses objectifs initiaux à travers six axes :

- Rendre irréversible la mise en œuvre de l'Accord de Paris ;
- Améliorer le quotidien de tous les Français ;
- En finir avec les énergies fossiles et s'engager dans la neutralité carbone ;
- La France n°1 de l'économie verte ;
- Encourager le potentiel des écosystèmes et de l'agriculture ;
- Intensifier la mobiliser internationale sur la diplomatie climatique.

NB : selon les estimations de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) publiées le 6 octobre 2017, les particules fines continuent de provoquer le décès prématuré de plus de 400 000 Européens chaque année. (sources : Air quality in europe 2017)



Note : consommation finale brute d'énergie : consommation des utilisateurs finals (y compris les pertes de réseaux, ainsi que l'électricité et la chaleur consommées par la branche énergie pour la production d'électricité et de chaleur). Toutes les données ont été comptabilisées selon le mode de calcul défini par la directive EnR 2009/28/CE.
Le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables (PNA EnR), prévu par la directive, propose une trajectoire annuelle entre 2005 et 2020 pour atteindre l'objectif 2020. Un nouvel objectif est introduit par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte pour 2030.
Champ : métropole et DOM.
Source : SDES, bilan de l'énergie (réalisé) et PNA (trajectoire)

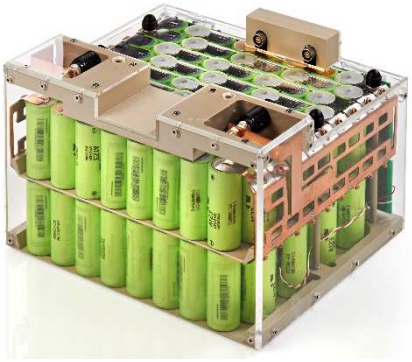
nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Identification des besoins en stockage & innovation

La capacité française de stockage est actuellement de l'ordre de 4,5 GW, essentiellement sous forme de stockage massif stationnaire via des stations d'énergie par pompage (STEP). À court terme, les développements attendus au niveau stationnaire sont déjà importants[5]:

- disposer d'une plus grande capacité de stockage massif sur plusieurs jours (estimations du besoin en stockage installé : + 1 à 1,5 GW) ;
- bénéficier d'une grande réactivité pour stabiliser à chaque instant l'offre et la demande sur le réseau (estimations du besoin en stockage installé : + 600 MW) ;
- doter rapidement les zones non interconnectées (comme les îles) pour un déploiement massif et rapide des énergies renouvelables (estimations du besoin en stockage installé : + 200 à 400 MW) ;
- accompagner l'essor de l'autoconsommation ;
- disposer de groupes énergétiques de secours décarbonés (en remplacement des groupes électrogènes).

À ces besoins stationnaires s'ajoutent les besoins pour la mobilité décarbonée, les véhicules électriques représentant 1,5 % du marché total actuel, en croissance de plus de 25 % / an[6].



Batteries lithium - module prototype RC1 – © D.Guillaudin/CEA

Quelles sont les critères clés d'une technologie de stockage ?

- La **capacité énergétique** : Quelles quantités d'énergie seront mobilisées ? Quelles pertes peuvent être tolérées ? Comment le système est-il approvisionné ?
- La **temporalité** : Sur quelle durée le système devra-t-il conserver l'énergie emmagasinée ? En combien de temps doit-il délivrer ou accumuler l'énergie souhaitée ?
- **D'autres paramètres** déterminent ensuite les options techniques possibles : l'impact environnemental, la rentabilité économique (de la fabrication à la fin de vie), l'espace disponible, le vecteur énergétique envisagé (électrique, chimique, thermique).

[5] Source : Association Technique Énergie Environnement
[6] source : AIE

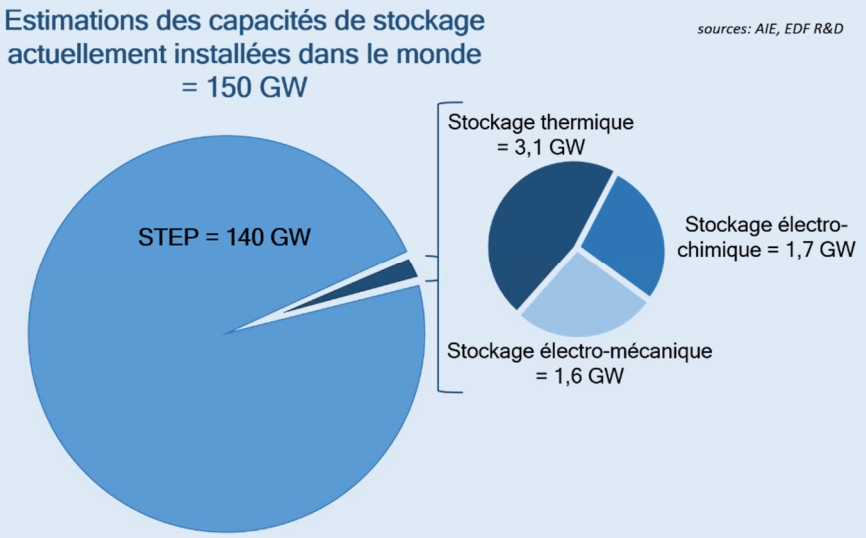
nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Quelques chiffres-clés du stockage d'énergie dans le monde (2016)

- **Capacité de stockage installée dans le monde : ≈ 150 GigaWatts** (équivalence : 100 millions de leds)

- **99 % de cette capacité sont des STEP** (Stations de transfert d'énergie par pompage, ou barrages). 3 000 GW de STEP permettraient de transférer 9 000 TWh de fossile en renouvelable

- **Situation du marché des batteries électriques :** 55 % de la production mondiale des batteries Li-ion est en Chine ; multiplication par 3 ou 4 du volume de marché des batteries d'ici à 2025 pour atteindre 300 GWh (90 GWh en 2016 hors batteries au plomb) - les États-Unis seront les principaux moteurs de cette croissance marché.



NB : attention aux unités !

MégaWatt (MW) = puissance, c'est-à-dire la capacité maximale théorique

MégawattHeure (MWh) = Densité d'énergie ou Puissance d'1 MW délivrée sur 1h.

Sources : Fraunhofer Institute, EPRI, EDF R&D; [Bloomberg New Energy Finance](#) ; [Novethic](#)

Les enjeux énergétiques stationnaires : faciliter le développement des moyens de production intermittents et augmenter l'efficacité des bâtiments

Le stockage est dit « stationnaire », par opposition au stockage embarqué pour les applications mobiles (batteries ou hydrogène pour les véhicules, les ordinateurs, les téléphones…). Les technologies de stockage d'énergie sont alors couplées à des centrales électriques ou thermiques au niveau du réseau électrique, font partie d'un dispositif d'autoconsommation à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier, et participent à l'autonomie énergétique d'îles.

Avec le déploiement des énergies renouvelables et de nouveaux usages, les besoins évoluent et amènent la communauté scientifique à rechercher des solutions technologiques pour :

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

- éviter le recours aux centrales thermiques émettrices de CO_2 en cas de pics de consommation (heures pleines, épisodes de froid intense ou prolongé) ;
- limiter les importations d'électricité et de sources fossiles lors de ces mêmes pics ;
- faciliter l'insertion des énergies renouvelables variables dans notre mix en rendant leur production plus prévisible et plus lisse ;
- éviter les phénomènes de congestion des réseaux électriques par un décalage de la consommation ;
- répondre aux besoins des sites isolés difficilement alimentés par les réseaux de distribution.

Le stockage stationnaire de l'énergie correspond aux besoins d'un bâtiment ou d'un territoire, raccordé à un réseau ou isolé. L'enjeu : pallier la variabilité des ENR pour permettre leur essor dans le mix énergétique, et diminuer les émissions de CO_2 et les importations.

Si certaines technologies de stockage sont d'ores et déjà matures et largement utilisées (STEP[7], ballon d'eau chaude), d'autres sont en cours d'industrialisation et nécessitent une phase de recherche et développement en vue d'apporter les améliorations nécessaires. D'autres pistes sont encore à l'étude en laboratoire, mais pourraient constituer les solutions de demain.

Les enjeux énergétiques dans la mobilité : décarboner le premier poste consommateur d'énergies fossiles en France

Les technologies de stockage embarquées ou mobiles sont généralement des dispositifs de petite capacité et de puissance moindre, en comparaison des systèmes stationnaires. Les transports constituent le premier poste concerné par les besoins de stockage d'énergie pour réduire l'impact environnemental de l'Homme par une substitution aux énergies fossiles ; cependant, l'électronique nomade (téléphonie par exemple) représente également un marché important pour les technologies de stockage d'énergie du fait de l'explosion de ses usages dans nos sociétés modernes. Les principaux enjeux concernent :

- la réduction du coût ;
- l'augmentation de la densité d'énergie (volumique et massique) ;
- l'augmentation de la puissance ;
- l'augmentation de la durée de vie (calendaire, en cyclage) ;
- et la sécurité.

Les besoins en stockage d'énergie pour la mobilité se situent dans le secteur des transports - le plus émetteur de CO_2 en France - et le marché de l'électronique nomade, dont les usages ont explosé et croissent.

