



Le stockage d'énergie par batterie : un avenir prometteur ?

Avril 2017

Benjamin Cano
Caroline Dornstetter
Rémi Gilliotte
Alexandra Perrin

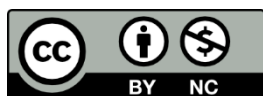


Synthèse

Le stockage d'énergie est au cœur des enjeux actuels liés à la transition énergétique, en particulier le stockage d'énergie par batterie, qui par ses caractéristiques permet de rendre de nombreux services aux différents acteurs du système électrique. Le stockage d'énergie par batterie est actuellement **l'une des briques manquantes des réseaux dits « intelligents » ou Smart Grids**, capables d'intégrer efficacement les nouveaux modes de production (notamment la part croissante des énergies renouvelables dans le mix énergétique) et de consommation, en exploitant le potentiel des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Même si plusieurs freins, notamment économiques, empêchent aujourd'hui le déploiement massif du stockage par batterie en France, **de nombreuses initiatives ont été prises dans le pays ces dernières années** (e.g. expérimentations, investissements, plan de reconquête industrielle), véritables signes d'espoir pour la filière.

Il conviendrait de conduire un certain nombre d'actions dans les prochaines années afin de **déployer une stratégie industrielle dans le domaine du stockage par batterie et faire émerger des champions français en particulier dans la fourniture des systèmes et des services associés** aux batteries. Par exemple : déployer le stockage là où il est déjà rentable, typiquement en zones insulaires ; définir le rôle du stockage pour donner une meilleure visibilité aux acteurs impliqués ; identifier les facteurs clés de succès d'un déploiement du stockage par batterie en métropole ainsi que les modalités de soutien des pouvoirs publics pour les segments de marché les plus prometteurs.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution – Non Commercial 4.0 International : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Sommaire

Remerciements.....	4
I. Le stockage d'énergie par batterie, un vecteur majeur de la transition énergétique	5
II. Les services rendus par le stockage par batterie	9
III. Des freins à lever pour un déploiement massif du stockage par batterie en France	12
IV. Les initiatives prises en France ces dernières années	15
V. Enjeux et perspectives de la filière française.....	20
Conclusion	26
Bibliographie.....	27
À propos de Yélé Consulting.....	28
À propos des auteurs.....	29

Remerciements

L'équipe de Yélé Consulting tient à remercier chaleureusement, pour les informations et explications qu'ils ont fournies pour cette étude :

Antoine Albrecht (IFP-EN)
Alberto Jorge Maia Bernardo (Efacec Energia)
Patrick Canal (ATEE)
Karim El Alami (Elum)
Frédéric Eve (Enedis)
Patrick Leguillette (BeeBryte)
Richard Loyen (Enerplan)
Ismael Miranda (Efacec Energia)
Louise Oriol (DGEC)
Marion Perrin (CEA)
Michaël Salomon (Clean Horizon Consulting)
Cédric Thoma (DGEC)
Geoffroy Ville (Atawey)

I. Le stockage d'énergie par batterie, un vecteur majeur de la transition énergétique

Le stockage au cœur de la transition énergétique

En réponse aux objectifs définis pour lutter contre le changement climatique, de nombreux pays ont amorcé leur transition énergétique et se sont engagés à réduire les émissions de CO₂ provenant du secteur de l'énergie, tout en visant une plus grande indépendance énergétique. Pour ce faire, il s'agit d'activer trois leviers :

- Le développement de la sobriété et de l'efficacité énergétique ;
- Le développement d'un mix énergétique moins carboné ;
- La sûreté d'approvisionnement par la diversification des sources d'énergie.

Ainsi, de grands chantiers ont été lancés dans plusieurs pays, dont la France : la rénovation énergétique des bâtiments existants, l'éco-conception et l'éco-construction des nouveaux bâtiments, le développement de moyens de production d'électricité non (ou moins) émetteurs de CO₂, la limitation de la production à partir d'énergie fossile et l'augmentation des capacités d'interconnexion entre réseaux électriques de pays voisins.

Figure 1 : Les grands chantiers lancés au service de la transition énergétique

Les grands chantiers	Illustrations	Sobriété et efficacité énergétique	Mix énergétique moins carboné	Diversification des sources d'énergie
Rénovation énergétique des bâtiments existants	Isolation thermique des bâtiments, changement d'équipement technique existant (e.g. chaudière)	✓		
Éco-conception et éco-construction des nouveaux bâtiments	Architecture bioclimatique, choix de matériaux biosourcés	✓		
Développement des moyens de production moins carbonés	Hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque, hydrolienne, biomasse, biogaz, centrale à gaz à cycle combiné		✓	✓
Limitation de la production à partir d'énergie fossile	Réduction de la production à partir de centrales à charbon et au fioul		✓	
Augmentation des capacités d'interconnexion	Nouvelle ligne très haute tension entre deux pays voisins (e.g. France-Espagne)			✓

Source : analyse Yélé Consulting d'après diverses sources

Plusieurs solutions de flexibilité de production et de consommation sont utilisées pour aider à la mise en œuvre de ces grands chantiers et résoudre les problèmes qu'ils engendrent en termes de gestion de l'équilibre offre/demande du système électrique (problèmes accentués notamment par l'intégration massive des énergies intermittentes au réseau) et de congestions réseau (problèmes accentués notamment par la décentralisation des usages et la modification des profils de consommation). Ces solutions de flexibilité sont : le stockage d'énergie, la capacité de modulation des centrales électriques, les solutions de flexibilité de la consommation, les solutions de gestion et d'optimisation énergétique, la constitution de réserves de capacité de production et le couplage des marchés de gros de l'électricité.

