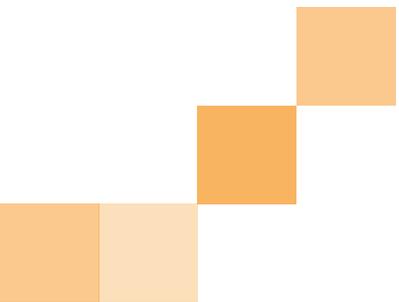




# Les systèmes de stockage d'énergie



---

## FEUILLE DE ROUTE STRATÉGIQUE

# Feuille de route

## Les systèmes de stockage d'énergie

### Sommaire

> 1. Contexte et enjeux	4
> 2. Les champs thématique et géographique	6
> 3. Comparaisons internationales	8
> 4. Les paramètres clés	16
> 5. Les visions prospectives	17
> 6. Les verrous	23
> 7. Les priorités de recherche	28
> 8. Les besoins de plates-formes expérimentales et de démonstrateurs de recherche	30
> 9. Préindustrialisation et première mise sur le marché	31

### Liste des membres du groupe d'experts

Groupe	Nom	Organisme
Fabricants	Anne De Guibert Nathalie Fauqueur Didier Marginedes Olivier Teller Christian Lenotre	SAFT Energys Batscap Alstom SAED
Institutionnels	Bernard Multon Pierre Odru François Beguin Hervé Charrue Eric Lemaitre Xavier Py Patrick Canal	ENS (Ecole normale supérieure)-Cachan IFP (Institut français du pétrole) ANR (Agence nationale de la recherche) CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) CEA (Commissariat à l'énergie atomique) Promes (Laboratoire procédés, matériaux et énergie solaire) (CNRS) ATEE (Association technique énergie, environnement)
Utilisateurs	Bruno Prestat Joseph Beretta Jérôme Perrin Marc Vergnet Marc Aubree Jean Paul Reich	EDF R&D PSA Renault Vergnet France Télécom GDF SUEZ

Les membres du groupe d'experts ont été appuyés par un secrétariat technique composé de Stéphane Biscaglia, Michel Gioria et Nicolas Tonnet de l'ADEME.

## Préambule

Depuis 2010, l'ADEME gère quatre programmes dans le cadre des Investissements d'avenir<sup>1</sup>. Des groupes d'experts issus de la recherche dans les secteurs de l'industrie, des organismes de recherche et des agences de financement et de programmation de la recherche, sont chargés, dans le cadre d'un travail collectif, de la réalisation de feuilles de route stratégiques. Celles-ci sont utilisées pour lancer les Appels à manifestations d'intérêt (AMI).

Les feuilles de route ont pour objectif :

- d'éclairer les **enjeux industriels, technologiques, environnementaux et sociétaux** ;
- d'élaborer des **visions cohérentes et partagées** des technologies ou du système sociotechnique en question ;
- de mettre en avant les **verrous technologiques, organisationnels et socio-économiques** à dépasser ;
- d'associer aux thématiques de recherche prioritaires, **des objectifs temporels** en termes de disponibilité technologique et de déploiement ;
- de rendre prioritaires les **besoins de recherche industrielle, de démonstrateurs de recherche, d'expérimentation préindustrielle et de plates-formes technologiques d'essai** qui servent ensuite de base pour :
  - > la rédaction des AMI ;
  - > la programmation de la recherche au sein de l'ADEME et d'autres institutions, comme l'Agence nationale de la recherche (ANR), le Comité stratégique national sur la recherche énergie ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE).

Ces priorités de recherche et d'expérimentation proviennent du croisement entre les visions et les verrous, mais prennent également en compte les **capacités françaises dans les domaines de la recherche et de l'industrie**. Les feuilles de route peuvent également faire référence à des expérimentations exemplaires à l'étranger et faire des recommandations en matière de politique industrielle.

<sup>1</sup> - Les Investissements d'avenir s'inscrivent dans la continuité des orientations du Fonds démonstrateurs de recherche géré par l'ADEME. Les quatre programmes concernés sont : Energie renouvelable, décarbonée et chimie verte (1,35 milliard d'euros), Véhicules du futur (1 milliard d'euros), Réseaux électriques intelligents (250 millions d'euros) et Economie circulaire (250 millions d'euros).

# Feuille de route

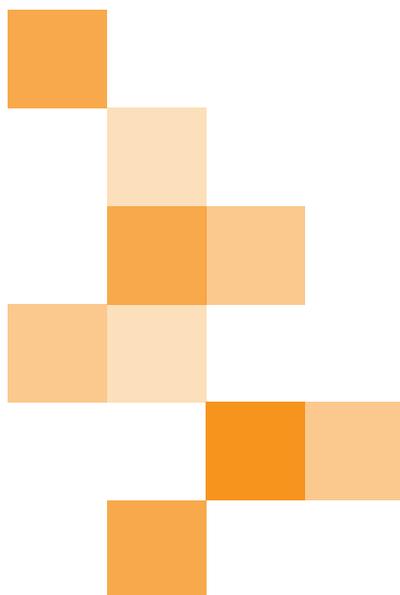
## Les systèmes de stockage d'énergie

### > 1. Contexte et enjeux

#### Le contexte

Une hypothèse de base des feuilles de route animées par l'ADEME est **de chercher à atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement et du « facteur 4 »**. Ce dernier, issu de la loi POPE (Programme d'orientation de la politique énergétique française) de 2005, vise à diviser par quatre les émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050 par rapport à leur niveau de 1990.

Au-delà de ces objectifs politiques et sociétaux, cette feuille de route s'inscrit dans une **dynamique propice au déploiement des systèmes de stockage thermique et électrique**, dynamique qui contribue à structurer ce secteur d'activité industrielle à l'échelle mondiale. Cela se manifeste par la montée en puissance d'acteurs industriels de rang mondial, ainsi que par des accords industriels entre les industries productrices de systèmes de stockage, les industries potentiellement grandes consommatrices de ces mêmes systèmes (ex : industrie automobile, fournisseurs d'électricité) et les organismes de recherche.



Cette dynamique s'explique par **cinq éléments principaux** :

- des **objectifs ambitieux** aux niveaux français, européen et mondial en matière de **pénétration des énergies renouvelables** électriques et thermiques<sup>2</sup> ;
- des **avancées technologiques** significatives dans le domaine des matériaux et des technologies électrochimiques pour les batteries, de l'électronique de puissance et des technologies de l'information et de la communication ;
- de **secteurs industriels** clés engagés (notamment le secteur des transports terrestres et des bâtiments) vers de nouvelles voies technologiques – véhicules électriques et hybrides rechargeables (*encadré ci-dessous*), bâtiments résidentiels et tertiaires à énergie positive (qui produisent, en moyenne sur l'année, plus d'énergie qu'ils n'en consomment) – pouvant, si elles aboutissent, se traduire par des besoins significatifs en matière de systèmes de stockage<sup>3</sup> ;
- des **règles institutionnelles** qui régissent le fonctionnement des marchés énergétiques (gaz et électricité), poussant notamment à rechercher une valorisation maximale de l'énergie produite à un moment donné, y compris à travers le recours à des systèmes de stockage ;
- **l'intégration croissante** dans le mix énergétique européen **de systèmes de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables**, imposant de renforcer la maîtrise des flux énergétiques, afin de garantir à tout moment l'équilibre offre/demande.

#### Des véhicules rechargeables

Nos véhicules conventionnels, équipés de moteurs thermiques, fonctionnent au gasoil ou à l'essence. Parmi les véhicules en cours de développement et d'industrialisation, on trouve des **véhicules électriques**, dont les moteurs sont alimentés par des batteries, et des **véhicules hybrides**, qui associent moteurs thermique et électrique, leurs batteries étant rechargées lors de certaines phases de la conduite. Lorsque ces mêmes batteries peuvent aussi être rechargées sur le secteur électrique, on parle de **véhicule hybride rechargeable**.

2 - Au niveau européen, la France s'est engagée à produire 23 % de son énergie à partir de ressources renouvelables à l'horizon 2020 (contre environ 12 % aujourd'hui). La part des énergies renouvelables concerne la production d'électricité, de chaleur et de carburants pour les transports.

3 - Cette remarque ne prend pas en compte les systèmes de stockage nomades comme les batteries pour téléphone portable, qui à ce jour représentent un marché mondial d'environ 2 milliards d'unités.

## Les enjeux

Quatre enjeux prioritaires ont été identifiés :

1. Prendre en compte les **enjeux environnementaux** lors des phases de conception, de production, d'utilisation et de gestion de la fin de vie des systèmes de stockage.

Il s'agira notamment de concevoir, produire et déployer des systèmes de stockage d'énergie, contribuant à l'amélioration du bilan global en termes de consommation d'énergie et de matières premières non renouvelables des systèmes dans lesquels ils s'insèrent. Les analyses de cycles de vie pourront permettre de hiérarchiser des dispositifs de stockage, au regard de leurs impacts environnementaux.

2. Intégrer dans la phase de conception la problématique de la **valorisation économique du dispositif** de stockage.

Cela revient à concevoir, produire et déployer des systèmes de stockage d'énergie ayant des caractéristiques techniques (ex : durée de stockage, nombre de cycles, densité de puissance et d'énergie) leur permettant de s'adapter à plusieurs pistes de valorisation énergétique et économique.

Dans le **cas des réseaux électriques**, il s'agirait par exemple de concevoir des systèmes de stockage permettant simultanément de contribuer : au lissage de la pointe de consommation électrique, à l'optimisation du programme de production, à la qualité du courant, à la fourniture de réserves primaires et secondaires (réglage de la fréquence et/ou de la tension du réseau) et au traitement de l'intermittence de certaines énergies renouvelables comme l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque.

Les systèmes de stockage pourraient également assurer un rôle décisif dans la sécurisation de l'alimentation des réseaux, via des dispositifs locaux ou globaux capables de pallier toute coupure temporaire.

Dans le **cas du stockage de la chaleur**, il s'agirait de déployer des dispositifs permettant par exemple de stocker de la chaleur ou du froid à différents niveaux de température et pour des périodes plus ou moins longues. Le stockage peut être infrajournalier (à court terme, pour une utilisation quotidienne, quelques heures séparant la consommation de chaleur de sa production), intersaisonnier (stockage estival pour une restitution hivernale par exemple), double fonction (stockage chaud/froid), basse ou haute température selon les procédés.

3. Accompagner le développement de **procédés d'industrialisation** de la production des systèmes de stockage d'énergie et permettre l'élaboration de **standards** pour les dispositifs de stockage.

L'objectif est de favoriser le déploiement des dispositifs de stockage sur le marché en s'appuyant sur les effets d'échelle et les effets de série pour réduire leur coût de production et accroître ainsi leur compétitivité par rapport aux options alternatives telles que la gestion de la demande ou l'utilisation de carburants. La mise en œuvre de phases de test (en conditions réelles d'utilisation) est indispensable.

4. Faire émerger un **cadre institutionnel et régulateur**<sup>4</sup> propice.

Cet enjeu, complémentaire du précédent, vise à évaluer les évolutions régulatrices qui seraient favorables au déploiement des systèmes de stockage ainsi qu'au système énergétique dans son ensemble (intégrant consommateurs finaux, producteurs, distributeurs, fournisseurs), aux échelles française et européenne.