[7] Stations de transfert d'énergie par pompage

Le déploiement actuel des technologies pour la transition énergétique dans la mobilité et l'enjeu du stockage en quelques chiffres[8]

		En 2017	Perspectives 2030
Véhicules…	… électriques	100 000	5 millions
	… à hydrogène	10	800 000
Stations de recharge…	… électriques	7 200, soit 20 000 points de charge	7 millions de points de charge (+ 62 000 en entreprises et 44 000 chez les particuliers)
	… à hydrogène	7	600

Les chercheurs travaillent également sur une double valorisation technique et économique des batteries des véhicules électriques : en plus de servir à la mobilité, ces batteries peuvent jouer le rôle d'appoint pour le stockage stationnaire aux réseaux lorsque le véhicule est stationné, apportant ainsi un moyen de flexibilité complémentaire pour le système électrique, avec une capacité de stockage estimée de 3 ou 4 TWh par an pour un parc de 4 à 5 millions de véhicules.

Impact environnemental

De la fabrication à la gestion de fin de vie du système, en passant par son fonctionnement, le stockage d'énergie doit garantir un impact environnemental neutre ou faible, et favoriser l'essor d'énergies non carbonées dans l'alimentation de l'installation ou du réseau concerné. Très peu d'études portent sur l'analyse des impacts environnementaux, la plupart concernant essentiellement les batteries. La nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage, éléments pouvant être polluants et difficilement retraités, entre également dans les critères de choix. L'impact environnemental d'une solution de stockage inclut :

- l'encombrement de l'installation ;
- l'implantation d'ouvrages dont l'emprise au sol peut être importante, et nécessiter des mises à disposition par les collectivités territoriales ;
- les risques de ruptures d'ouvrages (type STEP) qui nécessitent une qualité d'ingénierie et de surveillance sans défaut ;

[8] Sources : statistiques du Ministère de la transition écologique et solidaire (étude des transports ici); Ademe ; Comité des Constructeurs Français d'Automobiles ; statista ; Avere France.

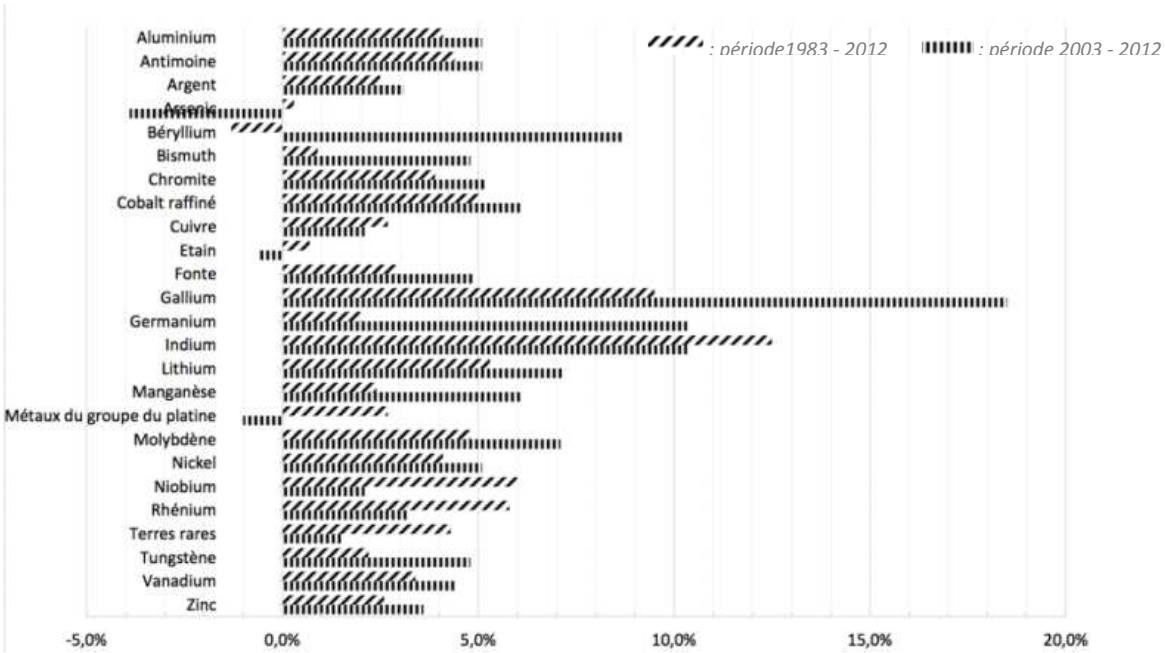
- les risques de pollution par les composants des systèmes de stockage électrochimique ;
- l'utilisation maîtrisée des éléments critiques.

Pour ce qui concerne la gestion de la fin de vie des batteries, la règlementation impose des taux de recyclage pour tous les accumulateurs[9].

Matériaux pour batterie - © Guillaudin/CEA

Quelques chiffres

- Une analyse de cycle de vie conduite sur les batteries à circulation au vanadium et les batteries plomb-acide a montré que le fonctionnement et le recyclage de l'accumulateur vanadium nécessite environ trois fois moins d'énergie que l'accumulateur au plomb. Les émissions de CO_2, CO et NOx sont en moyenne cinq fois moins élevées pour le vanadium que pour le plomb.
- En France, en 2008, 223 424 tonnes d'accumulateurs au plomb ont été traitées (dont 184 325 valorisées) et 4 008 tonnes d'accumulateurs au Ni-Cd ont été traitées (dont 2 790 valorisées).



Taux de croissance annuel moyen de la production mondiale de certaines matières premières minérales clés pour le secteur de l'énergie. Sources : Ressources minérales et énergie Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre)

[9] Parmi les accumulateurs étudiés, ceux qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont ceux au plomb et nickel-cadmium pour lesquels il existe des règlementations spécifiques, avec des taux de recyclage de : 65% en masse pour les accumulateurs au plomb ; 75% pour le Ni-Cd ; 50% pour les autres systèmes.

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Rentabilité économique & opportunités industrielles

Les options technologiques de stockage sont également évaluées à l'aune de leur impact économique : elles doivent permettre des économies d'énergie tout en représentant un investissement initial soutenable et des coûts d'entretien maîtrisés. Les coûts d'investissement restent élevés aujourd'hui – même s'ils doivent diminuer dans les 20 ans à venir, avec le développement de nouveaux matériaux et procédés, ainsi que *via* les effets de série. Au niveau du réseau électrique, des modèles doivent permettre de valoriser le stockage face à la concurrence des autres moyens de gestion des pointes de consommation, l'effacement et les cycles combinés à gaz, en prenant notamment en compte les investissements évités (possibilité de réduire le dimensionnement du réseau) ou la valorisation de services supplémentaires (réglage de la fréquence).

Pour se développer et être économiquement viable, le stockage d'énergie peut compter, en partie, sur la volatilité des prix de l'électricité : il s'agit de stocker l'électricité lorsqu'elle est la moins chère pour la redistribuer lors des pics de consommation. À ce premier segment de marché, d'autres sont également encouragés par des incitations réglementaires ou fiscales (subvention à l'équipement de véhicules électriques par exemple). Toutefois, les prix des énergies fossiles demeurent bas en l'absence d'un prix adapté du marché du carbone, ce qui constitue un obstacle à un déploiement plus massif des solutions décarbonées.

Quelques chiffres

- Estimations du marché du stockage (2010) : 1,5 - 4,5 milliards de dollars, largement dominé par les STEP. + 400 - 600 millions de dollars pour les batteries, super-capacités et volants d'inertie.
- Estimations marché du stockage (2020) : 16-35 milliards de dollars pour de nouvelles capacités installées (de 7 à 14 GW par an).
- Estimations des capacités de stockage dans le monde (AIE) : 100 GW (actuel) -> 200 GW (2050) si le taux d'insertion de l'éolien était de 15 %, voire 300 GW pour 30 % d'éolien (60 GW pour 15 % d'éolien et 100 GW pour 30 % d'éolien en Europe).

La rentabilité économique fait également entrer en compte la maturité technologique d'une solution de stockage. Parmi les différentes technologies disponibles, certaines ont atteint un stade plus abouti et plus mature.

- **Le stockage hydraulique**, via des STEP, est actuellement le plus répandu, mais cette technologie reste toutefois limitée par les sites d'installations possibles – les innovations portent ainsi sur l'installation de STEP en façade maritime (exemple : l'installation d'Okinawa au Japon), ou en sous-terrain.

- **Le stockage par air comprimé** (CAES) est également une technologie économiquement mature, en particulier pour les installations combinées à un système de stockage thermique, mais il n'existe pourtant que deux sites dans le monde[10] – des projets d'installation de deuxième génération (AACAES, pour *Advanced Adiabatic Compressed Air Storage*) sont en cours de développement, notamment en Europe avec le projet ADELE. Les autres pays s'orientent vers les CAES de surface et du stockage électrochimique.

- **Le stockage thermique** recouvre une variété de technologies plus ou moins abouties : la technologie du chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature et ne nécessite donc plus d'effort public de R&D, contrairement au stockage associé aux centrales thermodynamiques ou encore au stockage par réaction chimique qui, pour l'instant, n'existe qu'au stade de démonstrateur. Le volume du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en quantité de matériaux mobilisés. La durée de stockage visée est également un paramètre pouvant générer des surcoûts : le stockage saisonnier par chaleur sensible présente par exemple des pertes thermiques assez importantes du fait de la longue durée de stockage ; le stockage thermochimique est mieux adapté sur ce laps de temps, mais ne sera pas envisagé pour le stockage à court terme car moins rapidement réversible qu'un système sensible. Le stockage sensible peut malgré tout avoir un intérêt via le stockage souterrain (dans des aquifères naturels ou dans des roches dont les caractéristiques permettent de limiter les pertes) qui permet des grandes capacités.