Figure 2 : Les solutions de flexibilité de production et de consommation

Solutions de flexibilité	Illustrations
Stockage d'énergie	Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), batterie à électrodes solides, procédé « power-to-gas »
Capacité de modulation des centrales	Capacité de centrales à gaz ou hydrauliques à moduler leur production en fonction des besoins d'équilibre offre/demande
Solutions de flexibilité de la consommation électrique	Effacement de consommation, valorisation des reports de consommation, valorisation de la surconsommation (effacement par anticipation), tarification dynamique
Solutions de gestion et d'optimisation énergétique	Compteurs intelligents, plateformes logicielles d'optimisation des consommations et productions locales d'énergie
Constitution de réserves de capacité de production	Garantie de capacités de production fournie par les producteurs, mobilisables selon les besoins du gestionnaire de réseau assurant l'équilibre offre/demande
Couplage des marchés de gros de l'électricité	Couplage opéré depuis fin 2010 entre la France, l'Allemagne et le Bénélux et géré par les bourses d'électricité Epex Spot (en France et en Allemagne), Belpex (en Belgique) et APX (au Pays-Bas)

Source : analyse Yélé Consulting d'après diverses sources

Les différentes technologies de stockage

L'électricité étant très difficile à stocker, il est nécessaire de la convertir sous une autre forme d'énergie pour la reconvertir en électricité et la restituer au moment opportun. Plusieurs caractéristiques permettent de différencier les technologies de stockage entre elles, comme par exemple la puissance de stockage (la puissance qu'elles sont capables de fournir) et le temps de décharge (le temps pendant lequel elles peuvent fournir cette puissance). Ainsi, on distingue principalement deux types d'utilisation pour le stockage :

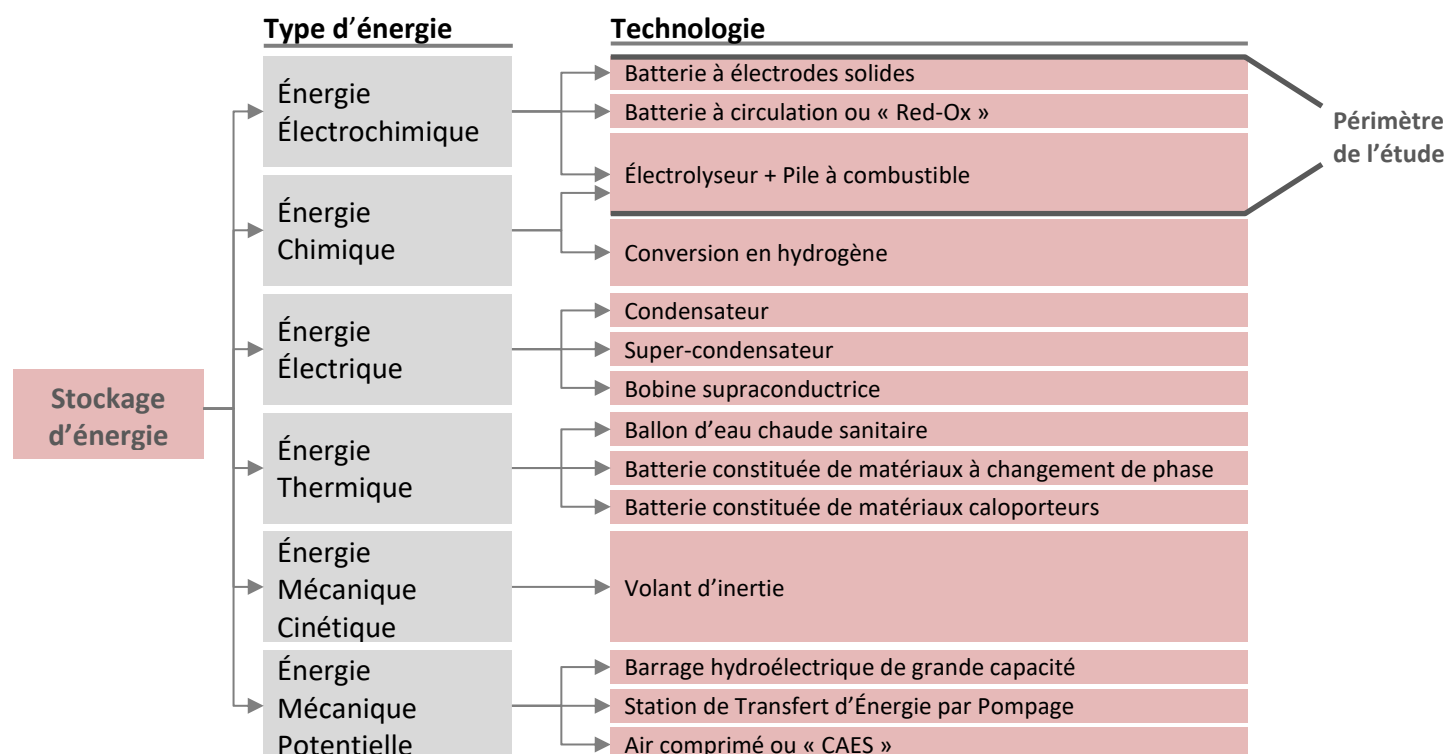
- Une utilisation « en puissance » pour des durées de stockage courtes ;
- Une utilisation « en énergie » pour des durées de stockage plus longues.