Dans le domaine de l'électricité comme dans celui de la chaleur, il s'agirait, par exemple, de pouvoir faire bénéficier plusieurs acteurs des services d'une même installation de stockage ou encore exploiter la seconde vie d'un même dispositif de stockage.

4 - On considère ici l'ensemble des actions entreprises par les pouvoirs publics pour garantir une stabilité satisfaisante à un système économique et/ou social.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

## > 2. Les champs thématique et géographique

### Le champ thématique

Cette feuille de route couvre les systèmes de stockage d'énergie thermique (chaleur et froid) et d'énergie électrique.

Afin de permettre une comparaison entre les différentes solutions pouvant intégrer une ou plusieurs étapes de conversion, le périmètre d'un système de stockage est défini comme l'ensemble des dispositifs et procédés permettant d'absorber et de restituer un flux d'énergie de même nature (chaleur/chaleur, électricité/électricité).

Pour le **stockage de l'énergie électrique**, on différenciera les systèmes stationnaires des systèmes embarqués (*encadré ci-dessous*).

#### Stationnaire ou embarqué

Les **systèmes de stockage électrique stationnaires** sont des sites dédiés au stockage qui viennent en appui aux réseaux électriques et aux sites de production d'énergies renouvelables. Ce sont principalement des systèmes de stockage à grande échelle – pour des capacités installées supérieures à quelques mégawattheures (MWh) –, de moyenne ou forte puissance (de 100 kilowatts au gigawatt).

A contrario, les **systèmes de stockage embarqués** sont de petite capacité et de faible puissance, intégrés dans un système mobile. Ils sont essentiellement utilisés dans le transport, en particulier dans les véhicules électriques et hybrides rechargeables.

Pour la **chaleur**, les systèmes stationnaires seront considérés en différenciant les systèmes à usage infrajournalier des systèmes intersaisonniers (notamment pour le secteur du bâtiment). Les systèmes embarqués seront également pris en compte afin d'intégrer les travaux des équipementiers automobiles sur la récupération de la chaleur en vue de sa restitution sous forme de chaleur ou d'électricité par des procédés thermoélectriques.

Sont également abordées les questions économiques, institutionnelles (valorisation du stockage, opérateurs de stockage diffus ou centralisé) et environnementales (recyclage, consommation de matières premières, analyse de cycle de vie) en lien avec la conception, la production, le déploiement et la fin de vie des systèmes.

Enfin, le groupe d'experts a fait le choix d'exclure du champ de la feuille de route :

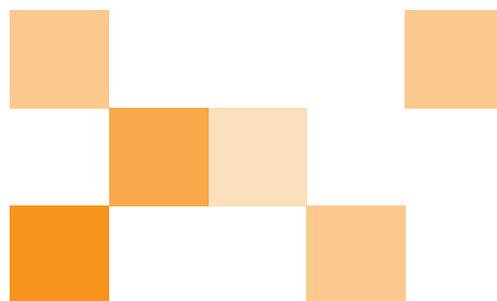
- Les systèmes de stockage inclus dans les appareils nomades (téléphones et ordinateurs portables), leur déploiement ne permettant pas de réduire significativement les émissions anthropiques de GES liées à la consommation/production d'énergie ;
- Le stockage d'énergie via les technologies hydrogène, inclus dans une autre feuille de route : « L'hydrogène énergie et les piles à combustible ».

### Le champ géographique et l'horizon temporel

#### Le champ géographique :

La perspective étudiée est celle d'un déploiement de la filière à l'international et du positionnement des acteurs français sur le marché mondial. Néanmoins, lorsque cela sera pertinent, des dimensions locales, nationales et européennes seront considérées afin :

- de prendre en compte les **spécificités locales** pouvant influencer les besoins à considérer et les technologies à développer (topographie et géographie, mix énergétique, densité d'habitat, qualité des réseaux de transport et de distribution d'électricité, nature du parc automobile, etc...) ;
- d'étudier le **cadre économique et régulateur** des différents niveaux géographiques (national ou régional) ;
- d'articuler les priorités de recherche et les besoins de démonstrateurs de recherche et préindustriels avec les **initiatives européennes**, notamment le NER<sup>5</sup> 300, le SET Plan<sup>6</sup>, les EERA<sup>7</sup> et l'Alliance européenne pour l'économie d'énergie (EASE<sup>8</sup>), créée en novembre 2010.



5 - New Entrance Reserve, réserve de quotas d'émission de CO<sub>2</sub>, réservée aux nouveaux entrants du système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre de l'Union européenne.

6 - Strategic Energy Technology Plan, plan de la Commission européenne pour le développement de technologies à faible intensité carbonique.

7 - European Energy Research Alliance, [www.eera-set.eu](http://www.eera-set.eu)

8 - European Alliance to Save Energy.

### L'horizon temporel :

Le déploiement des systèmes de stockage d'énergie vise l'**horizon 2050**, notamment pour être cohérent avec l'objectif facteur 4.

Ces visions sont complétées par des visions à l'horizon 2020, notamment pour identifier les **besoins de stockage** permettant d'atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement dans les secteurs du bâtiment, des énergies renouvelables et des véhicules électriques et hybrides rechargeables.

Des éléments clés de déploiement de la filière pour la **période transitoire 2010-2050** sont présentés avec l'objectif de mettre en évidence les jalons régulateurs afin que les systèmes de stockage jouent tout leur rôle pour :

- atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement à l'horizon 2020 ;
- assurer, à plus long terme, le développement de systèmes énergétiques peu ou pas émetteurs de GES.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### > 3. Comparaisons internationales

Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une thématique prioritaire pour la recherche, la démonstration voire le déploiement industriel.

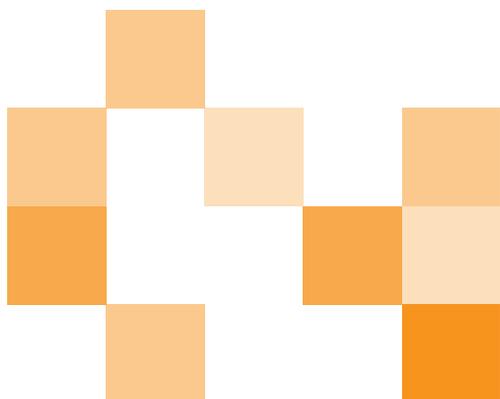
Sans prétendre à l'exhaustivité, ce chapitre propose un rapide **état des lieux** des projets de recherche, des démonstrateurs en cours ou récemment achevés et des initiatives de politique publique ayant trait aux systèmes de stockage de l'énergie.

Les champs thématiques des projets et programmes présentés se focalisent sur :

- le stockage d'électricité pour la mobilité,
- le fonctionnement des réseaux et la pénétration des énergies renouvelables,
- le stockage de la chaleur,
- le développement de modèles d'affaire favorables à l'émergence de dispositifs de stockage.

Cinq pays ou groupes de pays sont ciblés, le **Japon**, les **Etats-Unis**, la **Chine**, l'**Union européenne**, et plus spécifiquement l'**Allemagne**, pour les raisons suivantes :

- L'importance de leur effort de recherche et/ou de démonstration dans ce domaine ;
- Leur fort développement de production d'électricité décentralisée à partir de ressources renouvelables ;
- Leur engagement vers la mobilité électrique.



#### Etats-Unis

Plusieurs programmes de recherche et développement sont en cours sous l'égide du *Department of Energy* (DoE) ou de consortiums industriels comme l'*US Advanced Battery Consortium* (USABC). Ces programmes se répartissent selon les deux grandes familles d'applications : stationnaires et embarquées. La loi américaine ARRA<sup>9</sup> 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

Dès sa création en 1980, l'organisation pour le développement des énergies nouvelles et des technologies industrielles, le NEDO (*New Energy and Industrial Technology Development Organization*), a mis en œuvre des programmes de recherche dans le domaine du stockage stationnaire. Ce n'est que dix ans plus tard que des programmes visant les applications véhicules ont débuté, la technologie de batteries au lithium (*encadré sur les systèmes de stockage électrochimique ci-dessous*) étant au cœur des préoccupations.

Avec plus de 10 % de la base installée au niveau mondial, le Japon est également le pays qui comporte le plus fort taux de pénétration de Station de transfert d'énergie par pompage (STEP, *encadré ci-dessous*), dont les technologies (en particulier le fonctionnement à vitesse variable, ou en eau de mer) ont été développées en bénéficiant d'aides gouvernementales.

#### Le pompage hydraulique

C'est la solution la plus répandue actuellement pour stocker l'énergie des réseaux d'électricité. L'eau est pompée d'un cours d'eau dans une vallée (voire d'un lac de retenue à basse altitude) vers un lac de retenue à plus haute altitude. Elle peut ensuite être « turbinée » le moment venu pour produire de l'électricité. On parle de stations de pompage-turbinage.

## Chine

A la suite d'objectifs clairs et affichés d'indépendance énergétique et de leadership technologique et commercial (principalement pour les systèmes de stockage embarqués), le ministère de la Science et de la Technologie, le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information et le Comité pour le développement national et la réforme assurent la gestion de projets pilotes sur le développement de technologies de stockage pour les voitures. D'autre part, la Chine possède des ressources considérables de matériaux indispensables à la conception de ces systèmes innovants, en particulier de lithium (22 % de la production mondiale de lithium et 12 % d'oxyde de lithium) et de terres rares. En 2009, elle était leader dans la production de batteries électrochimiques et de véhicules électriques.

## Allemagne

Le 5<sup>e</sup> programme du gouvernement fédéral allemand pour la recherche et l'innovation sur les nouvelles technologies de l'énergie fait partie du programme intégré Energie-Climat piloté par le ministère de l'Economie et de la Technologie (BMW). En raison de son importance dans la balance énergétique allemande, le secteur des transports concentre les activités de recherche et développement (R&D). Dans le domaine du stockage, la coopération entre gouvernement et industrie prend la forme d'alliances au sein desquelles les industriels s'engagent à effectuer des investissements de R&D nettement supérieurs aux aides publiques. Dans le cadre de l'alliance LIB 2015, relative aux batteries au lithium et démarrée en 2008, le gouvernement fédéral contribue à hauteur de 60 millions d'euros (M€) pour une participation industrielle de 360 M€.

## Les systèmes de stockage électrique pour la mobilité

A court et moyen terme, les systèmes électrochimiques (*encadré ci-dessous*) semblent être l'option la plus prometteuse pour le stockage embarqué, dans les véhicules électriques ou hybrides rechargeables. La technologie lithium-ion est actuellement la mieux placée pour relever ce défi ; cependant, les technologies haute température peuvent avoir un débouché pour les flottes captives. A plus long terme, les batteries au magnésium et les batteries métal-air pourraient être techniquement et économiquement intéressantes.