[10] en Allemagne (280 MW) et aux États-Unis (110 MW), cf annexe 1

Où en est la recherche en France ?

L'ensemble des technologies disponibles se complète et doit permettre de réfléchir en termes de vecteur de stockage. Les différents vecteurs (thermique, électrique, chimique) peuvent se développer en parallèle et ainsi couvrir l'ensemble des besoins. Actuellement, en laboratoire, les équipes travaillent notamment à :

- optimiser et sécuriser les batteries électrochimiques pour les besoins dans les secteurs de la mobilité et du stationnaire : allonger leur durée de vie ; augmenter les densités d'énergie et de puissance, développer des électrolytes plus stables ;
- démocratiser le combustible hydrogène : optimiser le rendement énergétique des générateurs ; concevoir et fabriquer des catalyseurs sans métaux nobles (comme le platine, couramment utilisé) ; améliorer les systèmes de stockage solide ; augmenter la durée de vie des systèmes ;
- développer des outils numériques pour optimiser le fonctionnement de systèmes énergétiques complexes, comme celui des réseaux couplant sources de production ENR, systèmes de stockage en présence de consommateurs ;
- optimiser et sécuriser les stockages souterrains, notamment de chaleur.

Groupe électrogène hybrides batteries / hydrogène commercialisé par H2SYS © H2SYS

Installation de test et pilotage (BMS) sur le microgrid IFPEN, étude des systèmes de stockage Redox – © IFPEN

Institut national de l'énergie solaire (INES) – © Drone Savoie/CEA

Ancien carreau de mine avec le chevalement béton du puits Morandat qui deviendra la future ZAC exploitant le potentiel géothermique des eaux de mines. © BRGM

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

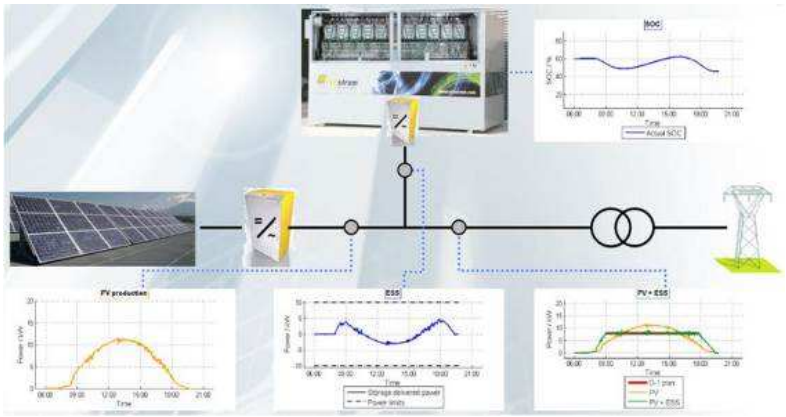
Développement d'outils numériques pour l'opération du stockage au service de l'intégration des ENR : cas pratique des systèmes insulaires

Le CEA déploie un important programme de recherches sur le stockage pour applications stationnaire et mobile. Il conduit en parallèle des travaux sur le développement des technologies batteries, hydrogène et thermique, et sur des outils de simulation permettant de modéliser le fonctionnement de systèmes énergétiques complexes associant sources de production ENR et systèmes de stockage. Dans le cas des systèmes insulaires, le déploiement massif des ENR est d'autant plus pertinent que les systèmes de production d'électricité existants sont largement basés sur des ressources fossiles carbonées et coûteuses. Toutefois, ces systèmes insulaires sont caractérisés par une étendue géographique limitée, qui accentue la variabilité de la production et son impact sur la fiabilité du système électrique. Ainsi, dans ce contexte, le couplage de systèmes de stockage à cette production ENR est indispensable à leur déploiement.

Avec de nombreux partenaires, le CEA conçoit et teste de nouveaux algorithmes et logiciels utilisés autant pour la simulation et le dimensionnement, que pour l'optimisation et le pilotage des systèmes de stockage. Ces différents développements sont déjà mis en œuvre dans différents projets liés à des systèmes insulaires existants (Grèce, Réunion, etc.).

- Le système énergétique de l'île grecque de Tilos, qui vise l'autonomie énergétique 100 % ENR, a bénéficié de l'expertise du CEA et de ses partenaires pour dimensionner et tester un couplage entre ses centrales solaires, éoliennes, des fermes de batteries et le micro-réseau de distribution de l'île. Les analyses effectuées sur un logiciel dédié à cette application ont permis de valider l'architecture du réseau de l'île. Ce même logiciel servira d'outil de pilotage pour le futur réseau. Ce projet permet ainsi à la communauté de se doter des systèmes de stockage batteries Li-ion testés courant février 2018 pour atteindre l'autonomie énergétique 100 % renouvelables. Une démarche identique a été entamée sur l'île de Marie-Galante (Guadeloupe).

- Un autre outil logiciel est actuellement déployé sur quatre installations en Corse, en Guyane et à la Réunion. Celui-ci collecte et analyse les données des différents composants de systèmes de stockage opérés avec une centrale photovoltaïque pour en suivre les performances au quotidien et prévoir ses éventuelles évolutions, aussi bien le vieillissement des composants que la modélisation d'amélioration dans le pilotage desdites installations. Un potentiel d'amélioration de 20 % de la performance globale du système ENR-Stockage a d'ores et déjà été démontré, via l'optimisation de ce système.



nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

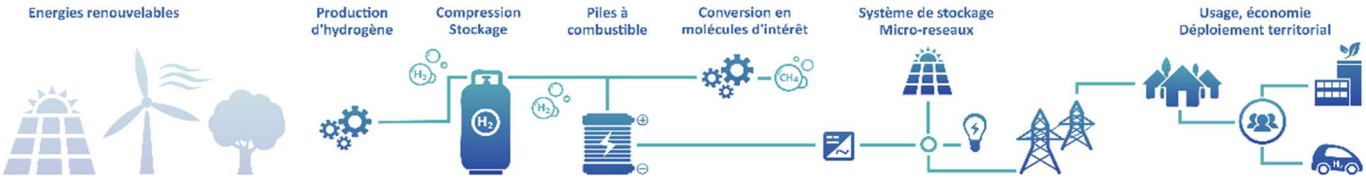
L'hydrogène utilisé à des fins énergétiques : un secteur en plein essor

L'hydrogène utilisé à des fins énergétiques, l'hydrogène-énergie, se développe aujourd'hui dans les principaux pays industrialisés. C'est en effet un vecteur énergétique qui n'émet pas de gaz à effet de serre (dont les émissions sont l'une des causes du changement climatique global) là où il est utilisé, et performant pour une variété d'usages (stockage massif des ENR, « décarbonation » des transports… *voir « Panorama des technologies de stockage / l'hydrogène p.19*).

Pour permettre son déploiement dans tous ces usages, il est nécessaire de produire de l'hydrogène sans carbone. Ainsi, pour le CNRS et les universités (fédérées par la CPU), l'hydrogène est un sujet majeur en termes de recherche mais également de valorisation, de création de valeur économique (soutien à des start-up) et de formation des acteurs de la filière. Dans cet esprit, le Groupement de recherche du CNRS "Hydrogène, systèmes et piles à combustible" fédère des chercheurs et des industriels couvrant les domaines de la production d'hydrogène, de son stockage, des piles à combustible et des systèmes. Le CNRS et les universités travaillent sur tous les maillons de la chaîne hydrogène : sa production, son stockage et son usage, notamment pour la mobilité.

On peut citer des projets concrets en relation avec l'hydrogène :

- *Projet ULHyS pour une approche systémique de l'hydrogène-énergie :* ULHyS est un programme de recherche lancé en 2016 au sein de l'I-SITE Lorraine Université d'excellence, qui vise à développer une approche systémique (science, innovation, société, économie, territoire) de l'ensemble de la filière hydrogène. Fédérant environ 40 chercheurs et 10 laboratoires, ce projet se concentre sur deux axes applicatifs : la mobilité hydrogène et le stockage d'énergie à l'échelle locale (habitat, tertiaire).



© CNRS/CPU

- *Projet ROAD, des semi-remorques à hydrogène :* Il s'agit de concevoir une semi-remorque de transport frigorifique à hydrogène. Le projet est porté par la société Chéreau, avec la participation des sociétés Malherbe, Carrier et Tronico, mais aussi le soutien scientifique des Arts et Métiers ParisTech et de la fédération de recherche CNRS-FCLAB[11], Institut FEMTO-ST (CNRS/UTBM/UFC/ENSMM). Le projet a débuté en 2016 et se terminera en 2019 par une démonstration de la semi-remorque en fonctionnement. Le groupe froid installé sur la semi-

© Chereau

[11] Elle regroupe des équipes de recherche de Franche-Comté, des laboratoires associés à l'IFSTTAR, ainsi que le laboratoire lyonnais Ampère (CNRS/EC Lyon/Université Claude Bernard Lyon 1/Insa Lyon), pour travailler ensemble dans le domaine des systèmes pile à combustible.

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

remorque est ici alimenté par un système pile à hydrogène, hybridé à des batteries et segmenté en puissance, de manière à augmenter son efficience énergétique et sa durabilité. Aujourd'hui, le design du système est terminé et les premiers essais du système pile à hydrogène débuteront mi-2018.