La technologie la plus utilisée actuellement est le stockage par pompage hydraulique (via les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage ou STEP) représentant plus de 95% des capacités de stockage installées au niveau mondial. Une large gamme de solutions est en cours de développement préindustriel, comme par exemple le procédé « power-to-gas » qui convertit l'électricité en hydrogène, capable d'assurer un stockage long terme intersaisonnier.

Cette étude se focalise sur le stockage par batterie, qui regroupe trois technologies : les batteries à électrodes solides, les batteries à circulation et les piles à combustible (associées à des électrolyseurs). Ces technologies permettent de stocker des quantités d'électricité relativement limitées et sont donc adaptées à des problématiques de stockage court terme dont les applications sont essentiellement associées au réseau de distribution. Ainsi, le stockage par batterie est étroitement lié aux problématiques actuelles du secteur de l'électricité, notamment :

- L'équilibrage en temps réel entre la production et la consommation, spécifique à l'électricité ;
- La décentralisation énergétique, donnant un rôle prépondérant au réseau de distribution qui doit faciliter le rapprochement des sites de production et de consommation.

Figure 3 : Les différentes technologies de stockage d'énergie

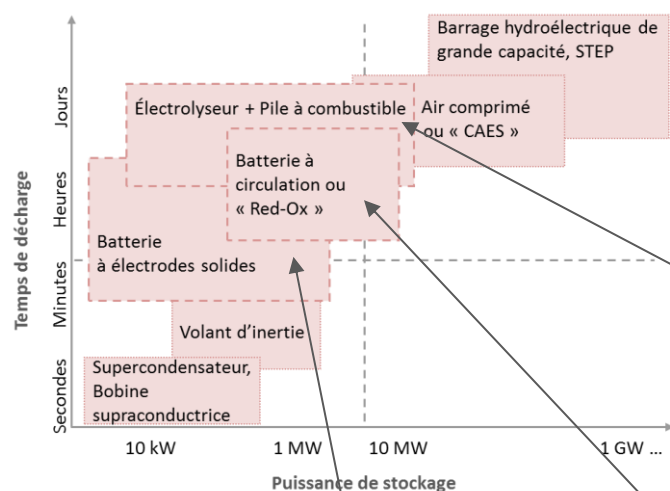


Source : analyse Yélé Consulting d'après diverses sources

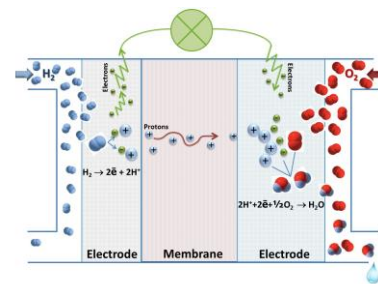
Le stockage par batterie, considéré dans cette étude dans son usage stationnaire, est une filière aujourd'hui peu mature mais qui connaît un véritable essor depuis plusieurs années.

Les caractéristiques du stockage par batterie

Figure 4 : Comparaison de technologies de stockage (sélection de technologies)



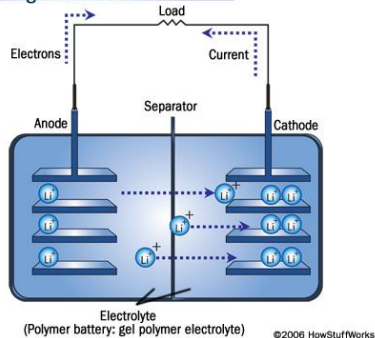
Source : analyse Yélé Consulting d'après IFP-EN



Électrolyseur + Pile à combustible

En phase de charge, appelée « électrolyse de l'eau », l'électricité permet la décomposition de l'eau en dioxygène et dihydrogène à l'état gazeux qui sont stockés dans deux réservoirs séparés. En phase de décharge, la réaction inverse se produit, créant un déplacement d'électron (et donc un courant électrique). Ces deux réactions sont rendues possibles grâce à une membrane permettant les échanges d'ions et d'électrons.

Lithium-ion rechargeable battery Discharge mechanism

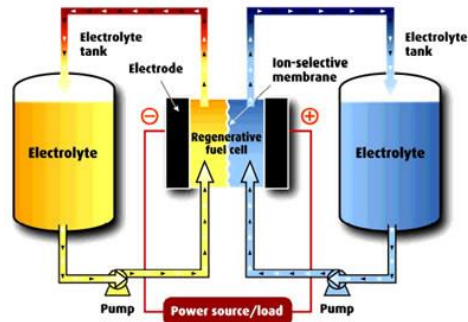


Batterie à électrodes solides (exemple du Lithium-Ion)

En phase de charge, le courant électrique induit le déplacement d'ions Li^+ de l'électrode en oxyde métallique de Lithium vers l'électrode en carbone. En phase de décharge, ces ions reviennent à leur position initiale, provoquant un déplacement d'électron dans le sens opposé, un courant électrique est donc créé.

Les batteries à électrodes solides peuvent s'appuyer sur d'autres matériaux que le Lithium, comme le plomb ou le Zinc-Nickel.