### Les systèmes de stockage électrochimique

Les **batteries** électrochimiques permettent de convertir l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique. Rechargeables (à la différence des piles), elles tirent parti de réactions électrochimiques : transfert de charge (électrons, ions) entre deux matériaux conducteurs, les électrodes (anode et cathode) via un milieu, l'électrolyte<sup>10</sup>. On distingue les **batteries au plomb**, les **batteries au lithium** (lithium-métal lorsque l'électrode négative est en lithium métallique, lithium-ion lorsque le lithium reste à l'état ionique, lithium polymère lorsque l'électrolyte est un polymère), les **batteries au nickel** (nickel-cadmium, nickel-métal hydrure), les **batteries sodium-soufre**, les **batteries au magnésium**, les **batteries métal-air**. Une nouvelle technologie de batteries, les **red-ox flow**, propose de séparer le lieu de stockage des réactifs et le lieu de production de l'électricité.

Des batteries fonctionnant à **haute température** (> 150 °C) existent également et peuvent être adaptées à des usages bien spécifiques (flottes captives notamment).

Un autre système de stockage électrochimique, les **supercondensateurs**, utilise en général deux couches électrochimiques.

10 - Matériau dont les composés sont dissociés dans un solvant permettant le passage du courant électrique par déplacement d'ions.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### Etats-Unis

Dans le secteur du transport, le groupe de recherche fondamental *Batteries for Advanced Transportation Technologies* (BATT), piloté par le *Lawrence Berkeley National Lab* (LBNL) et financé par le DoE depuis 2009, compte une trentaine de chercheurs. Ils étudient plus particulièrement six domaines dans les batteries : l'anode, la cathode, l'électrolyte, la modélisation, l'analyse des cellules électrochimiques (éléments de base d'une batterie) et les diagnostics. Pour compléter cette initiative, l'administration Obama a mis en place divers mécanismes de financements supplémentaires des programmes de R&D académiques et industriels avec pour but de faire émerger rapidement de nouvelles technologies propres et des champions dans la production de systèmes de stockage embarqués :

- *DoE Advanced Technology Vehicles Manufacturing Program* : 25 milliards de dollars (17,5 Md€) de prêts indirects,
- *DoE Electric Vehicle Battery and Component Manufacturing Initiative* : 2,4 Md\$ (1,7 Md€) de prêt (dont 1,2 Md\$ pour les usines de fabrication de batteries),
- *DoE Loan guarantee program*,
- *ARPA-E Funding* : l'objectif est de financer des travaux complexes à haut risque avec un fort retour sur investissement. Une partie des fonds alloués a bénéficié au programme *Battery for Electrical Storage in Transportation*.

L'originalité de certains financements réside dans les partenariats uniques entre les universités, les start-up et les industriels.

Par ailleurs, le *New York Battery and Energy Storage Technology Consortium* (NY-BEST), coalition très axée sur l'industrie, s'est fixé pour objectif de favoriser le développement du secteur du stockage de l'énergie et la fabrication d'une batterie de pointe dans l'Etat de New York. Dans ce cadre, le *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA) a accordé, courant 2010, 11,5 M\$ (8 M€) d'aide sur cette thématique.

#### Japon

Le premier programme de recherche concernant les véhicules, lancé en 1992, avait pour objectif le développement d'un pack batterie au lithium de 3 kilowattheures (kWh) ayant les spécifications suivantes :

- densité d'énergie : 140 Wh/kg,
- densité de puissance : 400 W/kg,
- durée de vie : > 1 000 cycles.

En 2002, un autre programme dédié aux véhicules à pile à combustible concernait les mêmes technologies au lithium (cathode nickel, cobalt et manganèse) avec pour objectif d'atteindre une durée de vie supérieure à quinze ans.

Un troisième programme « Batteries hautes performances pour véhicules de nouvelle génération » a débuté en 2007 pour s'achever en 2011. Il concerne également les batteries au lithium avec les objectifs suivants :

- densité d'énergie : 100 Wh/kg,
- densité de puissance : 2 000 W/kg,
- durée de vie : > 10 ans,
- coût 2015 : 360 €/kWh.

En 2009, a été lancé le programme Rising (*R&D Initiative for Scientific Innovation on Next-génération Batteries*). Doté d'un budget annuel de 30 milliards de yens (260 M€) jusqu'en 2015, il vise, outre l'amélioration du fonctionnement et de la fiabilité des batteries au lithium, les objectifs ambitieux suivants :

- densité d'énergie : 300 Wh/kg,
- densité de puissance : 500 W/kg,
- durée de vie : > 10 ans,
- coût 2015 : 360 €/kWh.

Pour se donner les moyens d'atteindre ces objectifs, en 2010, le NEDO a débuté un programme intitulé « Recherche et développement en vue d'une combinaison efficace de systèmes de stockage d'énergie ». Dans ce cadre, un centre de recherche d'excellence sur les batteries a été créé à Tokyo : le I-BARD (*Innovative Battery Research and Development Center*).

## Chine

En 2009, la Chine représentait le plus important marché automobile mondial<sup>11</sup> : 199 millions de véhicules en circulation et 13,6 millions de voitures vendues, plus que les Etats-Unis. Mais ce n'est pas sans poser d'importants problèmes de pollution au sein des villes chinoises.

*The Energy Saving and New Energy Vehicle Development Plan* (2011-2020), qui a pour objectif de réduire la pollution environnementale due à l'explosion de l'utilisation automobile, a été officiellement lancé en janvier 2011. Ce plan mettra en avant l'industrialisation des véhicules hybrides rechargeables et des véhicules électriques équipés de batterie lithium-ion.

Le développement des véhicules électriques est également une priorité du 12<sup>e</sup> plan quinquennal (2011-2015). La Chine s'est fixé l'objectif d'un million de véhicules « nouvelles énergies » d'ici à 2015. Le Directeur général adjoint de l'industrie des équipements du ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (MIIT) a déclaré que le pays attache une grande importance à la recherche et au développement des technologies de cœur des batteries dans le domaine des véhicules électriques. La Chine s'organise pour devenir le leader mondial du secteur dans les dix prochaines années.

Le MIIT a annoncé en novembre 2010 que plus de 100 milliards de yuans (11 Md€) seraient investis dans les dix prochaines années pour soutenir la production de véhicules électriques. Le vice-directeur du département des hautes technologies du ministère des Sciences et Technologies (MOST) a avancé le chiffre de 8,5 Md de yuans (930 M€) investis dans le domaine des véhicules électriques et 2 Md de yuans (220 M€) dans le domaine des véhicules nouvelles énergies durant le 11<sup>e</sup> plan quinquennal (2006-2010).

Concernant les infrastructures, 150 stations supplémentaires de recharge destinées aux véhicules électriques devraient être construites en 2011, dans les villes de Pékin, Tianjin, Hefei et Nanchang. En 2010, la State Grid Corporation of China (SGCC) a signé des accords de coopération avec toutes les villes de 26 provinces et mis sur pied 75 stations de recharge et 6 209 chargeurs (l'entreprise d'Etat proposera principalement des batteries déjà chargées).

## Union Européenne

Dans le cadre du 7<sup>e</sup> Programme cadre de recherche et développement (7<sup>e</sup> PCRD, 2007-2013), et plus particulièrement du partenariat public-privé sur les voitures « vertes » (Green Cars), un appel à projet a été lancé pour développer l'éco-conception et les procédés de fabrication pour les batteries et leurs composants électrochimiques. La création d'un guide d'évaluation, en vue de mener les analyses de cycle de vie des initiatives du projet *Green Cars*, conditionne l'éligibilité des projets proposés. Le budget alloué pour l'année 2011 est de 25,5 M€, répartis entre les thématiques Matériaux, Transport et Environnement, à hauteur respectivement de 10 M€ pour les deux premières et 5,5 M€ pour la dernière.

De façon complémentaire, au sein de la thématique Technologies de l'information et de la communication, un appel à projet, doté de 30 M€, a été lancé au cours du second semestre 2010 sur les technologies pour le développement des véhicules électriques, entre autres sur les systèmes de stockage de l'énergie et leur intégration.

Par ailleurs, la direction générale énergie de la Commission européenne a récemment lancé un appel à projet dans le cadre du 7<sup>e</sup> PCRD pour le financement d'un ou deux grands démonstrateurs de stockage d'énergie, dans la gamme du gigawattheure (GWh), avec un budget de 30 M€.

## Allemagne

Publié en 2008, le *BMW Research and Development Concept for Mobile and Stationary Storage Batteries* se donne pour objectif la mise en place d'une filière industrielle complète d'approvisionnement pour la construction des batteries.

<sup>11</sup> - Bulletin électronique du service scientifique de l'ambassade de France à Pékin, 28 janvier 2011.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### Les systèmes de stockage électrique en appui des réseaux énergétiques et des énergies renouvelables

Sur le plan technique, le stockage d'énergie électrique peut apporter beaucoup de **services aux systèmes électriques**. Des études américaines et européennes permettent d'en identifier jusqu'à une trentaine. On notera par exemple :

- la fourniture de réserves de puissance active permettant de participer au réglage de la fréquence du réseau et/ou au mécanisme d'ajustement,
- le réglage de la tension du réseau (par l'onduleur ou par la modulation de l'injection de puissance active sur un réseau de distribution),
- le lissage de la puissance active injectée sur le réseau par un moyen de production d'énergies renouvelables (EnR), par essence intermittent,
- la gestion de congestions ponctuelles sur le réseau,
- l'arbitrage sur un marché (valeur formée des différentiels prévisibles entre les prix bas et hauts des marchés journaliers),
- le report d'investissement dans un réseau de distribution (renforcements de lignes, de transformateurs).

A ce jour, la quasi-totalité du stockage d'énergie dans les systèmes électriques est réalisée au moyen d'équipements de pompage hydraulique (*encadré sur le pompage hydraulique et ci-dessous*). Une capacité d'environ 100 gigawatts (GW) est installée dans le monde. Il s'agit d'une technologie mature et efficace (rendements de cycles approchant les 80 %, coût de l'ordre de 1 M€ par MW installé). Plusieurs grands projets ont été lancés en Europe (Suisse, Autriche, Espagne, Portugal), l'Asie disposant de la plus grande puissance cumulée installée et du marché le plus actif.

#### Les systèmes de stockage physique

Outre le stockage hydraulique déjà évoqué, ce sont des systèmes de stockage d'air comprimé ou **CAES** (*Compressed Air Energy Storage*), par **volant d'inertie** (où l'électricité est convertie en énergie cinétique en faisant tourner à grande vitesse un disque très lourd), des **procédés hydropneumatiques**, des procédés magnétiques ou **SMES** (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) à base de matériaux supraconducteurs ou encore des **procédés thermodynamiques**.

Les CAES utilisent des cavités salines (d'anciennes mines de sel) comme sites de stockage. L'air y est comprimé puis détendu lorsque l'énergie doit être récupérée. Un stockage adiabatique (*Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage* ou AACAES) permet de conserver et de réutiliser l'énergie thermique provenant des réactions de compression et de détente du gaz, à contrario d'un stockage diabatique.

#### Etats-Unis

Dans le domaine du stockage stationnaire, *The Energy Storage Systems Research Program* (ESS) fait partie de l'*Office of Electricity Delivery and Energy Reliability* au DoE. Sa mise en œuvre a été confiée aux Sandia National Laboratories. Le programme ESS vise à développer des technologies et systèmes de stockage avancés en collaboration avec le secteur industriel afin d'améliorer la fiabilité, le fonctionnement et la compétitivité du système électrique et des applications non connectées.