- *La start-up H2SYS*[12], des *groupes électrogènes à hydrogène) :* Issue de la fédération de recherche CNRS-FCLAB, H2SYS commercialise des premiers groupes électrogènes hybrides batteries/hydrogène, destinés à des marchés du secours, de l'événementiel, de la fourniture énergétique en site isolé ou en site contraint. L'innovation réside en particulier dans les systèmes de gestion et de pilotage des flux énergétiques, basé sur l'intelligence artificielle et sur les outils de diagnostic en ligne de l'état de santé de la pile à hydrogène.

[12] http://www.cnrs.fr/cnrsinnovation-lalettre/actus.php?numero=522

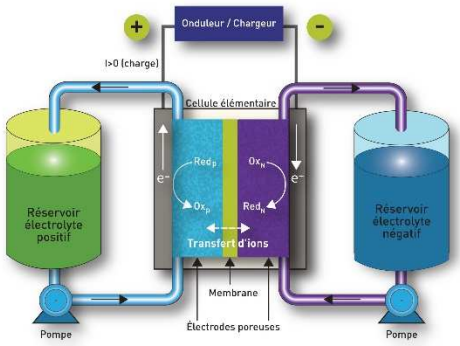
Développements IFPEN sur les batteries à circulation REDOX et le Stockage par Air comprimé AACAES

Les recherches d'IFPEN visent à faciliter l'insertion des renouvelables dans les réseaux électriques en identifiant au cas par cas les meilleures solutions de flexibilité et de stockage, au regard de critères techniques, économiques et environnementaux. IFPEN développe des solutions digitales de pilotage des systèmes énergétiques incluant du stockage (*Energy management system* - EMS), ainsi que des technologies complémentaires aux batteries Li-Ion, comme les batteries à circulation REDOX et le stockage avancé par Air comprimé AACAES.

- *Les batteries REDOX à circulation pour un stockage de longue durée*

IFPEN étudie la solution de stockage des batteries à circulation redox. Des électrolytes liquides stockent l'énergie sous forme électrochimique et circulent à travers des membranes échangeuses d'ions, générant ainsi de l'électricité par une réaction d'oxydoréduction. Ces batteries présentent l'avantage de pouvoir être dimensionnées en puissance et en énergie à façon, et d'une grande durabilité. L'enjeu majeur concerne la mise au point de nouveaux électrolytes moins coûteux et plus performants sur le plan énergétique. IFPEN s'intéresse donc à l'identification et la qualification d'électrolytes organiques innovants. Les travaux d'IFPEN incluent la compréhension des mécanismes et la modélisation multiphysique et multiéchelle de la technologie, en vue de son optimisation. Un système permettant la qualification de nouvelles technologies est actuellement en test sur un microgrid installé sur le site d'IFPEN à Lyon.

Principe de la batterie à circulation (redox flow battery)



- *L'air comprimé pour donner un nouveau souffle au stockage*

IFPEN s'intéresse également au stockage d'énergie par air comprimé (AACAES) qui permet de stocker de grandes quantités d'énergie. L'enjeu est notamment de stocker efficacement la chaleur générée par la compression de l'air, afin d'obtenir de bons rendements énergétiques, et d'optimiser l'économie du système. Les travaux d'IFPEN s'articulent autour de trois axes :

- L'optimisation économique du procédé s'appuyant sur des technologies de machines tournantes existantes.
- Le développement de technologies pour le stockage de la chaleur et l'optimisation des échanges thermiques dans les phases de compression et détente du gaz.
- La conception de réservoirs d'air sous pression à bas coût, qui permettent l'utilisation de la technologie sans stockage souterrain.

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

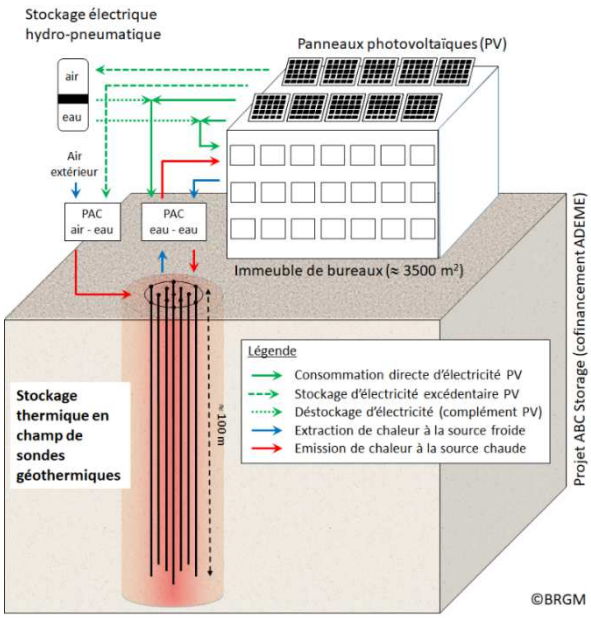
Le stockage souterrain de la chaleur comme composant d'un système énergétique local pour la décarbonation des bâtiments

La décarbonation des bâtiments est un enjeu majeur : c'est le premier secteur émetteur de CO_2 en Europe. En France, des textes normatifs et réglementaires incitent les acteurs du bâtiment à construire à courte échéance des Bâtiments à Energie Positive (BEPOS). Le stockage d'énergie au point de demande (bâtiment) constitue une réponse efficace pour optimiser le processus d'autoconsommation / autoproduction des ENR intermittentes : l'optimisation de ces systèmes par introduction d'un stockage de chaleur souterrain est un des axes de recherche.

- *Un démonstrateur en environnement représentatif pour l'optimisation d'un système de stockage d'énergie intégrant un stockage souterrain de chaleur : le projet ABC Storage*[13]

Il s'agit d'un premier système de stockage multi-énergies maximisant l'autoproduction et l'autoconsommation de l'énergie solaire à un coût compétitif pour permettre un déploiement massif en nombre. Ce système associe dans une combinaison innovante un stockage d'énergie thermique et un stockage d'énergie électrique.

Le sous-système de Stockage Thermique d'Electricité (STE) intègre la production d'énergie par panneaux solaires photovoltaïques (PV), la transformation de cette énergie électrique en énergie thermique par Pompe à Chaleur (PAC) et le stockage inter-saisonnier de l'énergie thermique par sondes géothermiques (technologie BTES[14]). Le sous-système STE est basé sur la maîtrise des températures injectées dans le sous-sol pour optimiser le rendement de l'installation et doit permettre une gestion dynamique de l'injection de chaleur dans les sondes du BTES en fonction des capacités de production ENR et des besoins du bâtiment mais aussi du taux de CO_2 émis par l'électricité du réseau. La conception et le mode opératoire de l'unité BTES permettent d'en minimiser l'autodécharge en minimisant la différence de température entre la température de stockage (40°C) et la température du milieu rocheux environnant. L'unité BTES est constituée de treize échangeurs thermiques verticaux implantés dans des forages de 100 m de profondeur et constitués de circuits étanches où circule un fluide caloporteur (eau). Physiquement, la capacité d'échange d'énergie thermique et de stockage repose sur la diffusion de la chaleur dans les roches du sous-sol. Le volume de stockage considéré est de l'ordre de 22 800 m³ de roches. Le système énergétique global est piloté par un contrôleur intelligent (utilisant des algorithmes d'intelligence artificielle) optimisant les cycles d'injection et de soutirage de la chaleur pour minimiser les émissions de CO_2 du bâtiment et le coût des énergies. Le démonstrateur est en cours de réalisation sur la plateforme « Géothermie » du BRGM. Les forages sont en voie d'achèvement.



[13] ACCENTA, BRGM et ARMINES et son application commerciale ACCENTA HEAT STORAGE
[14] BTES : *Borehole Thermal Energy Storage*

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Des technologies françaises prometteuses

Prix européen pour la technologie de supercondensateurs de Nawacap

Pour le projet Nawacap, le CEA a reçu le premier prix de l'innovation EARTO (*European Association of Research and Technology Organisations*) dans la catégorie « Impact espéré ». L'objectif de Nawacap est d'introduire une rupture technologique radicale développée au CEA Iramis dans la conception et la fabrication de supercondensateurs pour en réduire les coûts, en augmenter les performances et en élargir les applications et les marchés. *© F.Rhodes/CEA* http://bit.ly/2BctJ4h

Sylfen et sa technologie hydrogène pour le stationnaire

Sylfen développe des solutions intégrées de stockage d'énergie et de production d'énergie par cogénération, à destination des bâtiments et éco-quartiers souhaitant couvrir leurs besoins à partir de sources d'énergies locales et renouvelables. http://sylfen.com/fr/accueil/ © Sylfen

Batterie Sodium-Ion : Tiamat en fer de lance d'une nouvelle opportunité industrielle

La start-up Tiamat est créée pour concevoir, développer et produire des batteries utilisant des ions sodium dans un format industriel standard. Ces nouvelles batteries pourraient pallier certaines limites des batteries lithium-ion, comme la vitesse de recharge, la durée de vie ou le coût de production. Elles pourraient notamment permettre le stockage massif d'énergies renouvelables dites intermittentes (éolienne ou solaire) ou équiper des véhicules électriques. Cette société est issue du Réseau français sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E) porté par le CNRS. (© Beaujot/RS2E, http://bit.ly/2FxpzBJ)