Schéma d'une batterie à circulation



Batterie à circulation ou « Red-Ox »

L'énergie est stockée dans deux électrolytes situés dans des réservoirs différents. La cellule centrale dispose de deux compartiments séparés par une membrane poreuse, laquelle permet des échanges d'ions lors de réactions d'oxydation et de réduction, qui créent un courant.

La puissance de la batterie est déterminée par la surface d'échange utilisable entre les deux éléments, et l'énergie par le volume d'électrolyte stocké.

Les batteries à électrodes solides, les batteries à circulation et les piles à combustible sont d'un bon niveau de maturité technologique et commencent à se déployer à travers le monde, notamment en Amérique du Nord, en Asie et en Europe, offrant un vaste champ d'applications :

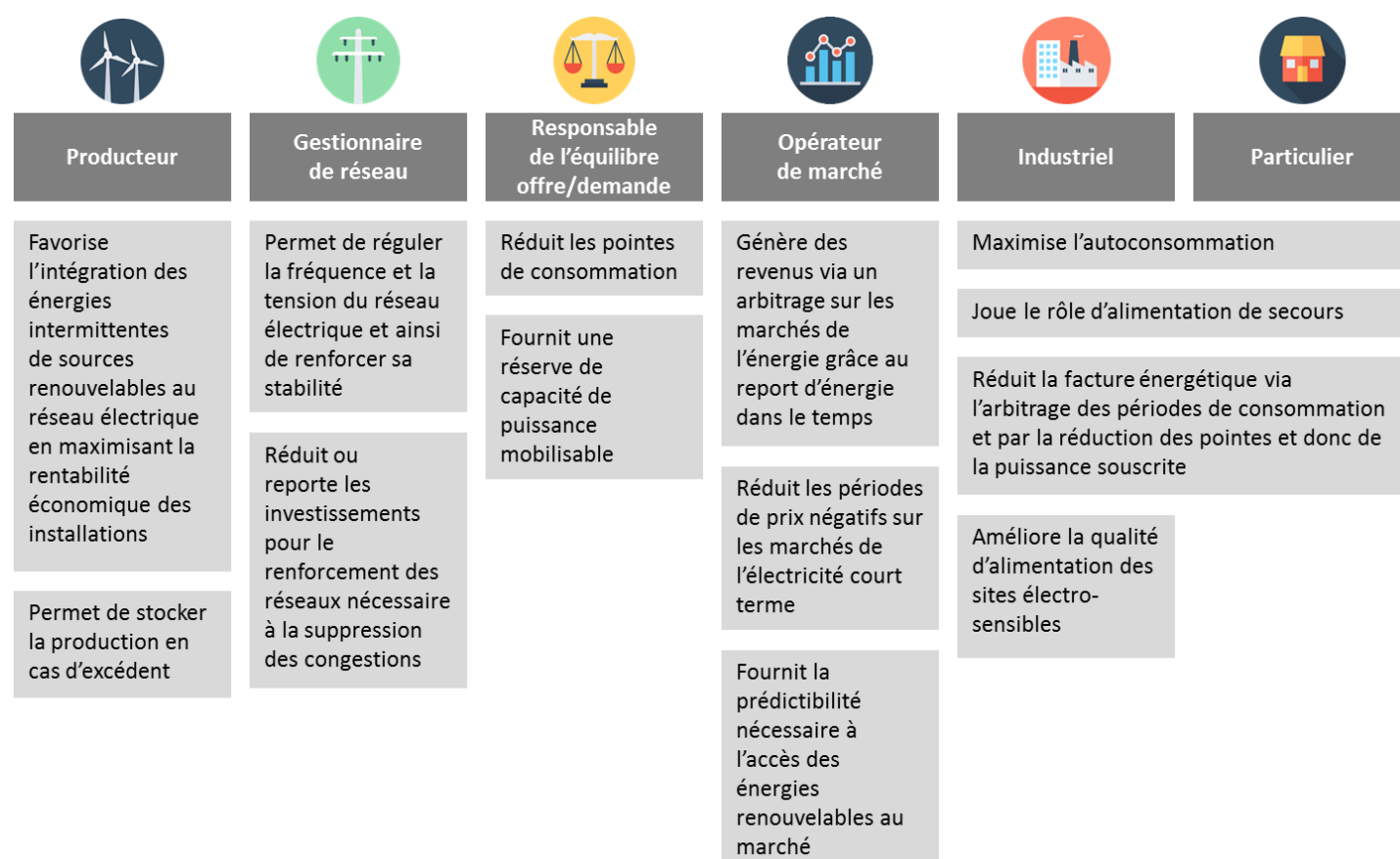
- Les batteries à électrodes solides, en raison de leur faible puissance de stockage et de leur faible temps de décharge, trouvent principalement leur utilisation à l'échelle d'une maison individuelle ou d'un bâtiment (en particulier les batteries Lithium-Ion dont la forte densité énergétique permet un faible encombrement) ;
- Les batteries à circulation et les piles à combustible peuvent stocker une plus grande quantité d'énergie et sont donc plus adaptées aux besoins de grands sites industriels.