Sur un budget fédéral de 144,3 millions de dollars (100,5 M€) dédiés à la recherche sur l'énergie, 40 millions ont été alloués au stockage. Le budget est ventilé comme suit :

- fiabilité des énergies propres et système électrique : 35 M\$ (25 M€),
- technologies *smart grid* (*encadré ci-dessous*) : 39,3 M\$ (27,5 M€),
- cyber sécurité pour le système électrique : 30 M\$ (20 M€),
- stockage : 40 M\$ (28 M€).

#### Smart grids

Les **réseaux électriques intelligents** ou **smart grids** optimisent la production et la distribution d'électricité et mettent mieux en adéquation l'offre et la demande entre producteurs et consommateurs d'électricité. Ils font appel à des moyens de contrôle et de commande basés sur les technologies de l'information et de la communication.

Un des systèmes historiques de stockage de l'air comprimé (avec celui de Huntorf en Allemagne) est en fonctionnement à McIntosh (Alabama) depuis 1991. La puissance du dispositif est de 110 MW. Actuellement, trois projets de CAES diabatiques de deuxième génération sont en cours de développement et ciblent des structures géologiques de stockage bien distinctes : un premier de 270 MW (dans l'Iowa) vise un aquifère, un deuxième de 300 MW (en Californie) cible un champ de gaz déplié, et un troisième de 150 MW (Etat de New York) sera situé dans une cavité saline.

## Japon

Dès les années 1980 un projet visant au développement d'une batterie stationnaire haute performance dans la gamme du MWh était lancé. Quatre technologies ont été développées et évaluées (sodium-soufre, zinc-brome, zinc-chlore et *red-ox flow*).

Vers le milieu des années 1990, afin de répondre à la demande du secteur résidentiel, le NEDO lança un programme visant au développement d'un système compact de 2 kWh basé sur la technologie lithium.

Actuellement, l'évolution des systèmes électriques et le développement des énergies renouvelables appellent des systèmes de forte capacité et forte puissance à faible coût et grande durée de vie. En réponse à ce besoin, le NEDO a initié, dès 2006, un vaste programme intitulé « Développement d'un système de stockage d'énergie électrique pour connexion au réseau ». Différents types de batterie sont développés dont nickel-métal hydrure et lithium avec pour objectif 2030 une durée de vie de vingt ans pour un coût de 15 000 yens/kWh (132 €/kWh).

## Allemagne

Le programme « Batterie de stockage » établi pour la période 2009-2012 prévoit un budget de 35 M€ dans le but de promouvoir de nouveaux développements dans les technologies de stockage d'électricité (incluant les matériaux supraconducteurs).

Ces mesures incitatives sont complétées par l'initiative de la Fondation allemande pour la recherche sur les batteries au lithium de forte puissance ainsi que par les nouvelles priorités définies par l'association de centres de recherche Helmholtz.

Le ministère fédéral allemand de l'Environnement participe au financement de projets de recherche sur des systèmes hybrides éolien-CAES, permettant de valoriser l'énergie électrique produite par les éoliennes installées en mer du Nord. Un système de stockage CAES d'une puissance de 290 MW fonctionne depuis 1978 à Huntorf. Son rendement est néanmoins assez faible, les systèmes les plus prometteurs étant les AACAES (stockage adiabatique), qui permettent une diminution importante des pertes énergétiques par restitution de la chaleur résultant de l'étape de compression (rendement électrique d'environ 70 %).

Le projet AACAES, sélectionné au cours du 6<sup>e</sup> PCRD, est un consortium de 19 partenaires. Il a pour objectif de développer cette technologie (compresseurs, stockage thermique, cavités intéressantes) et d'identifier des procédés pertinents et valorisables dans les conditions actuelles et futures du marché énergétique.

Le territoire allemand, au-delà de ces programmes de recherche, et plus précisément les régions côtières de la mer du Nord, bénéficie de conditions géologiques avantageuses pour l'implantation de dispositifs de stockage d'air comprimé.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### Les systèmes de stockage de la chaleur

A ce jour, différents principes de stockage de l'énergie thermique font l'objet de travaux de recherche : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente, thermochimique et par oxydation (seul processus non réversible) (*encadré ci-dessous*).

##### Le stockage de la chaleur

Le **stockage par chaleur sensible**, lié à la capacité calorifique d'un matériau, permet de stocker de l'énergie grâce à l'élévation de température de ce matériau. C'est le principe, entre autres, des chauffe-eau solaires, qui récupèrent la chaleur dans la journée, pour la restituer quotidiennement. Pour de grands volumes, un stockage intersaisonnier récupère la chaleur de capteurs solaires ou d'exploitations industrielles pour la stocker dans le sous-sol au moyen de sondes géothermiques.

Le **stockage par chaleur latente**, plus efficace que le stockage par chaleur sensible pour de faibles différences de température, tire parti de la chaleur latente du matériau utilisé, autrement dit de sa capacité à passer d'un état à un autre (le plus souvent solide à liquide, on parle alors de changement de phase) sous l'effet de la chaleur. Cette technique peut être utilisée dans le bâtiment au moyen de matériaux à changement de phase (MCP) placés dans les parois du bâtiment pour améliorer son inertie thermique. C'est aussi le principe des réfrigérateurs ou des pompes à chaleur.

Le **stockage thermochimique** exploite la réversibilité d'une réaction (adsorption-désorption ou chimique) qui est, selon le sens de la réaction considérée, soit endothermique soit exothermique. Il permet un stockage intersaisonnier.

Le **stockage par oxydation** fait également appel à des réactions chimiques, les réactions d'oxydation de composés (non réversibles), pour stocker de la chaleur.

Deux enseignements peuvent être tirés des éléments de *benchmark* sur la chaleur sensible :

- un volant important de travaux a été réalisé dans les années 1970, pour la plupart abandonnés dans les années 1980. Cependant, on observe depuis le milieu des années 1990 une reprise des travaux de recherche ;
- cela s'articule autour de deux orientations. La première consiste à reprendre les technologies développées dans les années 1970 avec la difficulté qu'elles ne correspondent plus à la grille d'analyse actuelle, en particulier en termes d'analyse de cycle de vie ou de bilan GES. La seconde orientation consiste à développer de nouvelles technologies comme le stockage dans du sable ou dans des blocs de béton (en tirant parti de l'inertie thermique de ces matériaux) avec cette fois un manque de retour d'expériences industrielles (manque d'une étape de démonstration sur la plupart des nouvelles technologies).

Le programme ECES (*Energy Conservation through Energy Storage*) de l'Agence internationale de l'énergie est aujourd'hui le réseau R&D le mieux structuré et le plus actif dans le domaine du stockage de l'énergie thermique. Une quinzaine de projets ont été finalisés, sept sont en cours dont quatre axés précisément sur le stockage thermique :

- tests de réponse thermique dans le cadre d'un stockage souterrain de l'énergie (annexe 21 du programme),
- solutions de stockage de l'énergie dans des serres fermées : stockage estival de la chaleur et restitution hivernale (annexe 22),
- intégration des nouvelles technologies de stockage de l'énergie dans les bâtiments à très faible consommation énergétique (annexe 23),
- développement de matériaux afin d'améliorer les systèmes de stockage thermique (annexe 24), tels que le stockage par chaleur latente via de l'acétate de sodium (Université technique du Danemark), l'utilisation de sels fondus inclus dans des briques alvéolaires de construction (Université de Lleida, Espagne), le développement de nouveaux matériaux de sorption (Institut national de chimie, Slovaquie) et un système de stockage saisonnier basé sur le phénomène de sorption liquide pour un matériau de chlorure de lithium (Université du Minnesota). Cependant, ces systèmes ne sont, au mieux, qu'au stade du pilote expérimental, afin de valider la technologie à une échelle supérieure à celle du laboratoire et d'améliorer les performances énergétiques.

Au niveau européen, un des volets du 7<sup>e</sup> PCRD cible les systèmes avancés de stockage de la chaleur. Courant 2010, les technologies thermoélectriques (récupération de la chaleur), combinées au développement des nanomatériaux, ont fait l'objet d'un appel à projet. Trois appels à projets sont programmés pour l'année 2011 pour un budget global de 20 M€. Les priorités sont le développement de matériaux (préférentiellement thermochimiques) et de systèmes compacts innovants de stockage saisonnier de la chaleur (intégration énergétique optimisée des différents composants). La densité énergétique et le volume d'encombrement des matériaux de stockage sont les paramètres clés de ces efforts de recherche. Ces appels à projets s'intègrent pleinement dans les orientations du SET Plan (*Technology Roadmap 2010-2020*).

## Les modèles d'affaires propices au déploiement des systèmes de stockage

A priori, dans la limite des contraintes technologiques, une plus large utilisation du stockage permettrait de rendre différents services à différents acteurs, améliorant ainsi la valorisation de ces technologies, ce qui en favoriserait l'émergence.

Dans les **systèmes électriques**, les études concordent sur la nécessité de mutualiser les services apportés par les unités de stockage pour les aider à atteindre un équilibre économique. La participation du stockage d'énergie à la fourniture de nouveaux « services système », tels que le lissage de la consommation, la gestion de congestions ponctuelles et plus généralement le fonctionnement global du réseau, pourrait être envisagée pour en favoriser le déploiement. Diverses nouvelles utilisations du stockage ont ainsi été testées dans le monde en appui aux réseaux ou pour favoriser la pénétration des EnR. Aux Etats-Unis par exemple, l'opérateur American Electric Power (AEP) utilise une batterie sodium-soufre pour différer des investissements de renforcement de ses réseaux de distribution. En complément, AEP utilise ces installations de stockage pour fournir des services système et garantir l'injection de production EnR sur le réseau. Notons que le *business model* repose ici sur le cas favorable d'un opérateur intégré (production-réseaux) et qu'il reste encore conditionné à une politique publique favorable.

Il existe toutefois des difficultés d'ordre commercial et juridique : problématique d'interaction entre acteurs régulés et dérégulés, questions de droits, de propriété et de priorités d'accès... Une autre voie possible serait un système d'enchères temporelles permettant à plusieurs acteurs d'accéder à un système de stockage.

Le **stockage thermique** étant, quant à lui, encore assez peu répandu, il est aujourd'hui difficile de trouver des exemples de mise en œuvre à grande échelle associés à des modèles d'affaires.

En termes d'**approches économique et régulatrice**, on retiendra deux catégories extrêmes :

- systèmes électriques pour lesquelles des spécifications techniques pour le raccordement au réseau ou des régulations (type obligations de capacité de stockage) conduisent les producteurs EnR (ou autres) à s'équiper en stockage. C'est le cas du Japon, où des exigences de lissage de la puissance injectée par les fermes éoliennes (gradient de puissance active injectée) nécessitent d'y associer un stockage (batteries sodium-soufre de capacités assez limitées). C'est aussi le cas des systèmes insulaires français dans le cadre de l'appel d'offre 2009 pour des installations de production à base d'énergie solaire où le stockage est obligatoire. Autre exemple qui ne sera peut-être pas employé, mais qui est à minima en discussion actuellement : un projet de régulation californienne pour des capacités de stockage directement liées au niveau du pic de consommation du système électrique ;
- systèmes électriques dans lesquels le stockage trouvera sa place par l'émergence de *business models* associés, sans aide publique ni évolution régulatrice. On peut imaginer que, dans ce cas, différents acteurs du système électrique auront accès au stockage d'énergie, ce qui leur permettra d'en tirer plusieurs services en parallèle, de partager les coûts d'investissement, de partager et réduire les risques associés.