Avec Kemwatt, des batteries nouvelle génération

La société Kemwatt conçoit, développe, fabrique et commercialise une nouvelle génération de batteries pour stocker l'électricité et faciliter la gestion du réseau électrique. De fortes puissances (jusqu'à plusieurs mégawatts), ces batteries à électrolytes circulants offrent une solution de stockage stationnaire de l'électricité, une des conditions indispensables au développement des énergies renouvelables. Issue des travaux de recherche de l'Institut des sciences chimiques de Rennes (CNRS/Université Rennes 1/Ecole Nat. Sup. Chimie Rennes/INSA Rennes), la technologie sur laquelle s'appuie Kemwatt constitue une rupture technologique déterminante.
http://www.kemwatt.com/

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Energy Observer, démonstrateur nautique embarqué dans un tour du monde

Naviguer à travers le monde en totale autonomie énergétique et sans émission de gaz à effet de serre ni de particules fines, c'est le défi que va relever toute l'équipe d'Energy Observer dès 2017. Le bateau couple différentes sources d'énergies renouvelables – deux éoliennes à axe vertical, une aile de traction intelligente, des panneaux photovoltaïques répartis sur 130 m^2 et deux moteurs électriques réversibles en hydrogénérateurs – pour produire son propre hydrogène à partir de l'eau de mer, le stocker à bord et l'utiliser ensuite dans une pile à combustible : une architecture énergétique unique au monde ! http://www.energy-observer.org/ © EO

Puits Yvon-Morandat : Gardanne, ville de demain, ville intelligente

Le 11 octobre dernier, le projet Puits Yvon Morandat à Gardanne, « de friche minière à Pôle d'innovations technologiques et sociales » a reçu le trophée des EPL 2017 de la catégorie « Ville de demain, ville intelligente ». Le BRGM a participé à la mise en place de ce projet dont l'objectif est de devenir le 1er pôle d'activité de France labellisé Écoquartier et Quartier Durable Méditerranéen. © MTES

Le projet Power to Gas « Jupiter 1000 »

La pépinière Innovex est dédiée à l'innovation en matière de transition énergétique et accueille avec Jupiter 1000 le premier projet Power to Gas raccordé au réseau de transport de gaz en France. Ce procédé consiste à convertir et stocker des surplus d'électricité sous forme de gaz. Jupiter 1000 est par ailleurs le premier projet qui valorise du CO_2 issu de fumées industrielles en France, en intégrant une unité de captage de CO_2 sur les cheminées d'un industriel local, Asco Industries. La combinaison du CO_2 avec l'hydrogène vert produit par électrolyse conduit à la génération de méthane de synthèse qui sera consommé par les industriels locaux. *© Jupiter 1000* http://bit.ly/2kgg0iw

ESTMAP : cartographier et planifier les stockages d'énergie

Ce projet réunissant un ensemble de modélisateurs de systèmes, d'ingénieurs et de géologues européens a permis de définir une base de données dédiée aux sites de stockages d'énergie, en surface et en sous-sol, en Europe. ESTMAP offre un ensemble d'informations sur la distribution et la capacité des sites existants et futurs (les coûts, l'accessibilité, données sur des usages alternatifs).

Myrte : un démonstrateur d'énergie grandeur nature

L'objectif est de développer un système et une stratégie de pilotage visant à améliorer la gestion et la stabilisation du réseau électrique. L'hydrogène, produit par électrolyse et stocké, permet de gérer les fluctuations de puissance des énergies renouvelables intermittentes intégrées dans le réseau. Il s'agira d'examiner la capacité du système à répondre à un objectif d'écrêtage de la pointe appelée par le réseau électrique (appui au réseau de distribution) et au lissage de la puissance photovoltaïque produite (limiter les fluctuations et perturbations sur le réseau électrique). © Université de Corse/Myrte

Pour suivre toute l'actualité de la recherche française de l'énergie et de l'Alliance Ancre, rendez-vous sur les sites des institutions membres et sur
https://www.allianceenergie.fr/

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Panorama des technologies de stockage

Le stockage de l'énergie est aujourd'hui assuré par une palette large de technologies matures, c'est-à-dire déjà exploitées à échelle industrielle (comme les barrages). En laboratoires ou plateformes expérimentales, les scientifiques travaillent à les optimiser, ou à développer des pistes technologiques encore en devenir, et ainsi améliorer les performances – énergétiques, environnementales, économiques. Développement de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures… la recherche fondamentale potentiellement porteuse d'innovations et de ruptures, irrigue également ces travaux.

Chaque technologie ainsi développée propose des caractéristiques variées (capacité énergétique, temps de charge et décharge, coût, etc.), ce qui en fait des solutions spécifiquement dimensionnées pour un besoin, ou au contraire, transverses à plusieurs domaines.

Les batteries

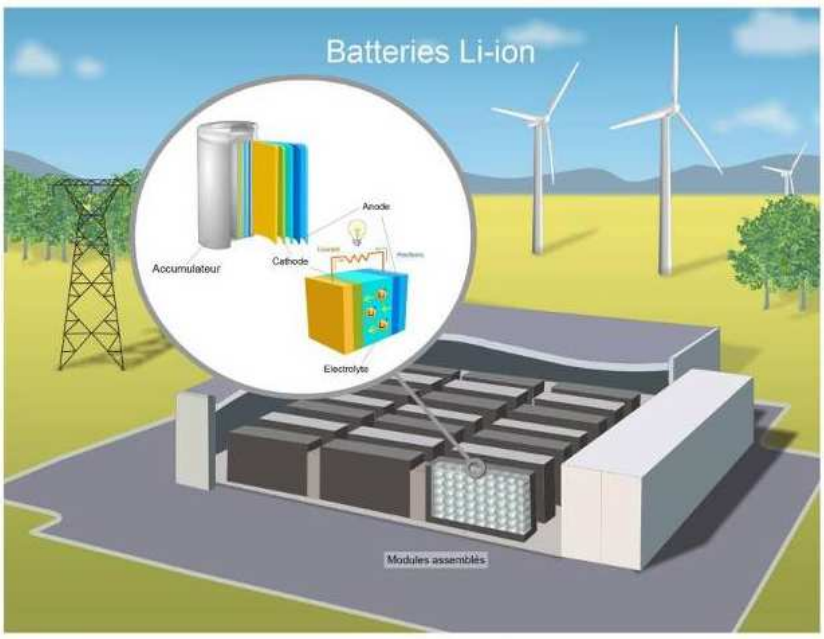
Le stockage par voie électrochimique, du fait de sa flexibilité de dimensionnement, s'impose dans les applications de faible puissance/énergie, pour répondre aussi bien aux besoins de l'électronique portable (l'essentiel du marché actuel du Li-ion) que la propulsion pour le transport (principal marché des 20 prochaines années) ou du stationnaire (essentiellement pour l'intra journalier, voire sur quelques jours). Pour des applications de grandes dimensions, leur puissance varie de quelques dizaines de kW jusqu'à quelques dizaines de MW[15], selon les matériaux et types de technologies envisagées. Les recherches ciblent : la synthèse et la mise aux point des composants (cœurs électrochimiques), le dimensionnement, l'évaluation, la modélisation et la gestion des systèmes de stockage, avec notamment le développement d'algorithmes de charge/décharge, d'état d'énergie ou encore d'état de santé des batteries (suivi de leur vieillissement).

La communauté scientifique a d'ores-et-déjà doté les industriels de technologies matures, équipant par exemple leurs modèles de véhicules électriques – basés quasi-exclusivement sur la technologie Li-ion – ou hybrides (technologie quasi-exclusivement Nickel-hydrures métalliques, NiMH). Mais les chercheurs poursuivent le développement de plusieurs couples électrochimiques : Lithium-Ion (Li-Ion), Plomb-H_2SO_4, Plomb-AMS), Sodium-Ion (Na-Ion), supercondensateurs hybrides… Lorsqu'une technologie arrive à maturité, les équipes travaillent

[15] batterie Zinc-Air : 20 kW - 10 MW ; batterie Sodium-Soufre : environ 35 MW

à son exploitation dans les meilleures conditions de fonctionnement en développant des indicateurs de gestion, grâce à des bancs d'essais et des plateformes expérimentales.

Outre le choix des matériaux dans l'optique de permettre des réactions chimiques plus performantes, se pose également la question de la sécurité des batteries. Des systèmes sont installés afin de détecter tout début de surchauffe, pouvant entraîner des réactions dangereuses (génération de gaz, risque incendie).



Batterie

Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, donnant lieu ainsi à une grande variété de batteries.

Stade de déploiement : Plusieurs millions de véhicules équipés dans le monde ; nombreux démonstrateurs pour le couplage à des centrales ENR.

Li-ion Puissance cible : 1 - 100 kW Rendement : de l'ordre de 0,90 Durée de vie : 10 - 15 ans Coût d'investissement : 600 - 1 500 €/kW (150 à 300 €/kWh)	*Avantages : haute densité énergétique ; bon rendement ; durée de vie & cyclage (selon la nature chimique choisie) ; faible impact environnemental.* *Inconvénients : sécurité ; besoin d'une régulation thermique ; coût*
Redox flow[16] Puissance cible : Qq MW Rendement : 0,65 - 0,75 Durée de vie : 15 - 20 ans Coût d'investissement : 1 000 - 3 000 €/kW (100 - 400 €/kWh)	*Avantages Redox Flow : haute modularité ; harge plage des ratios Puissance / Energie ; durée de vie ; faible autodécharge* *Inconvénients : architecture parfois complexe (surtout lorsqu'il y a deux cuves) ; risque de fuite de l'électrolyte (suivant sa nature) ; faible densité énergétique*

En 2009, la production mondiale d'accumulateurs Li-ion était estimée à plus de 7 milliards de dollars et 27 milliards en 2016 - ce chiffre passe à 70 milliards de dollars en 2016 sur l'ensemble des batteries, incluant notamment les batteries au plomb, encore majoritaires[17]. L'essor des véhicules électriques et hybrides alimentera largement cette croissance : 43 % des cellules de batteries lithium-ion produites en 2016 étaient déjà destinées à la mobilité électrique, contre

[16] La spécificité de la batterie redox-flow vient du fait que les réactifs sont en solution dans un électrolyte différent pour l'anode et la cathode, ils sont donc stockés dans deux réservoirs séparés et circulent dans deux demi-cellules.
[17] notamment pour le démarrage des voitures thermiques.