II. Les services rendus par le stockage par batterie

Les différents services rendus aux acteurs du système électrique

Le stockage par batterie, aux côtés des autres solutions de flexibilité, rend différents services aux acteurs du système électrique : producteurs, gestionnaires de réseaux de transport et de distribution, responsables de l'équilibre offre/demande, opérateurs de marché, consommateurs industriels et particuliers. Ces différents services sont répertoriés dans le graphe ci-dessous :

Figure 5 : Les services rendus par le stockage par batterie aux acteurs du système électrique



Sources : interviews d'experts, analyse Yélé Consulting

Ces différents services ont trois finalités principales :

- Réduire la facture énergétique ;
- Sécuriser l'approvisionnement électrique, y compris pour les réseaux isolés ;
- Valoriser au mieux les actifs de production.

➤ Réduire la facture énergétique

Les systèmes de stockage peuvent être utilisés afin de réduire les pics de consommation, en déchargeant lors des pointes l'électricité stockée pendant des creux de consommation. Ceci permet d'éviter de mobiliser des moyens de production thermique (gaz ou charbon) très polluants et onéreux pour répondre à la pointe de consommation. Il pourrait également en résulter des économies pour les gestionnaires de réseaux grâce aux reports (voire à l'annulation) des investissements de renforcement du réseau car celui-ci aura une pointe moins importante à supporter. La réduction de ce pic pourrait aussi être utile à plus petite échelle chez les

industriels ou encore chez les clients résidentiels et tertiaires, en limitant leur puissance souscrite au réseau et donc le coût de leur abonnement.

Par ailleurs, les systèmes de stockage permettent « l'arbitrage d'énergie », c'est-à-dire la capacité à consommer l'électricité lors des périodes creuses et à la restituer en période de pointe lorsque le prix de l'électricité sur les marchés de gros est au plus haut. Ainsi, les gros consommateurs peuvent réduire leur facture d'électricité en lissant leur consommation d'électricité dans le temps. Dans une moindre mesure, ces bénéfices peuvent être apportés à de plus petits consommateurs.

➤ **Sécuriser l'approvisionnement électrique, y compris pour les réseaux isolés**

Le stockage par batterie peut contribuer à la continuité d'alimentation en fournissant une solution d'alimentation de secours pour les sites dits « électro-sensibles » comme les hôpitaux, les gares ou les aéroports. Cette utilisation du stockage représente une alternative à l'exploitation de groupes électrogènes sur site ou à des actions sur le réseau (e.g. renforcement du réseau).

La flexibilité offerte par les dispositifs de stockage permet également de faciliter la gestion du niveau de tension et de fréquence des réseaux, en chargeant ou en déchargeant la batterie : par exemple, en cas d'incident sur le réseau (e.g. un arrêt non programmé d'une centrale de production), les dispositifs de stockage peuvent être utilisés par les gestionnaires de réseaux pour la régulation de fréquence afin de maintenir celle-ci à 50 Hz en Europe continentale.

Ces services liés à la continuité d'alimentation et à la stabilité du réseau sont d'autant plus utiles pour les réseaux isolés (typiquement en zones insulaires ou en zones rurales isolées), où il n'existe que très peu d'alternatives pour assurer ces services (e.g. groupe diesel).

➤ **Valoriser au mieux les actifs de production**

Le stockage est un atout majeur pour les producteurs d'énergies renouvelables et intermittentes, car il leur permet de maîtriser les fluctuations de leur production d'électricité. Ce contrôle leur permet de garantir un profil de production valorisable sur les marchés de l'énergie et ainsi d'optimiser la revente d'électricité. Le stockage permet d'éviter en particulier les périodes de prix négatifs de l'électricité qui peuvent survenir lors de surplus de production d'électricité renouvelable généralisée (comme c'est parfois le cas en Allemagne par exemple), et ainsi augmenter l'efficacité économique des énergies renouvelables.

À son échelle, un particulier producteur d'énergies renouvelables peut également mieux valoriser sa production solaire photovoltaïque en maximisant son autoconsommation (c'est-à-dire la consommation de sa propre production d'électricité) grâce au stockage de son surplus de production qui sera alors utilisable plus tard.