Entre ces deux extrêmes, toutes sortes de combinaisons sont théoriquement possibles. Cependant, compte tenu de l'urgence d'adapter les systèmes électriques au développement des EnR, plusieurs pays européens modifient leurs régulations énergétiques en faveur du stockage d'énergie. Dans la plupart des cas, l'adaptation régulatrice concerne le tarif de réseau appliqué aux installations de stockage d'énergie. On notera par exemple que l'Allemagne a promulgué, début 2009, une loi exemptant du tarif d'accès au réseau toute nouvelle installation de stockage stationnaire (valeur située entre 5 et 25 €/MWh supplémentaires en fonction de la tension de raccordement et de l'intensité d'utilisation du stockage).

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### > 4. Les paramètres clés

La construction de visions à long terme repose sur l'identification de paramètres clés, des variables dont on sait que l'évolution contrastée aboutira à des scénarios radicalement différents du déploiement des dispositifs de stockage avancés à l'horizon 2050. Ils visent à mettre en avant les quelques variables qui, pour le groupe d'experts, seront de nature à infléchir significativement le déploiement des dispositifs de stockage à cet horizon.

**Deux familles de paramètres** ont été identifiées, les uns liés à la technologie des systèmes de stockage (performances, coût et architecture), les autres caractérisant leur environnement économique (systèmes de régulation, réglementation, modèle de valorisation du stockage).

#### **Paramètres technologiques**

En raison du déploiement programmé des énergies renouvelables et de nouveaux modes de transport, l'architecture des systèmes énergétiques devra nécessairement évoluer pour s'adapter. Force est de constater que cette évolution peut se faire selon différents degrés. Le cadre d'évolution dépend fortement des options technologiques disponibles pour accompagner le développement de la production décentralisée d'électricité, améliorer la maîtrise de la demande énergétique, offrir des services adaptés à la demande et améliorer l'efficacité énergétique de l'ensemble de la chaîne de valeur.

Des **verrous technologiques** persistants empêchent des solutions génériques de répondre à la quasi-totalité des besoins. Les services multisectoriels sont alors peu pertinents d'un point de vue fonctionnel ou économique (peu de convergence entre des secteurs d'application tels que habitat/transport, habitat/industrie, systèmes électriques/transport/habitat) : les différents domaines d'application, caractérisés par leurs profils d'usage (stationnaire et embarqué d'électricité et de chaleur) font appel à des **technologies de stockage spécifiques**.

A l'inverse, si une **technologie générique** est réalisable, elle devrait faciliter la **convergence des secteurs d'application** et s'accompagner d'un **effet d'échelle** propice à la baisse des coûts. Les technologies de stockage supporteraient alors la convergence des secteurs d'application et pourraient fortement influencer la nature et la dynamique de déploiement.

#### **Paramètres économiques**

Les modèles d'affaires proposés et les systèmes de régulation sont extrêmement structurants pour la filière et influencent nettement la nature des acteurs et des unités de stockage.

Dans un développement sous contraintes, motivé par des besoins très spécifiques dans un cadre économique peu favorable, ce qui est la tendance actuelle, le stockage n'est qu'une composante de l'activité globale d'un acteur du système énergétique. Il permet d'optimiser son activité (valorisation de production, soutien en tension, effacement, report d'investissement).

A contrario, bien que l'hypothèse d'un système régulé au niveau européen ne soit pas totalement exclue à l'horizon 2050, dans un système « ouvert », où une économie propre à l'activité stockage pourrait se développer, il est possible que les dispositifs de stockage et les acteurs qui les gèrent deviennent parties prenantes du système énergétique.

Ceci se matérialiserait par exemple par l'existence d'un statut juridique et de rôles spécifiques dans le système énergétique, de modèles d'affaires dédiés, de l'existence **d'acteurs spécifiques** comme des **agrégateurs** ou des **opérateurs de stockage** (*encadré ci-dessous*). Le stockage comporte une valeur économique intrinsèque sur le marché de l'énergie et peut éventuellement servir d'instrument d'arbitrage sur les marchés. L'émergence d'une telle économie passe par des évolutions significatives des systèmes de régulation et de tarification que le stockage soit centralisé, distribué ou diffus.

#### **De nouveaux acteurs dans le paysage énergétique**

Ce sont les **opérateurs de stockage**, qui gèrent des systèmes de stockage de moyenne et grande échelle, et les **agrégateurs**, qui sont des gestionnaires d'installations de stockage dispersées, capables de concevoir et d'offrir des services énergétiques aussi bien à des clients en aval qu'à des acteurs clés en amont.

Dans le premier cas de figure, le stockage est vu comme un outil d'optimisation, que ce soit pour l'acteur énergétique ou pour un autre acteur de la chaîne de valeur, comme un constructeur automobile. Dans le second cas, il est vu comme un acteur à part entière du système énergétique avec des fonctions spécifiques comme la fourniture de chaleur ou de froid à l'échelle d'un réseau, d'un microréseau, ou de services aux réseaux.

## > 5. Les visions prospectives

### Transition 2010-2050 :

---

#### 2010

Dans les pays industrialisés, le secteur des transports, principal contributeur à l'effet de serre, dépend quasi exclusivement du pétrole. L'automobile est une industrie lourde, capable d'investissements importants. En dehors des applications portables, le secteur automobile est celui qui, avec le développement des voitures électriques ou hybrides, tire majoritairement le marché du stockage électrochimique de nouvelle génération. Les premières productions de masse pour les systèmes de stockage embarqués sont lancées.

Les systèmes de stockage stationnaires sont dans une phase plus amont, au stade de la démonstration. Le développement des énergies renouvelables induit la question de leur intégration au sein des systèmes énergétiques existants. Leur caractère intermittent favorise les projets de recherche et développement sur de nouveaux systèmes de stockage stationnaires. Certains procédés (électriques et thermiques) atteignent des performances compatibles avec une application commerciale.

L'évolution du cadre régulateur afin de mieux reconnaître les spécificités et les bénéfices des systèmes de stockage de l'énergie est considérée comme prioritaire par les acteurs, aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle mondiale.

#### 2020

La production des systèmes de stockage embarqués pour le secteur des transports a atteint une taille industrielle, permettant un abaissement des coûts par effet de volume. L'amélioration des performances et de la fiabilité des batteries résulte de programmes de recherche spécifiques au secteur.

Dans le même temps, l'exploration des applications du stockage stationnaire intégré au système électrique, effectuée via les démonstrateurs utilisant les technologies disponibles (lithium 3<sup>e</sup> génération, sodium-soufre), a permis d'identifier les vecteurs de valorisation du stockage et d'en préciser les besoins en termes de performance.

Les systèmes de stockage thermiques ont progressé sous la double stimulation du coût de l'énergie de pointe et des EnR. Des démonstrateurs préindustriels à l'échelle 1 sont réalisés.

La mise en place d'un cadre commun et approuvé pour le développement de l'activité stockage offre une visibilité propre à favoriser les investissements par les différents acteurs de la filière et le déploiement commercial de systèmes de stockage.

#### 2030

La traction électrique automobile et l'hybridation sont des industries matures. Les infrastructures sont en place (unités de production, recyclage, recharge). Un marché de second usage existe pour les batteries du parc automobile. Cette croissance a permis la structuration d'une filière batteries adossée au secteur automobile et fonctionnant selon le même schéma industriel. De nouveaux types d'accumulateurs apparaissent en production (lithium 4<sup>e</sup> génération) qui, en fonction des progrès technologiques réalisés, pourraient constituer des solutions de stockage compatibles avec de nombreuses applications hors du secteur automobile. Des solutions génériques voient le jour.

Dans le domaine des EnR, l'installation de nouvelles capacités se poursuit à un rythme moins soutenu que par le passé. La visibilité apportée par les démonstrateurs permet d'engager les investissements nécessaires pour produire industriellement des systèmes de stockage dédiés au système électrique et aux EnR. Le coût des systèmes chute, permettant une meilleure rentabilité des installations.

Dans la dynamique des années précédentes, le stockage thermique atteint un stade industriel compatible avec des applications système. Des stockages de masse sont en service, pour des applications purement thermiques (bâtiments, procédés industriels, réseaux de chaleur) comme pour des applications couplées au réseau électrique.

### La vision 2020

---

Dans le secteur du transport terrestre, les plans de pénétration des véhicules particuliers électriques ou hybrides rechargeables indiquent, compte tenu du rythme de renouvellement du parc automobile et de la nature et de l'intensité des politiques publiques, que le parc de véhicules rechargeables devrait être compris entre 1 et 2 millions à l'horizon 2020<sup>12</sup>.

Dans le même temps, différentes formes de modèles d'affaires sont expérimentées pour soustraire les véhicules électriques de leur dépendance au soutien public (ex : systèmes de *leasing* des batteries, fourniture de service au réseau à travers la convergence entre bâtiments et transport).

A l'horizon 2020, les objectifs du Grenelle de l'environnement en matière de pénétration des énergies renouvelables électriques et thermiques et de bâtiments à énergie positive sont atteints.

Pour les énergies renouvelables électriques, cela se traduit par l'installation de 25 000 MW de capacités additionnelles composées essentiellement d'éoliennes (environ 20 000 MW additionnels) et de systèmes solaires photovoltaïques (environ 5 000 MW additionnels).

---

12 - Rapport Legrand sur la pénétration des véhicules électriques en France.

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

Jusqu'à 20 000 MW<sup>13</sup>, ces capacités additionnelles sont absorbées par le système électrique en actionnant quatre leviers :

- l'amélioration des modèles de prévision de la production des sources intermittentes ;
- l'optimisation de la localisation des différents sites de production afin de tirer profit des différentes zones climatiques françaises ;
- la poursuite du développement des interconnexions avec les réseaux européens de transport d'électricité ;
- l'évolution de l'architecture des réseaux de distribution et la croissance de leur « intelligence » permettent une gestion dynamique de la demande en fonction de l'état du réseau.

Pour aller au-delà de 20 000 MW, des degrés de liberté supplémentaires doivent être mobilisés, au travers notamment de systèmes de stockage adossés aux réseaux, aux installations de production intermittente ou directement chez le consommateur final (qui peut également être producteur).

Dans le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires, atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement suppose la construction de 400 000 à 500 000 bâtiments à énergie positive à l'horizon 2020. Ces bâtiments peuvent cependant, de façon ponctuelle, se retrouver en situation d'excédent ou de déficit d'énergie. Pour satisfaire en permanence les besoins de leurs utilisateurs, les bâtiments à énergie positive ont donc recours à différentes options, dont les systèmes de stockage. Ces systèmes, associés à un bâtiment ou à un ensemble de bâtiments (îlot, *encadré ci-dessous*), restituent lors des périodes de déficit énergétique l'énergie stockée pendant les périodes excédentaires.