40 % destinées aux équipements électroniques[18]. Au-delà de la seule voiture, 200 millions de deux roues électriques et 300 000 bus électriques ont été vendus en 2017, principalement en Chine[19].

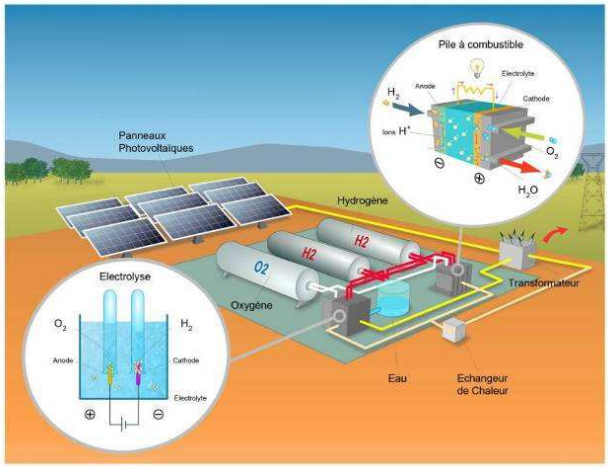
Les compétences françaises en recherche académique et technologique dans le domaine de l'électrochimie sont développées et reconnues. La filière, très dynamique, développe une large offre technologique qui fonctionne en synergie avec les savoir-faire dans l'automobile, l'électronique de puissance, les systèmes de charge et de comptage, etc. Mais malgré ces compétences académiques et technologiques reconnues depuis plusieurs décennies, la France peine à faire émerger une filière industrielle de production de batteries : le marché est dominé par les acteurs asiatiques compétitifs, qui ont acquis un important savoir-faire et disposent de moyens financiers conséquents.

Production de batteries : plusieurs usines géantes en projet

Près d'une dizaine d'usines géantes pour la produciton des batteries ont été annoncées en 2017.

- La Gigafactory Tesla 1, inaugurée en 2017, a pour objectif d'atteindre une production de 50 GWh en 2018 (la capacité finale visée est 150 GWh/an). Tesla envisage la construction de 5 autres usines.
- La start-up suédoise Northvolt a annoncé vouloir implanter la plus grande usine de batteries lithium-ion pour véhicules électriques en Europe (32 GWh de batterie par an en 2030).
- En Allemagne, Daimler va construire une immense usine de batteries Li-Ion. Elle commencera à fonctionner l'an prochain.

L'hydrogène



Stockage sous forme d'hydrogène

L'électricité va permettre de produire, via un électrolyseur, de l'hydrogène. Le gaz est ensuite stocké soit sous forme liquide, solide ou gazeuse avant d'être consommé dans une pile à combustible. Recombiné à l'oxygène il va ainsi produire de l'eau et de l'électricité.

Stade de déploiement : dizaine de véhicules et stations équipées en France / de nombreux démonstrateurs pour la mobilité ou le stationnaire (Myrte, Mobypost…)

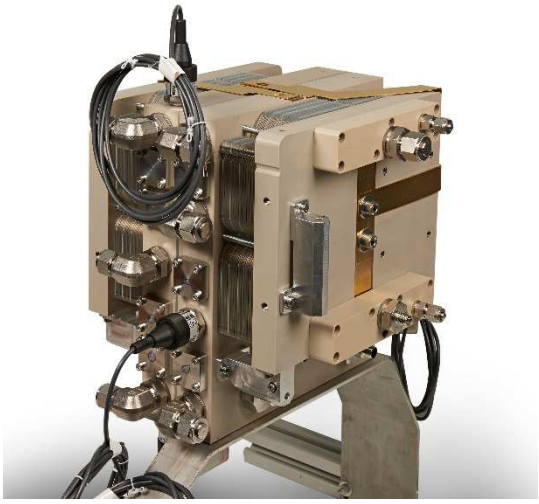
Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
1 kW - 10 MW	0,25 - 0,35	5 - 10 ans	6 000 €/kW - 500€/kWh

[18] Avicenne, 2017
[19] AIE, 2017

N'existant pas dans la nature à l'état libre, l'hydrogène est produit en le dissociant des atomes avec lequel il est combiné (carbone, oxygène, etc.). 60 millions de tonnes d'hydrogène[20] sont produites chaque année dans le monde, à partir de matières fossiles pour la grande majorité, et pour des applications industrielles non directement liées à l'approvisionnement énergétique (raffinage d'hydrocarbures par exemple).

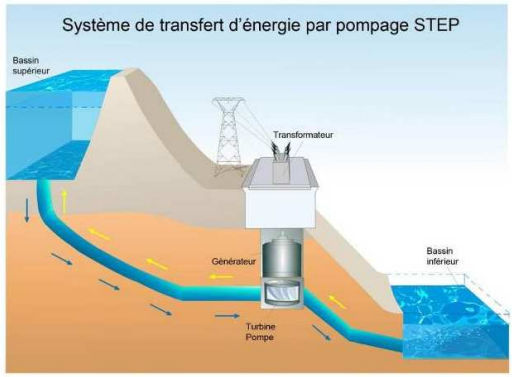
L'hydrogène peut être valorisé de multiples façons (transport, industrie, réseau électrique ou en mélange avec du gaz naturel). Quand il est produit par électrolyse de l'eau à partir de surplus d'électricité, on parle de Power-to-Gas, car il permet de créer une passerelle entre le monde des électrons et celui du gaz. Il peut être ensuite utilisé pour fournir de l'électricité, via une pile à combustible, ou être combiné à du CO_2 fatal pour produire du gaz de synthèse.

Si l'hydrogène offre un large éventail d'applications de stockage (mobilité ou stationnaire, capacité énergétique et durée variables…), son coût reste encore élevé. Son industrialisation en cours tend cependant à diminuer son prix et améliorer sa rentabilité économique, mais son essor se heurte encore à son acceptabilité.



Stack de pile à combustible type PEMFC – © D. Guillaudin/CEA

Autres technologies (réservées au stockage stationnaire)



STEP

L'électricité sert à pomper de l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. L'électricité est stockée sous forme de retenue d'eau et reproduite au besoin en laissant l'eau redescendre par gravité du bassin supérieur au bassin inférieur en passant à travers une turbine.

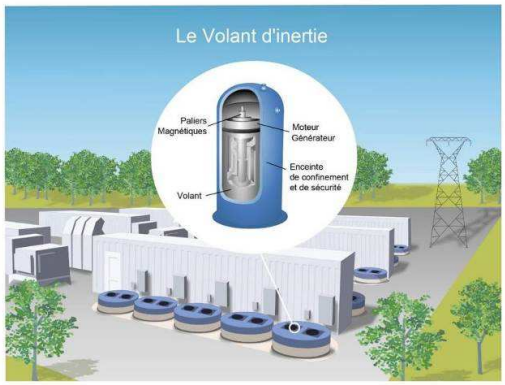
Avantages : mature ; bon rendement ; durée de vie (+40 ans) & cyclage

Inconvénients : contrainte d'emplacement ; impact environnemental & acceptabilité du public

Stade de déploiement : 6 grandes stations en France, pour environ 4 GW (potentiel maximal : 10 GW) / 150 GW de STEP dans le monde, soit 99 % des capacités de stockage de l'électricité installées.

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
Qq MW - qq GW	0,65 - 0,80	40 - 60 ans	500 - 1500 €/kW – 70 - 150 €/kWh

[20] États-Unis : 11 Mt d'hydrogènee sont aux Etats-Unis ; Europe : 8,8 Mt ; France : 922 000 t.



Volants d'inertie

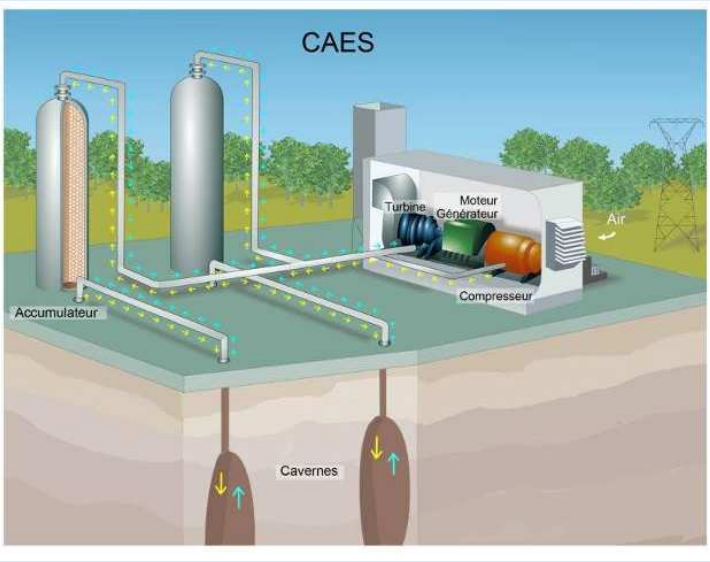
L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson sous vide. L'énergie cinétique entraînée par la rotation du cylindre peut ainsi être conservée du fait de l'absence de frottements. Cette énergie est ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur (principe de la dynamo).