La rentabilité des services

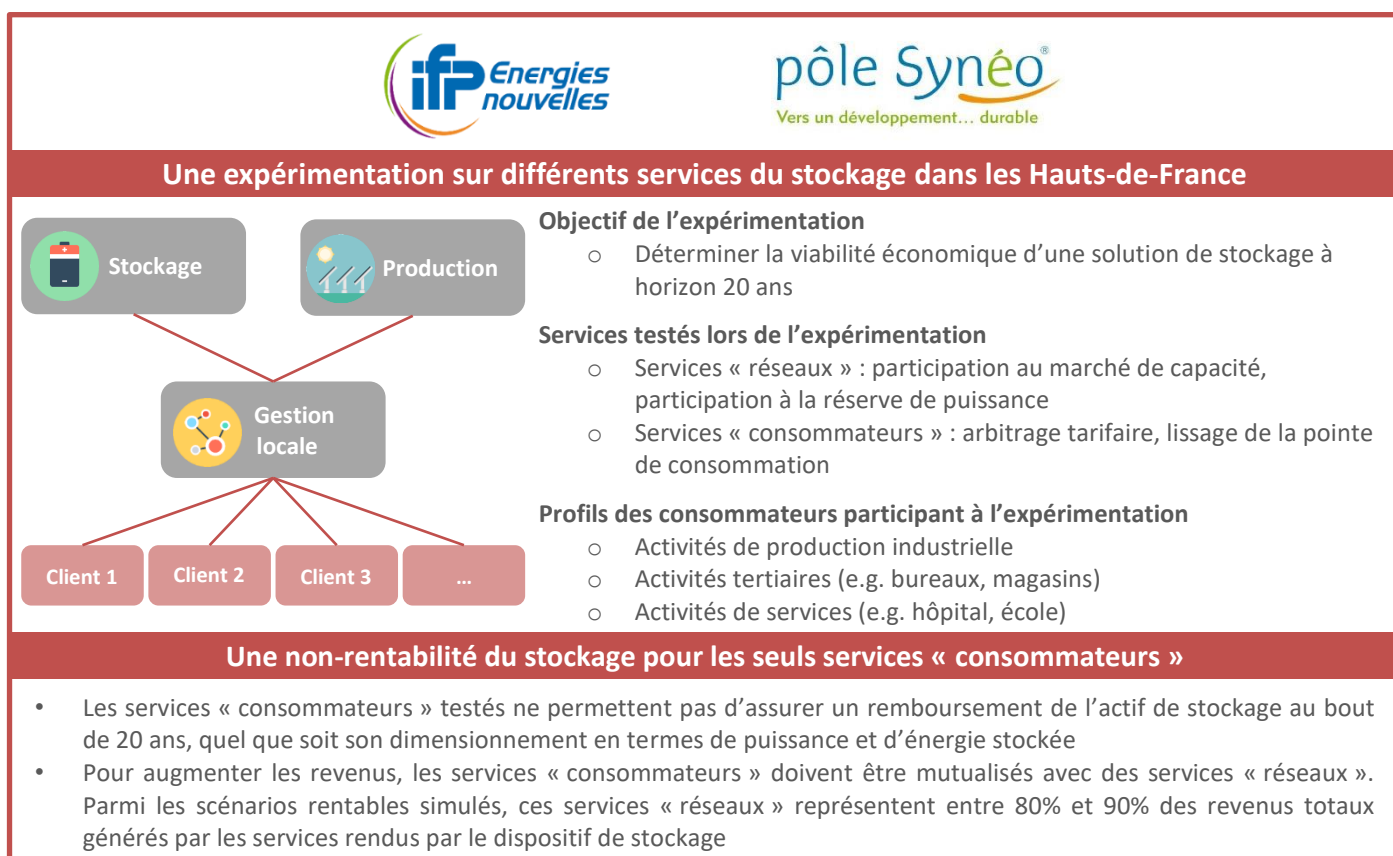
Dans un pays ou une zone géographique donné(e), la pertinence et donc la rentabilité de ces différents services dépendent de plusieurs facteurs :

- Le taux de pénétration des énergies renouvelables dans le mix énergétique
- La présence d'autoproduction et d'autoconsommation chez les industriels et les particuliers
- La qualité des réseaux et leur degré d'isolement
- Les prix de l'électricité sur les marchés de gros et de détail
- Les profils de consommation
- Le besoin des industriels en termes de qualité d'alimentation électrique et leur sensibilité face aux prix de l'électricité
- Les incitations réglementaires mises en place

Le coût encore très élevé des batteries nécessite d'aggréger plusieurs services à l'actif de stockage pour que celui-ci soit rentable, comme le montrent plusieurs études et expérimentations, dont par exemple les démonstrateurs de réseaux intelligents Nice Grid¹, IssyGrid² et Venteea³ sur le territoire français.

Par ailleurs, une expérimentation menée par l'IFP-EN et le Pôle Synéo dans la région des Hauts-de-France, visant à étudier l'opportunité du stockage par batterie à l'échelle d'une zone d'activité, a montré que les services rendus aux consommateurs finaux d'électricité ne permettent pas d'assurer seuls une rentabilité de l'actif de stockage, et doivent nécessairement être associés à des services rendus aux gestionnaires de réseaux, plus rémunérateurs.

Figure 6 : L'expérimentation de l'IFP-EN et du Pôle Synéo menée dans la région des Hauts-de-France



Source : IFP-EN

Note : Les coûts d'investissement et d'exploitation d'un actif de stockage et les tarifs de l'électricité considérés pour cette expérimentation sont ceux de 2016

1. www.nicegrid.fr (Nice Grid, Enedis), 2. www.issygrid.com/fr (IssyGrid, Bouygues Immobilier), 3. www.venteea.fr (Venteea, Enedis)

III. Des freins à lever pour un déploiement massif du stockage par batterie en France

Un certain nombre de freins économiques, techniques, organisationnels et administratifs restent encore à lever pour permettre un déploiement massif du stockage par batterie sur le territoire français. Dès lors que les freins économiques seront levés, ils entraîneront mécaniquement la levée progressive des autres freins, considérés par les experts du secteur comme moins critiques.

Les freins économiques

Le principal obstacle à lever pour un déploiement du stockage par batterie reste le coût des batteries, encore trop élevé pour envisager un retour sur investissement attractif à court terme. En France, ce coût élevé est combiné à un prix de l'électricité relativement bas, créant ainsi des conditions défavorables à l'investissement dans le stockage de la part d'un consommateur particulier ou industriel. Le croisement des courbes représentant d'une part le coût des batteries et d'autre part celui de l'électricité, est attendu en métropole à horizon moyen terme.