#### Les îlots de bâtiments

Les îlots sont des groupements de bâtiments contigus ou non, d'usages diversifiés ou non (logements, équipements, bâtiments tertiaires), constituant une unité de fonction ou d'identité d'un quartier sur le plan énergétique, tant pour la mutualisation des besoins énergétiques que pour celle des productions énergétiques.

Ces systèmes de stockage sont, à cet horizon, essentiellement stationnaires, mais des expérimentations sont en cours pour tester des moyens de stockage mobile, à grande échelle (plusieurs centaines de véhicules électriques ou hybrides rechargeables et de bâtiments, *encadré ci-dessous*).

#### Des véhicules pour stocker l'électricité

A l'instar des ballons de stockage d'eau chaude sanitaire, on peut imaginer utiliser les véhicules rechargeables comme moyens de stockage d'électricité. Cela permettrait de soulager, d'une part, les consommations électriques des bâtiments, entre autres des bâtiments à énergie positive et, d'autre part, celles des réseaux de distribution d'électricité en leur venant en appui, en particulier dans un contexte de forte pénétration des énergies intermittentes.

#### Forces et faiblesses de la vision 2020

Ce scénario, qui décrit la première phase du déploiement des systèmes de stockage d'énergie dans les secteurs du bâtiment, des EnR et du transport, s'appuie sur les points forts suivants :

- des objectifs affichés en matière de transport, d'énergies renouvelables et de bâtiments, qui tendent à motiver les acteurs ;
- des marchés dans ces secteurs, qui, bien que faisant appel à des technologies spécifiques, offrent déjà un potentiel notable pour les industriels de la filière stockage.

Cependant, certaines faiblesses freinent encore la croissance de la filière stockage et doivent être levées en vue d'un déploiement industriel de masse pour la période 2020-2050 :

- un manque de visibilité sur des marchés émergents dont le développement dépend fortement des politiques publiques ;
- un marché domestique significatif mais insuffisant pour faire émerger une industrie de masse ;
- une concurrence internationale puissante et très active, en Asie, aux Etats-Unis, dont les marchés vont émerger les premiers, car leurs réseaux sont, pour certains, de moins bonne qualité ;
- une concurrence forte des autres « degrés de liberté » dans l'ensemble des secteurs d'application possibles du stockage (ex : biocarburants, interconnexions, systèmes de prévision de la production intermittente).

13 - Cet ordre de grandeur, fourni par RTE (Réseau de transport d'électricité, le responsable du système électrique français) dans le cadre de la feuille de route sur les « Systèmes et réseaux électriques intégrant les énergies renouvelables », ne doit pas être vu comme un seuil mais plutôt comme une limite issue de nos connaissances actuelles sur le fonctionnement des systèmes électriques et sur les modalités d'intégration des sources de production intermittentes aux réseaux. Il pourra être révisé (à la hausse ou à la baisse) en fonction de l'évolution des connaissances dans les années à venir.

## Les visions 2050

Les variations contrastées de ces deux familles de paramètres clés permettent d'aboutir à quatre visions alternatives du déploiement des systèmes de stockage sur le long terme (cf. tableau ci-après). Ces projections constituent des visions extrêmes dont les probabilités de réalisation respectives sont susceptibles de différer notablement entre elles. Cependant, l'identification de ces limites d'évolution du système technico-socio-économique permet de cerner un domaine réaliste de concrétisation.

Esquisse de visions de déploiement à long terme des systèmes de stockage d'énergie

		PARAMETRES ECONOMIQUES	
		Peu d'évolution des systèmes de régulation « cas contraint »	Evolutions significatives des systèmes de régulation « cas ouvert »
Paramètres technologiques	Déploiement sectorisé d'unités spécifiques	<p><b>Vision 1 :</b> <b>Le stockage sectoriel et ciblé</b></p> <p>Une vision tendancielle, la fonction stockage n'est qu'une composante d'une activité plus large.</p>	<p><b>Vision 2 :</b> <b>Les « consommateurs » et les agrégateurs de stockage</b></p> <p>Une offre technologique limitante dans un contexte socio-économique favorable. Des marchés de niche.</p>
	Déploiement s'appuyant sur des technologies génériques	<p><b>Vision 3 :</b> <b>L'offre multisectorielle à la marge</b></p> <p>Une vision « paradoxale » : technologie mature dans un contexte peu favorable aux investissements</p>	<p><b>Vision 4 :</b> <b>Les opérateurs de stockage</b></p> <p>Totale adéquation entre l'offre technologique et le contexte socio-économique.</p>

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### Vision 1 : Le stockage sectoriel et ciblé

Cette vision s'inscrit dans une évolution tendancielle de la situation actuelle. Les systèmes de stockage sont faiblement mutualisés entre les différents secteurs d'application (transports terrestres, bâtiments, réseaux énergétiques), mais également à l'intérieur d'un même secteur d'application. Le cadre normatif, réglementaire et régulateur reste lui aussi trop sectorisé pour favoriser l'émergence de modèles d'affaires plurisectoriels compétitifs.

Comme aujourd'hui, les caractéristiques et les fonctionnalités des systèmes de stockage (capacités de stockage, durée de la période de stockage) sont définies et optimisées en fonction du seul secteur d'application et du profil d'usage.

L'absence de mutualisation intersectorielle des systèmes de stockage, comme cela pourrait être le cas entre les bâtiments et les transports, s'explique par :

- la persistance de verrous technologiques et/ou économiques ;
- l'absence de pertinence énergétique, économique et environnementale de telles options pour atteindre des objectifs tels que le facteur 4 ;
- l'incapacité à faire émerger un modèle d'affaires permettant de trouver l'équilibre économique d'une telle option, en l'absence de soutien public.

Dans ce scénario, le stockage électrique reste bipolaire (embarqué et stationnaire). Les constructeurs automobiles ont intégré la branche embarquée alors que les producteurs d'énergie et les gestionnaires de réseaux restent les principaux acteurs de la valorisation de la branche stationnaire. Dans les applications stationnaires, le stockage électrique comme thermique est proposé au sein d'un ensemble de solutions permettant l'optimisation technico-économique d'une activité. Pour l'opérateur qui propose cette option globale (dans laquelle on retrouve le recours au stockage), la valorisation économique des dispositifs de stockage peut s'effectuer via une politique d'efficacité énergétique, de réduction de la facture énergétique, d'effacement temporaire, d'optimisation de la gestion technico-économique du réseau.

Vis-à-vis du système énergétique, chaque bâtiment à énergie positive et chaque site décentralisé de production d'énergie à partir de ressources renouvelables intermittentes ou non disposent de leur propre dispositif de stockage. Cela leur permet avec d'autres outils (maîtrise et pilotage de l'offre et de la demande, amélioration de l'efficacité énergétique et de la gestion de l'intermittence) d'avoir les degrés de liberté nécessaires à une optimisation locale. Cette activité peut prendre différentes formes selon l'échelle géographique considérée : stockage à l'échelle du particulier, pour valoriser sa production d'énergie renouvelable (optimisation très locale), ou système de stockage à grande échelle (STEP ou CAES), géré par les producteurs d'énergie ou des gestionnaires de réseaux de transport (stockage qui reste sectoriel dans l'utilisation de son énergie).

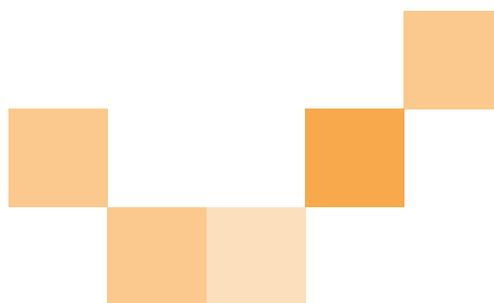
#### Vision 2 : Les « consommacteurs » et les agrégateurs

Cette vision fait l'hypothèse d'une importante évolution du cadre socio-économique sans que la technologie n'ait pu converger vers des solutions génériques. L'approche sectorielle de la fonction stockage reste donc forte.

La différence majeure avec la vision précédente réside dans l'évolution des systèmes de régulation qui conduit à la modification des systèmes de tarification et à l'émergence de nouveaux acteurs du système énergétique, dont certains spécifiques à l'activité de stockage. Une économie sectorielle propre à cette activité est mise en place. Des opérateurs ou agrégateurs de stockage apparaissent dans le paysage des acteurs énergétiques et contribuent au développement des technologies. Ce sont des spécialistes d'un domaine d'application spécifique (stockage stationnaire d'électricité, stockage embarqué, récupérateurs de chaleur), qui valorisent leurs investissements via une offre de services basée sur le stockage. On peut également voir apparaître des micro-acteurs voire des particuliers qui, à leur échelle, participent à un marché local de l'énergie et valorisent économiquement leur investissement (dispositif de stockage), soit directement en fonction de leurs besoins énergétiques, soit par la rémunération de services au système : on pourrait qualifier ces acteurs diffus de « consommacteurs ».

L'échelle géographique d'intervention de ces nouveaux acteurs est variée : cela peut se traduire par une agrégation de multiples dispositifs de stockage décentralisés, mais également par la mise en place de systèmes de stockage plus importants. Ce choix est le résultat d'une optimisation technico-économique.

Des systèmes sophistiqués de gestion de l'énergie sont développés et mis en place afin d'optimiser les interactions entre chaque système de stockage. Ceci est permis par une forte croissance de l'intelligence du système énergétique dans son ensemble et par les possibilités offertes par les nouvelles technologies de l'information et de la communication.



### Vision 3 : L'offre multisectorielle à la marge

Ici, les avancées technologiques ont permis l'émergence de solutions de stockage génériques facilitant la convergence entre secteurs d'application (bâtiments, transports, réseaux, industrie) et la valorisation technique des systèmes de stockage. Cependant, le contexte socio-économique et régulateur a très peu évolué contraignant les acteurs à des modèles d'affaires complexes et sectorisés.

Or, dans un domaine technologique où les progrès sont difficiles et les recherches coûteuses, les industriels doivent avoir une vision stable et favorable du contexte dans lequel leur marché prendra place pour effectuer les investissements nécessaires à une progression rapide de leur technologie. Le peu de cohérence entre technologie mature et marché contraint et sectorisé laisse supposer que ce scénario est peu probable à l'horizon 2050.

Dans l'hypothèse d'une concrétisation même partielle, le marché énergétique reste contraint, notamment en raison d'une faible évolution des systèmes de régulation.

Le système centralisé est toujours en place pour assurer l'approvisionnement en énergie, coordonner et optimiser le fonctionnement du réseau énergétique. Le pilotage des interactions entre les systèmes énergétiques (de toutes tailles) reste la mission des opérateurs centralisés.

Les options de stockage à valorisation multisectorielle sont peu présentes dans les systèmes énergétiques et s'intègrent, comme dans la vision 1, dans une stratégie d'optimisation pour une activité particulière. Les technologies génériques de stockage souffrent de l'absence de mécanismes incitatifs et d'acteurs les valorisant.

### Vision 4 : Les opérateurs de stockage

Dans cette vision, l'association des différents domaines d'application du stockage est combinée à une réflexion sur la valorisation économique de l'activité propre. L'apparition d'opérateurs dont l'activité est économiquement rentable résulte à la fois d'importants progrès technologiques pour les dispositifs de stockage et d'une réglementation ou de mécanismes incitatifs (au niveau national ou européen) favorisant le déploiement de cette filière.