Avantages : temps de réponse très court ; très bon rendement ; longue durée de vie ; peu de maintenance ; beaucoup de constructeurs

Inconvénients : forte autodécharge ; problèmes de sécurité ; coût

Stade de déploiement : Des petits volants d'inertie sont utilisés dans des applications mobiles (tramway), pour récupérer l'énergie de freinage et la restituer en pic de puissance au redémarrage.

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
Qq MW - qq GW	0,65 - 0,80	40 - 60 ans	500 - 1500 €/kW – 70 - 150 €/kWh



CAES – Stockage par air comprimé

L'électricité alimente un compresseur qui va comprimer de l'air ensuite stockée dans des cavernes souterraines. L'air circule ensuite des cavernes vers une turbine pour produire de nouveau de l'électricité.

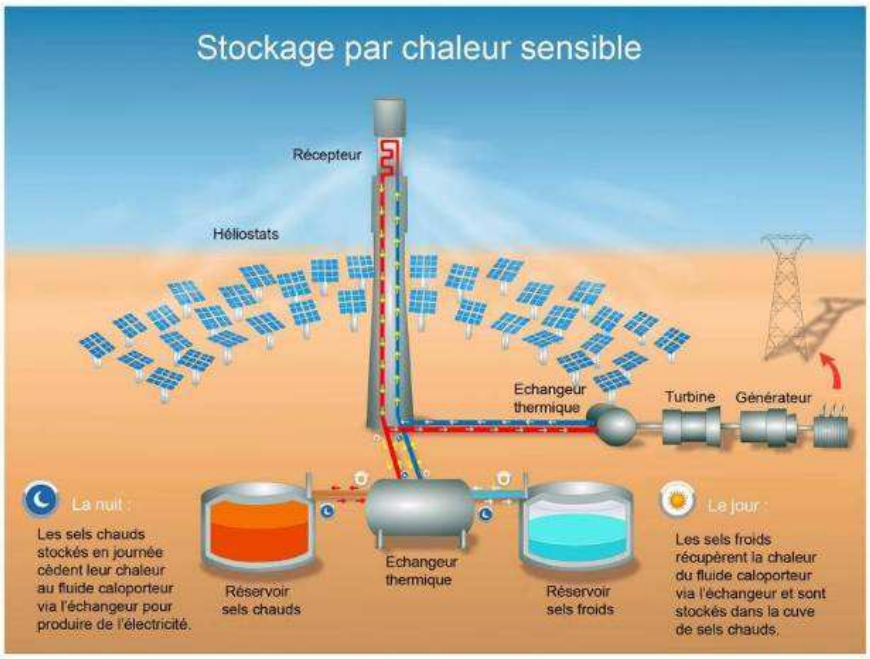
Avantages : pas d'émission de CO_2 (CAES adiabatique) + grandes puissances et très grandes capacités

Inconvénients : coût d'investissement ; site de stockage géologique adapté

Stade de déploiement : 2 grandes centrales dans le monde (300 MW en Allemagne et 100 MW aux États-Unis) / plusieurs projets en étude dans le monde. Projets de deuxième génération sont en cours de développement (AACAES Advanced Adiabatic Compressed Air Storage).

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
100 - 500 MW	0.65 (adiabatique)	30 - 40 ans	450 - 650 €/kW – 50 - 80 €/kWh

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

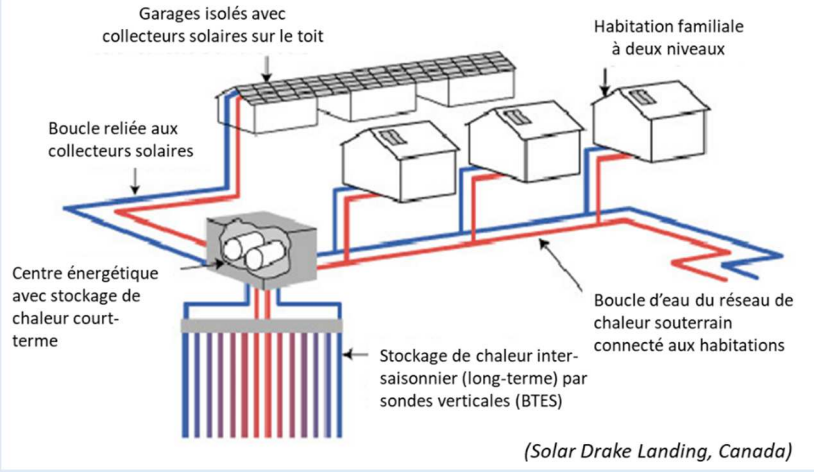


Stockage thermique par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible qui consiste à chauffer un fluide caloporteur ou un solide. La chaleur est ensuite récupérée en chauffant un autre fluide. C'est le principe du ballon d'eau chaude, couplé à un panneau solaire thermique. C'est aussi tout simplement le cas d'une pierre posée près d'une cheminée. Une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur.

Stade de déploiement : la technologie des deux réservoirs et du sel fondu est déjà déployée sur plusieurs centrales solaires dans le monde. D'autres technologies de stockage par chaleur sensible solide font l'objet de démonstrateurs dont certains au CEA

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
10 - 50 MW	0.95	30 - 40 ans	25 - 50 €/kWh



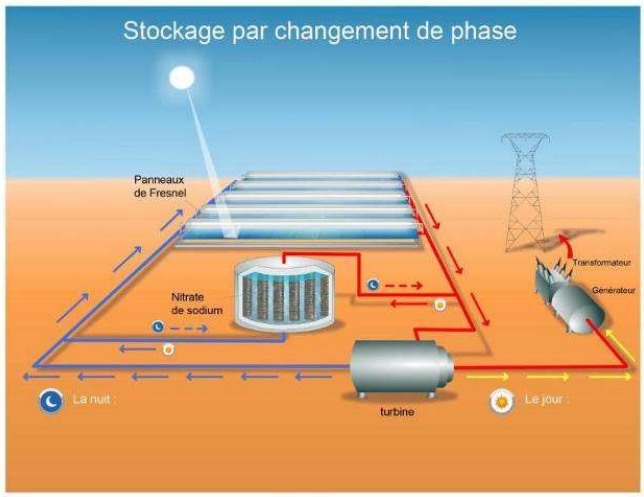
Stockage thermique souterrain par chaleur sensible

La chaleur est stockée dans le sous-sol soit dans un aquifère, soit dans une roche conductrice. La chaleur excédentaire (par ex. solaire) est stockée en été, puis déstockée en hiver.

Stade de déploiement : plusieurs stockages de chaleur solaire ou fatale en Allemagne, Canada, Danemark, Pays-Bas (exemple : Solar Drake Landing, au Canada, où, grâce à un stockage thermique souterrain de proche surface, 90% de la chaleur fournie à un réseau alimentant un quartier résidentiel est d'origine solaire).

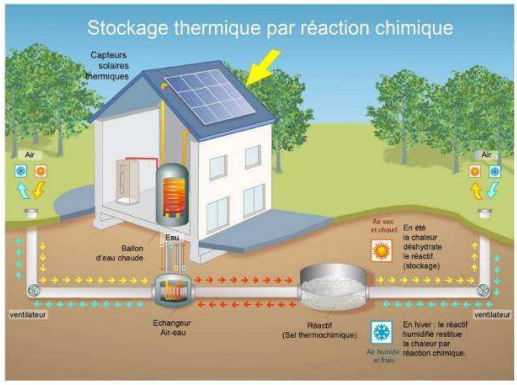
Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
Qq 100 kW - qq 1000 MW	50 - 70 %	> 30 ans	Environ 1 €/kWh stocké

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/



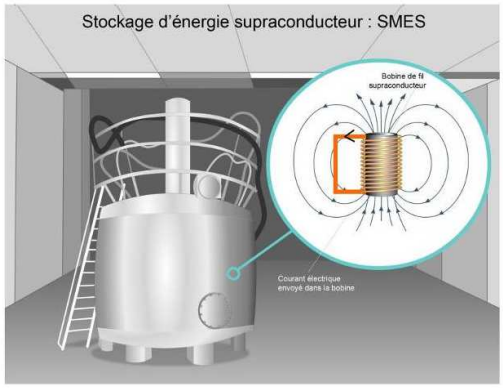
Stockage thermique par changement de phase
Le stockage de chaleur par changement de phase grâce à l'utilisation de matériaux dont la chaleur va entraîner le passage d'un état solide à un état liquide. C'est le cas, par exemple, de la paraffine dont la température de fusion est proche des 70°C. Elle restitue cette chaleur lorsqu'elle repasse à l'état solide. Ce principe est très intéressant pour stocker le changement de phase liquide-vapeur sur les centrales solaires à génération directe de vapeur.

Stade de déploiement : Plusieurs démonstrateurs existent sur des centrales solaires tests. Des applications de niche sont déployées pour le stockage de froid de petite capacité. Des premiers démonstrateurs de stockage inter-saisonniers pour l'habitat individuel émergent. Les applications hautes températures sont encore à l'état de recherche amont.