Les freins techniques

Au-delà des freins économiques, plusieurs freins techniques subsistent, notamment :

- La **performance** des batteries qui doit s'améliorer, en termes de temps de réponse, de rendement (pertes de cyclage et de conversion) et de densité énergétique (permettant de réduire l'emprise de l'actif de stockage au sol) ;
- La **sécurité** des batteries qui doit encore se renforcer pour limiter les risques de surchauffe et d'explosion, condition de leur acceptabilité par les consommateurs individuels notamment ;
- La **durée de vie** des batteries, mesurée en années ou en nombre de cycles de charge et de décharge, est actuellement jusqu'à trois fois plus faible que celle des systèmes d'électronique de puissance qui lui sont associés, conduisant à prévoir un remplacement de la batterie lors de l'acquisition d'un système intégré.

Les freins organisationnels

Le marché de l'électricité n'est actuellement pas structuré de manière à permettre une rémunération efficace du stockage par batterie multi-services, la valorisation de celui-ci étant multi-dimensionnelle :

- Une **valorisation « spatio-temporelle »** par la levée des contraintes sur le réseau dans certaines zones géographiques, et la capacité offerte par le stockage de consommer l'énergie produite à un autre moment ;
- Une **valorisation « transversale »** auprès de nombreux acteurs tout au long de la chaîne de valeur de l'électricité, couvrant à la fois des activités régulées et dérégulées.

Les mécanismes de marché, la tarification et la réglementation doivent donc évoluer de manière à exploiter pleinement le potentiel du stockage par batterie, comme nous pouvons déjà le constater dans certains pays, par exemple au Royaume-Uni et en Allemagne :

Figure 7 : Les évolutions récentes des marchés de l'électricité favorisant l'utilisation du stockage par batterie au Royaume-Uni et en Allemagne

	Évolutions du marché de l'électricité	Conditions
	Les gestionnaires de réseaux peuvent utiliser des actifs de stockage	- La capacité des systèmes de stockage doit être inférieure à 50 MW - Le chiffre d'affaires issu des activités non liées aux activités réglementaires du distributeur ne doit pas dépasser 2,5% du total
	Des tarifs d'accès au réseau sont définis pour des actifs de stockage et l'État finance en partie des systèmes « solaire photovoltaïque + stockage »	- Les systèmes bénéficiant de tarifs spécifiques d'accès au réseau doivent stocker une énergie 100% renouvelable - Des prêts à faible taux et des réductions d'impôt sont en place pour des systèmes « solaire photovoltaïque + stockage »

Sources : analyse Yélé Consulting d'après diverses sources

Les freins administratifs

L'absence actuelle de normes spécifiques au stockage complique les démarches administratives d'installation en environnement urbain ou périurbain, un cadre normatif autour des batteries devrait donc être précisé : les techniques de raccordement des installations de stockage au réseau de distribution sont complexes, car elles diffèrent de celles des producteurs ou des consommateurs classiques. Il s'agit donc de définir des procédures et conventions associées et de les mettre à la disposition des futurs opérateurs de stockage. Un tel cadre normatif pourrait être apporté aux différentes parties prenantes, via une documentation technique de référence à l'instar de celle disponible pour le raccordement des producteurs.

Malgré les freins, un contexte de plus en plus favorable au développement du stockage par batterie en France

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la hausse du prix de l'électricité et la baisse du coût des batteries sont autant d'éléments qui créent des conditions de plus en plus favorables au développement du stockage par batterie en France.

➤ La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) votée en 2015 prévoit de faire passer la part du nucléaire dans le mix électrique à 50% d'ici 2025 et la part des énergies renouvelables à 32% d'ici 2030, ainsi que de baisser la consommation de ressources fossiles de 30% à horizon 2030. La réalisation de ces objectifs ambitieux nécessitera le recours au stockage par batterie. En effet, comme évoqué précédemment, le stockage par batterie représente une réserve de capacité, permet d'intégrer au mieux les énergies renouvelables au réseau, réduit les pics de consommation et évite donc le recours aux énergies fossiles.

➤ La hausse du prix de l'électricité

Le prix de l'électricité augmente pour les clients particuliers et industriels depuis plusieurs années, avec à titre d'illustration une augmentation de 27% entre 2010 et 2015 pour les particuliers. Cette hausse devrait se poursuivre dans les 15 ans à venir, sous l'impulsion de trois facteurs :

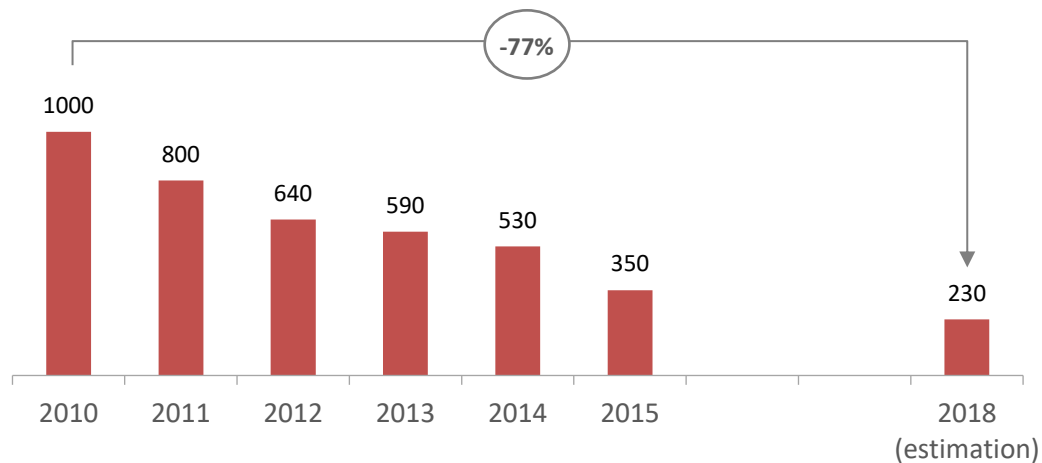
- Les travaux de maintenance et de modifications pour prolonger le parc nucléaire et améliorer sa sécurité ;
- Le besoin de renforcement des réseaux électriques ;
- Le financement des énergies renouvelables via les tarifs d'achat.