Les technologies de stockage génériques autorisant une valorisation technique plurisectorielle (entre bâtiment et transport par exemple) sont matures et permettent d'optimiser la production d'énergie par une forte valorisation de chaque quantité d'énergie produite.

Des opérateurs spécifiques au stockage de l'énergie apparaissent et gèrent des unités de stockage de toutes tailles. Ces nouveaux opérateurs concurrents des producteurs et fournisseurs actuels proposent un modèle économique basé sur la rémunération d'énergie et de services fournis au système énergétique dans sa globalité (réseaux électriques, réseaux de chaleur, rechargement de batteries, appui aux dispositifs de production intermittente d'énergie, équilibrage offre/demande...).

Ils pilotent les systèmes de stockage avec l'objectif :

- de participer à la garantie de l'équilibre offre/demande à l'échelle de l'ensemble du système ;
- d'optimiser la valorisation de chaque quantité d'énergie produite (énergie renouvelable, énergie thermique fatale, autrement dit gaspillée) ;
- de proposer leur propre offre de stockage en appui des réseaux énergétiques classiques et en combinant stockage de l'électricité et de la chaleur.

L'activité de stockage est une activité à part entière au sein du système énergétique et participe activement aux arbitrages sur le marché de l'énergie.

Ce scénario est cohérent avec l'émergence d'îlots énergétiques (à différentes échelles) quasi autonomes en énergie en raison d'un couplage performant entre production fortement décentralisée, profils de consommation et dispositifs de stockage.

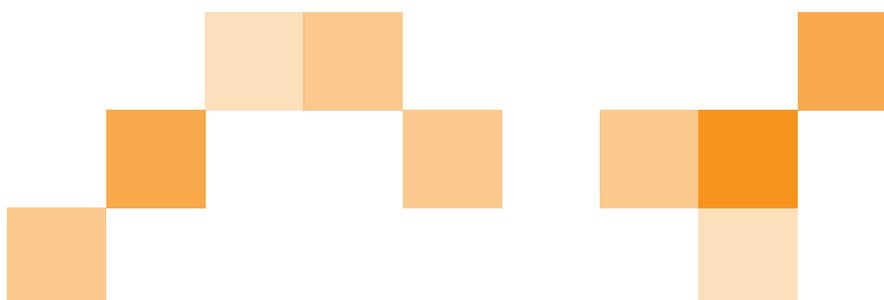
## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

Le tableau suivant précise les principales forces et faiblesses de ces quatre scénarios, ainsi que leurs principales caractéristiques, facteurs discriminants et acteurs clés.

Points forts et faibles des différentes visions 2050

	Forces	Faiblesses
<b>Vision 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de modification brutale du système énergétique et de sa gestion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte contrainte sur les coûts et les performances des systèmes de stockage, qui sont pensés individuellement</li> <li>• Faible dimension sociale</li> </ul>
<b>Vision 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acteurs spécifiques au stockage</li> <li>• Forte interaction avec la mise en place de réseaux électriques intelligents</li> <li>• Implication éventuellement forte du particulier ou d'un groupe de particuliers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence de mutualisation sectorielle limitant le potentiel de valorisation du moyen de stockage.</li> <li>• Forte dépendance de la valorisation économique au contexte réglementaire</li> <li>• Effet de niche constituant une barrière à l'entrée sur le marché</li> </ul>
<b>Vision 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evolution limitée du système énergétique</li> <li>• Mutualisation des secteurs d'application du stockage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'implication forte des consommateurs (échelle locale ou territoriale)</li> <li>• Vision paradoxale</li> </ul>
<b>Vision 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convergence de secteurs d'application du stockage</li> <li>• Optimisation des systèmes énergétiques</li> <li>• Solution alternative pour le consommateur</li> <li>• Emergence d'une gestion locale de l'énergie associée à une supervision centralisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèles d'affaires à créer, dédiés à l'activité de stockage</li> <li>• Importants besoins de développement techniques et d'engagements politiques.</li> </ul>



## > 6. Les verrous

Les visions 2020 et 2050 permettent d'identifier les verrous technologiques, économiques, organisationnels et transversaux conditionnant leur émergence.

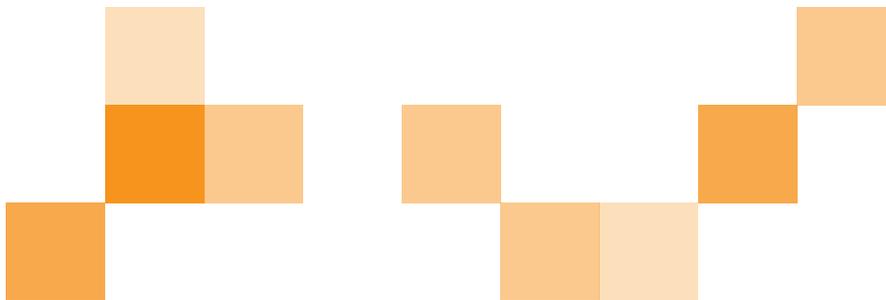
### Les verrous à caractère technologique :

D'une manière globale, la valorisation de la fonction stockage s'évalue à travers une approche coût/bénéfice sur l'ensemble du cycle de vie du système. Pour un opérateur donné cette vision est réduite au chiffre d'affaires généré par rapport au coût de possession. La structure de ce chiffre d'affaires conduit à considérer les caractéristiques techniques suivantes :

- **coût de fabrication, de démantèlement et de recyclage** : les procédés de fabrication peuvent être très coûteux. En outre, l'énergie emmagasinée dans les systèmes de stockage est quasi proportionnelle aux quantités de matières actives mises en jeux. De ce fait, pour l'électricité comme pour la chaleur, il y a lieu de rechercher des solutions mettant en œuvre des matériaux disponibles, peu coûteux et respectueux de l'environnement ;
- **rendement global** : parce qu'il impacte directement le bilan énergétique, ce paramètre joue un rôle primordial pour la valorisation du stockage d'énergie. Bien que certains dispositifs affichent des rendements intrinsèques d'un très bon niveau (batteries, supercondensateurs, volants d'inertie) l'intégration systémique de ces composants en vue d'une application donnée se traduit par une dégradation des performances. C'est pourquoi l'analyse du rendement d'un système de stockage doit intégrer toute la chaîne de conversion et les auxiliaires nécessaires à son fonctionnement ;

- **autodécharge** : ce paramètre, assimilable à une fuite, correspond à la perte d'énergie du milieu de stockage lorsque celui-ci n'est pas sollicité. Ici, par commodité, on assimilera également à de l'autodécharge la puissance nécessaire au maintien du système opérationnel dans un état de charge donné. L'impact de ce paramètre sur le rendement global du système dépend donc du cycle d'usage. Les applications faisant appel au transfert temporel d'énergie (lissage de charge, arbitrage sur les marchés, report des investissements dans les réseaux) y sont plus sensibles que celles dites « de stockage de puissance » (mobilisation en quelques fractions de seconde de puissances importantes, mais pour des durées très courtes) ;
- **durée de vie** : s'agissant généralement d'un ensemble coûteux, l'investissement lié à un système de stockage doit pouvoir s'amortir sur la plus longue période possible. Parce qu'ils sont reconditionnables (contrairement aux systèmes électrochimiques), les systèmes de stockage physiques (volants d'inertie ou systèmes hydropneumatiques) sont peu impactés par ce critère. Il n'en est pas de même pour les dispositifs électrochimiques et thermiques pour lesquels le vieillissement des matières actives, sous l'effet des sollicitations (vieillissement lors des cycles successifs de fonctionnement) et du temps (vieillissement calendaire), doit être amélioré.

En plus de ces verrous communs à l'ensemble des dispositifs de stockage d'énergie, les tableaux ci-après énumèrent les verrous propres à chacune des technologies considérées dans cette feuille de route.



## Feuille de route Les systèmes de stockage d'énergie

Stockage de l'électricité									
Electrochimique			Physique						
Stationnaire	Embarqué	Volants d'inertie	SMES	Hydro-pneumatique	Hydraulique	AACAES	Thermo-dynamique		
Durée de vie	Amélioration des densités (puissance, énergie)	Coût	Matériaux (toxicité) Coût	Gestion de l'interface gaz-liquide	Flexibilité en puissance	Optimisation des machines de conversion (compresseurs, expandeurs...)	Matériaux de stockage haute température		
Sécurité	Sécurité	Sécurité	Température critique	Rendement de conversion	Ubiquité : capacité de s'adapter à des sites plus exigeants : faible ou grande hauteur de chute, eau de mer...	Stockage thermique (matériaux de stockage et d'enveloppe ; échangeurs stockeurs)	Adaptation des machines thermodynamiques (turbines, compresseurs)		
Coût (dont disponibilité des matières premières)	Coût (dont disponibilité des matières premières)	Rendement (consommation en entretien)		Optimisation du couple de fluides de travail	Rendement (pour des aspects économiques)	Intégration système	Intégration système		
Rendement global	Maitrise des effets gyroscopiques (embarqué)				Développement d'électroniques de puissance	Rendement global	Rendement global		
Connaissance et modélisation des phénomènes de dégradation	Connaissances et modélisation des phénomènes de vieillissement en énergie et puissance				Acceptabilité				

Stockage thermique		
Court terme	Marché basse température et petite capacité	Intersaisonnier
	Compacité	Fiabilité
	Durée de vie	Maintenabilité
	Puissance d'échange	Puissance d'échange (stockage thermochimique)
Matériaux haute température (industrie)	MCP (Matériaux à changement de phase) (habitat)	Autodécharge
Coût		

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### **Les verrous à caractère socio-économique, liés à la régulation et à l'environnement**

Au-delà de ce premier type de verrous propres aux différentes technologies, les visions 2020 et 2050 permettent de poser les conditions socio-économiques de leur émergence et d'une intégration plus poussée des dispositifs de stockage. Des verrous régulateurs et environnementaux doivent aussi être levés.

#### **Verrous socio-économiques**

Ils concernent, entre autres, la rentabilité économique, les coûts globaux des dispositifs de stockage et les modèles d'affaires pertinents pour leur déploiement :

- Le coût total (investissement + exploitation) des installations de stockage de même que le retour sur investissement restent souvent trop importants à ce jour pour les rendre compétitifs par rapport aux solutions conventionnelles (véhicules thermiques, centrales thermiques à gaz, interconnexions, méthodes de pilotage de charge, méthodes de prévision de la production intermittente...);
- L'intensité du déploiement des dispositifs de stockage dépendra fortement des modèles d'affaires réalisables. L'identification de modèles d'affaires rentables pour l'utilisation du stockage reste difficile et complexe dans un système multi-acteur et multiservice. Parallèlement, aucune généralisation du problème de la valorisation du stockage n'a été proposée. Selon les marchés, les usages, la localisation et les acteurs concernés, la valeur économique de l'option de stockage peut varier dans de larges proportions.
- Dans un objectif d'investissements industriels, la forte dépendance des marchés aux politiques publiques en matière d'énergie apparaît comme un frein au déploiement des technologies de stockage.
- L'acceptabilité des populations, notamment vis-à-vis du stockage de masse est à considérer.