Stockage thermique par réaction chimique
Cette approche consiste en l'utilisation d'une réaction chimique réversible qui a besoin d'un apport de chaleur dans un sens (endothermique) et dégage de la chaleur dans le sens opposé (exothermique). Parmi les réactifs envisagés, la chaux. La chaleur apportée permet de l'assécher (c'est-à-dire retirer l'eau du mélange). La chaux sèche est ensuite conservée à l'abri de l'humidité. Lorsqu'elle est ré-humidifiée, se produit alors un dégagement de chaleur vers 350-400°C. Avec d'autres matériaux (sels) on peut aussi appliquer ce principe à plus basse température notamment dans l'habitat. La stabilité de ce système permet un stockage saisonnier.

Stade de déploiement : Cette solution est mise en œuvre à l'échelle industrielle dans le cadre du stockage de froid cuves de 1 à 100 m^3). Des prototypes de petites dimensions pour les applications hautes températures sont testés en laboratoire. Ce principe reste actuellement à l'échelle de démonstrateur : une maison-test du site de l'INES est pouvue d'un tel stockage permettant d'assurer 80% des besoins annuels grâce au solaire en utilisant en hiver la chaleur accumulée l'été.

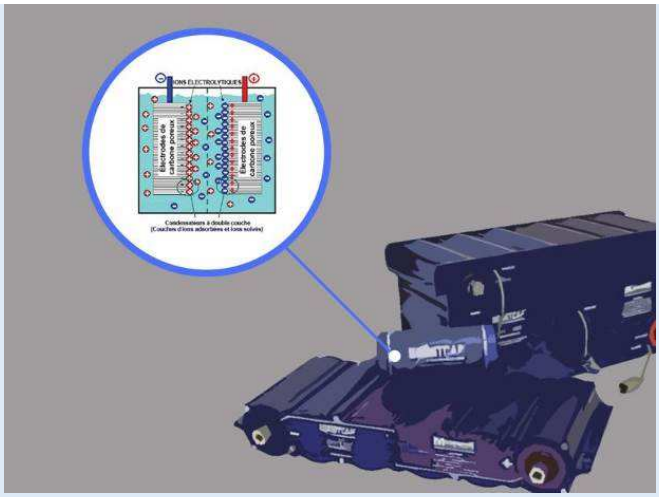


Stockage à inductance supraconductrice (SMES) Le stockage électromagnétique consiste à créer, grâce à l'électricité, un champ magnétique dans une bobine. L'électricité peut ensuite être récupérée dans un laps de temps très court.

Avantages : excellent temps de réponse ; haut rendement ; adapté pour fournir de l'énergie rapidement ; durée de vie ; charge et décharge rapide.
Inconvénients : faible densité énergétique ; processus cryogénique nécessaire (pénalise par conséquent le bilan énergétique) ; autodécharge ; ondes électromagnétiques

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
Qq kW - qq 100 MW	0,75 - 0,80	20 - 30 ans	100 - 500 €/kW

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/



Supercondensateurs

Le supercondensateur est un moyen de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Il est constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre. Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports.

Avantages : temps de réponses courts ; grande durée de vie
Inconvénients : coût ; densité d'énergie limitée

Puissance cible	Rendement	Durée de vie	Coût d'investissement
10 kW - 5 MW	0,92 - 0,98	> 500 000 cycles	100 - 500 €/kW – 10 000 - 20 000 €/kWh

Ailleurs, dans le monde

États-Unis

La loi américaine American Recovery and Reinvestment Act of 2009 donne une impulsion très forte pour l'émergence de démonstrateurs de stockage américains et l'installation d'usines de fabrication de systèmes de stockage aux Etats-Unis.

Japon

Créé en 1980, le NEDO (*New Energy and Industrial Technology Development Organization*) a mis en œuvre des programmes de recherche dans le domaine du stockage stationnaire, s'étendant aux applications véhicules dix ans plus tard.

Chine

La Chine possède les plus importants gisements de matière première nécessaire à la fabrication des systèmes innovants, en particulier de lithium (22 % de la production mondiale de lithium et 12 % d'oxyde de lithium, pour 55 % de la production mondiale de batteries Li-Ion en 2016), de vanadium pour les batteries redox, et de terres rares.

Allemagne

Engagés dans des alliances avec le gouvernement, les industriels s'engagent à effectuer des investissements de R&D nettement supérieurs aux aides publiques : dans le cadre de l'alliance relative aux batteries au lithium, le gouvernement fédéral allemand contribue à hauteur de 60 millions d'euros pour une participation industrielle de 360 M€.

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Mémo technique : principes généraux

	Transformation 1	Stockage d'énergie	Transformation 2	
Electrochimie – Accumulateurs (batteries)	Réaction électrochimique	Potentiel électrochimique	Réaction électrochimique inverse	**électro/chimique**
Hydrogène	Electrolyse de l'eau	Hydrogène	Pile à combustible	
Inertie – Volant d'inertie	Moteur entraînant un disque	Energie cinétique de rotation	Alternateur récupérant l'énergie cinétique	**mécanique**
Gravitaire – Station de transfert d'énergie par pompage (barrages)	Pompage	Energie potentielle gravitaire	Turbinage	
Stockage par air comprimé	Compresseur	Air comprimé	Turbinage	

Stockage par chaleur sensible	Utilisation d'un matériau (liquide, solide) qui emmagasine la chaleur apportée pour la restituer ultérieurement	**thermique**
Stockage par chaleur latente	Utilisation d'un matériau dont l'apport de chaleur entraîne un changement de phase[21] et qui restitue cette chaleur en sens inverse	
Stockage thermochimique	Utilisation d'un réactif dont la réaction chimique réversible est endothermique et exothermique[22].	

[21] La paraffine change de phase, c'est-à-dire passe de l'état solide à liquide, à 70°C environ. Elle est capable de restituer cette chaleur en repassant de l'état liquide à solide.

[22] Une réaction chimique peut consommer de la chaleur dans un sens (endothermique) et en produire dans l'autre (exothermique)

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Pour aller plus loin…

… et tout connaître sur le secteur de l'énergie et les enjeux liés, quelques contenus en ligne :

pédagogie :

- « *Stocker de l'électricité, comment ça marche ?* », par Catherine Ponsot Jacquin et Pierre Le Thiez, The Conversation https://theconversation.com/stocker-de-lelectricite-comment-ca-marche-78805

- « L'énergie, faites le plein », dossier multimédia de l'Esprit Sorcier https://www.lespritsorcier.org/dossier-semaine/energie/

- Les « recherches du CEA sur... », des fiches présentant les axes de R&D explorés par les équipes du CEA http://www.cea.fr/Pages/domaines-de-recherche.aspx

- *« Energies : comment les stocker ? »,* Dossier CNRS le Journal *http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/3_jdc_271_l_enquete_sp.pdf*

études & rapports :

- Tous les travaux de l'Ancre formalisés dans les études et rapports ici : https://www.allianceenergie.fr/etudes-et-rapports/

- Le suivi des politiques publiques engagées par le Ministère de la transition écologique et solidaire https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/politiques/transition-energetique-bas-carbone

- Le suivi des politiques publiques engagées par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche pour l'orientation stratégique de la recherche française http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid24538/strategie-nationale-de-recherche-s.n.r.html

- Le site de l'Agence internationale de l'énergie : https://www.iea.org/ (anglais)

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

À propos de l'ANCRE

Créée le 17 juillet 2009, l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre) rassemble 19 organismes de recherche et innovation et conférences d'établissements d'enseignement supérieur dans le domaine de l'énergie.

Ses missions, exercées en liaison avec les pôles de compétitivité et les agences de financement

- Renforcer les synergies et partenariats entre organismes de recherche, universités et entreprises concernés par le secteur de l'énergie
- Identifier les verrous scientifiques et techniques qui limitent les développements industriels
- Proposer des programmes de recherche et innovation, et les modalités de leur mise en œuvre
- Contribuer à l'élaboration de la stratégie nationale de recherche en matière d'énergie ainsi qu'à la programmation des agences de financement dans ce domaine

Ses défis sociétaux

- Une énergie propre, sûre et efficace
- Mobilité et systèmes urbains durables

Ses objectifs

- Identifier les enjeux du futur
- Contribuer à l'élaboration des politiques publiques
- Orienter la programmation
- Mobiliser, structurer et fédérer les communautés
- Produire et diffuser des connaissances

ANCRE
Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/

Contacts presse :

Service de presse du CEA : 01 64 50 20 11 - presse@cea.fr - @CEA_Recherche

Nicolas Tilly : 01 64 50 17 16 - nicolas.tilly@cea.fr

Service de presse du CNRS : 01 44 96 51 51 - presse@cnrs.fr - @CNRS

Priscilla Dacher : 01 44 96 46 06 - priscilla.dacher@cnrs-dir.fr

Service de presse de l'IFPEN : 01 47 52 67 21 - presse@ifpen.fr - @IFPENinnovation

Anne-Laure de Marignan : 01 47 52 62 07 - anne-laure.de-marignan@ifpen.fr

Service de presse de la CPU : @CPUniversite

Marine Lopes : 01 44 32 90 05 - marine.lopes@cpu.fr

Service de presse du BRGM : 02 38 64 48 47 - presse@brgm.fr - @BRGM_fr

Pierre Vassal : 02 38 64 46 75 - p.vassal@brgm.fr

ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

nicolas.tilly@cea.fr / 01 64 50 17 16
https://www.allianceenergie.fr/