#### **Verrous liés à la régulation**

Principalement développé dans une vision centralisée, le cadre législatif et réglementaire actuel est peu adapté à la mise en œuvre de moyens de stockage adossés à la production décentralisée d'énergie.

- Le contexte de régulation européen, qui multiplie les acteurs au sein du système énergétique, complexifie voire limite le potentiel du stockage (réseau, producteur, fournisseur, distributeur, utilisateur). Actuellement, il n'existe pas à l'échelle européenne de cadre régulateur clair et harmonisé pour le stockage.
- La directive Reach<sup>14</sup>, qui implique que toute substance fabriquée ou importée en quantité supérieure à 10 tonnes par an fasse l'objet d'un rapport sur la sécurité chimique afin de démontrer l'absence de nocivité pour l'homme et l'environnement, entraînera des surcoûts et délais supplémentaires au déploiement industriel des nouveaux matériaux de stockage.
- L'absence de règles juridiques, et plus largement d'un cadre institutionnel, est un frein à l'émergence de nouveaux opérateurs et de nouveaux services énergétiques liés au stockage.
- Bien que bénéfiques à la structuration de la filière de production d'électricité renouvelable, les obligations d'achat et les tarifs associés doivent être révisés afin d'aménager une place pour le développement du stockage sans pénaliser la filière production.
- En France, comme dans bien d'autres pays de l'Union européenne, l'exploitant d'un système de stockage doit s'acquitter de frais d'accès aux réseaux lors du soutirage puis de la réinjection de l'électricité stockée, ce qui pénalise la rentabilité des installations. Une analyse fine des conditions d'accès pourrait permettre l'élaboration d'une tarification mieux adaptée (horosaisonnalité par exemple).
- Pour les systèmes de stockage de masse nécessitant l'utilisation du domaine public, le principe de l'appel d'offre pour le renouvellement des concessions constitue un frein aux investissements en ne donnant pas de garantie à long terme aux investisseurs.
- Pour faciliter l'intégration des systèmes de stockage dans les bâtiments, un cadre réglementaire doit être défini pour donner aux industriels des lignes directrices précises dans la conception de leurs produits.
- Au vu de l'actuelle diversité des solutions de stockage, des travaux sur la normalisation et la standardisation doivent être menés afin de favoriser l'émergence de solutions mutualisées et/ou génériques.

14 - Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemical substances, réglementation chimique européenne. entré en vigueur en juin 2007.

### **Verrous environnementaux/maîtrise des risques**

Quelle que soit sa nature (thermique, mécanique, électrique, etc...), stocker de l'énergie consiste à la confiner dans un minimum de volume et de masse, ce qui tend généralement vers de l'instabilité. Par ailleurs, la recherche de matériaux de stockage toujours plus performants conduit à utiliser des produits dont on ne connaît pas toujours bien tous les impacts.

De ce fait, l'ensemble des technologies de stockage actuellement développées doit faire l'objet d'une évaluation précise de leurs impacts sanitaires et environnementaux afin de comprendre et de maîtriser les risques inhérents à leur utilisation.

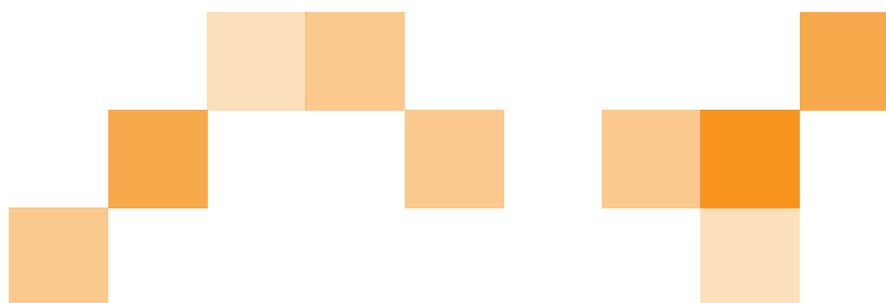
# Feuille de route

## Les systèmes de stockage d'énergie

### > 7. Les priorités de recherche

Logiquement, les recherches à entreprendre doivent permettre de lever les verrous identifiés pour les différents systèmes de stockage d'énergie. Ils sont rappelés ici avec une hiérarchisation des actions à entreprendre.

Stockage de l'électricité		
Systèmes électrochimiques		
	Stationnaire	Embarqué
<b>Priorité 1</b>	Augmentation de la durée de vie Amélioration de la sécurité intrinsèque Recherche de systèmes adaptés au stockage de masse (red-ox flow, métal-air...)	Amélioration des densités en énergie et en puissance Réduction des coûts Caractérisation et modélisation des phénomènes de vieillissement en puissance et en cyclage profond <sup>15</sup>
<b>Priorité 2</b>	Coûts, dont recherche de solutions à base de matériaux largement disponibles	Amélioration de la sécurité intrinsèque



Stockage de l'électricité						
Systèmes physiques						
	Volants d'inertie	SMES	Hydro-pneumatique	Hydraulique	AACAES	Thermo-dynamique
<b>Priorité 1</b>	Diminution de la consommation de maintien Réduction des coûts		Amélioration du rendement système	Amélioration de la flexibilité en puissance et du rendement de cycle	Structure et matériaux de l'échangeur/stockeur haute température	
<b>Priorité 2</b>	Structures et matériaux rotoriques	Matériaux supraconducteurs (toxicité, température critique, coût)		Adaptation à des sites plus exigeants (très hautes chutes, eau de mer...)	Optimisation des machines de conversion et intégration systémique	
<b>Priorité 3</b>	Maîtrise des effets gyroscopiques (embarqué)		Optimisation du couple de fluides de travail et gestion de l'interface gaz/liquide		Evaluation et gestion des risques	

Stockage thermique			
	Court terme	Marché basse température et petite capacité	Intersaisonnier
<b>Priorité 1</b>	Développement de matériaux haute température pour l'industrie	Développement de MCP bas coût pour l'habitat	Réduction des pertes
<b>Priorité 2</b>	Amélioration de la puissance d'échange		Amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité des systèmes
<b>Priorité 3</b>	Développement d'échangeurs/stockeurs compacts		Réduction des coûts de mise en œuvre

## Feuille de route

### Les systèmes de stockage d'énergie

#### > 8. Les besoins de plates-formes expérimentales et de démonstrateurs de recherche

La grande diversité des technologies de stockage de l'énergie engendre implicitement d'importants besoins en moyens d'essai.

Pour les **systèmes de petite capacité**, la démonstration de performance et de durée de vie peut s'effectuer à l'aide des **plates-formes expérimentales**, outils indispensables pour évaluer de nouveaux systèmes de stockage. Comme nous l'avons évoqué, l'équilibre économique d'un système de stockage est fortement dépendant de sa durée de vie. Outre une caractérisation des performances initiales (rendement, puissance, etc...), il est donc nécessaire de connaître leur évolution au cours de la vie du système et en fonction des sollicitations. A ce jour, si l'électrochimie est clairement identifiée comme moyen d'évaluation, il en sera rapidement de même pour le stockage de chaleur et les dispositifs physiques tels les volants d'inertie, les systèmes hydropneumatiques, etc...

De tels tests, qui mobilisent sur de longues périodes d'importants moyens techniques et humains, sont par nature coûteux, ce qui en limite l'accès, notamment vis-à-vis des nouvelles sociétés innovantes. Au vu de ce constat et du tissu existant de laboratoires à l'échelle nationale, il y a donc lieu de **mutualiser les moyens d'essai** au travers de **plates-formes expérimentales ouvertes** à l'ensemble des acteurs de la filière. Une démarche en ce sens est en cours au sein du « réseau de recherche et technologie sur les batteries », qui a constitué un centre de recherche technologique regroupant le CEA, l'IFP, l'Ineris<sup>16</sup> et l'Inrets<sup>17</sup> (*encadré ci-dessous*).

#### Le réseau de recherche et technologie sur les batteries

Avec les principaux acteurs de la recherche publique et les industriels, ce réseau national, créé en juillet 2010, s'appuie sur deux centres de recherche : un centre de recherche amont piloté par le CNRS et qui a pour mission d'explorer les nouveaux concepts de batteries, en particulier les matériaux à haute performance ; et un centre de recherche technologique, piloté par le CEA, qui testera et validera ces nouveaux concepts.

D'autres initiatives de ce type pourraient être mises en place, notamment sur la base du réseau Simstock (*encadré ci-dessous*).

#### Le programme Simstock

Labellisé par le Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (Predit) dans le cadre du plan Véhicules propres et économes, ce programme est un large partenariat composé d'industriels, de laboratoires et d'organismes publics. D'une durée de trois ans, il a vocation à poser les bases d'une force nationale de recherche et développement sur les systèmes de stockage d'énergie en mutualisant autant que possible les compétences et les moyens.

Néanmoins, destinés à de **grandes séries**, ces dispositifs de petite capacité doivent, pour être compétitifs et fiables, être fabriqués selon des procédés industriels très performants. La mise en œuvre d'une ligne de fabrication pilote relève alors d'un **démonstrateur**. Les démonstrateurs de recherche constituent la preuve en vraie grandeur de la faisabilité d'une solution technologique ou d'un concept. Ils se situent donc à la charnière entre le laboratoire industriel et le marché.

A l'opposé, les **dispositifs de stockage de masse** (thermiques intersaisonniers, électriques avec des services système, etc...) ne peuvent être validés qu'au travers de **démonstrateurs**.

Par ailleurs, les différentes visions élaborées dans ce document, introduisent les concepts d'agrégation de stockage diffus et d'application plurisectorielle (mutualisation des investissements) dans l'évolution des systèmes énergétiques. Ces deux nouveaux concepts appellent des démonstrations en vraie grandeur en vue, d'une part, d'évaluer leurs impacts sur les technologies de stockage mises en œuvre et, d'autre part, de mieux connaître leur valeur ajoutée dans les modèles d'affaires liés au stockage d'énergie.

16 - Institut national de l'environnement industriel et des risques.

17 - Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.

## > 9. Préindustrialisation et première mise sur le marché

Le coût étant un des verrous majeur au développement des systèmes de stockage, d'importants investissements seront nécessaires afin de mettre en place des unités de production de grandes séries pour les petits systèmes et une offre technico-économique compétitive pour le stockage de masse. Une des priorités pour le développement de la filière apparaît donc comme la définition d'un cadre stable permettant de fiabiliser les modèles d'affaires en apportant une plus grande visibilité sur le long terme.

Il apparaît également que, pour construire leurs systèmes de stockage, les industriels français sont contraints de s'approvisionner à l'étranger en matières premières et composants. Qu'il s'agisse de stockage d'électricité ou de chaleur, il conviendrait donc de favoriser l'émergence d'un tissu de fournisseurs nationaux pour les composants des systèmes de stockage. Ces nouveaux fournisseurs peuvent aussi bien provenir de la diversification de grands groupes (Saint-Gobain, Arkema, Alstom...) que d'un tissu de PME innovantes et spécialisées.

Enfin, s'agissant d'un marché émergent mais voué à une forte progression à l'échelle mondiale, il apparaît important de s'appuyer sur des démonstrations d'envergure afin de constituer une vitrine internationale pour la technologie et le savoir-faire français dans le domaine du stockage d'énergie.

## L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)