L'augmentation continue du prix de l'électricité favorisera les logiques d'autoconsommation et d'optimisation des flux énergétiques et améliorera ainsi la rentabilité du stockage par batterie.

➤ La baisse du coût des batteries

Depuis plusieurs années, le coût des batteries Lithium-Ion diminue fortement. Bloomberg New Energy Finance estime cette baisse à 77% entre 2010 et 2018, baisse principalement due aux économies d'échelle réalisées grâce à la production industrielle de masse de batteries pour véhicules électriques, utilisant également des batteries Lithium-Ion. Cette tendance devrait se poursuivre après 2018.

Figure 8 : Coût des batteries Lithium-Ion pour véhicules électriques entre 2010 et 2018 [\$/kWh]



Source : Bloomberg New Energy Finance, 5 Avril 2016

IV. Les initiatives prises en France ces dernières années

De nombreuses initiatives ont été prises en France dans le domaine du stockage par batterie ces dernières années. Ces initiatives offrent un cadre favorable à l'essor de la filière. Sont observés notamment :

- **Une volonté politique de structurer la filière**, au travers d'un plan de reconquête industrielle dédié au stockage et de nombreux appels d'offres ;
- **Un cadre réglementaire qui évolue favorablement**, via des lois ou des recommandations de la Commission de Régulation de l'Énergie ;
- **Plusieurs expérimentations menées en zones insulaires et en métropole**, incluant du stockage ;
- **Des investissements conséquents** de la part de plusieurs grands groupes français, illustrés par l'acquisition de Saft par le groupe Total ;
- **Un écosystème de start-ups innovantes dans le domaine du stockage** et plus particulièrement dans la gestion intelligente de l'énergie ;
- **Un ensemble d'initiatives qui se traduit par le positionnement de nombreux acteurs français dans le domaine du stockage par batterie**, préalable à l'essor d'une filière.

Une volonté politique de structurer la filière

La France dispose d'un écosystème d'acteurs académiques et industriels performant dans le domaine du stockage d'énergie. Dans ce contexte et dans le cadre du programme de la Nouvelle France Industrielle, le gouvernement français a lancé en 2013 le plan « Autonomie et Puissance des Batteries ». Ce plan vise à consolider et à structurer une filière complète de fabrication de batteries, à intégrer et à structurer une filière énergétique du vecteur hydrogène ainsi qu'à mettre en place des collaborations internationales dans ces domaines.

En parallèle de ce plan de reconquête industrielle consacré aux batteries, l'État a confié dès 2010 à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), la responsabilité de crédits du Programme d'Investissement d'Avenir dédié à la mise en œuvre de la transition écologique et environnementale (avec un budget de 3,3 milliards d'euros). Ainsi, plusieurs appels à projets impliquant du stockage d'énergie par batterie ont été lancés, entre autres :

- L'initiative PME « Énergies renouvelables, stockage et conversion de l'énergie, systèmes électriques intelligents », lancée en septembre 2016 ;
- L'appel à projets « Stockage et conversion d'énergie » ouvert en août 2015 ;
- L'appel d'offres pour des installations solaires photovoltaïques avec stockage dans les départements d'outre-mer et la Corse, lancé en mai 2015 (33 projets ont été retenus, pour une puissance cumulée de près de 52 MW et un tarif d'achat garanti de 204 €/MWh).

Un cadre réglementaire qui évolue favorablement

Plusieurs évolutions législatives et réglementaires ont eu lieu récemment, allant dans le sens du développement du stockage par batterie, par exemple :

- L'article 199 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte introduit la possibilité de lancer des expérimentations concernant la gestion de la flexibilité locale sur les réseaux de distribution, d'une durée de 4 ans renouvelable une fois. Ce type d'expérimentation donne droit à une collectivité, associée à des producteurs et des consommateurs d'une zone géographique donnée, de proposer à un gestionnaire de réseau de distribution la réalisation d'un service de

flexibilité local. Ce service peut être offert par un actif de stockage entre autres solutions, et se trouve rémunéré par le Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Électricité (TURPE) à hauteur des coûts évités au gestionnaire de réseau. Aujourd'hui, peu de projets ont été retenus, par manque de services identifiés permettant de reporter des investissements conséquents sur le réseau ;

- La Commission de Régulation de l'Énergie, dans sa délibération du 8 décembre 2016 proposant de nouvelles recommandations sur le développement des réseaux électriques intelligents, préconise la mise à disposition par les gestionnaires de réseaux de données de localisation des contraintes sur les réseaux. Ceci permettrait à de possibles opérateurs de stockage, des collectivités ou des porteurs de projets de connaître les besoins de suppression des congestions réseau et ainsi de développer des solutions adaptées.

Plusieurs expérimentations menées en zones insulaires et en métropole

Avant même les différents appels à projets lancés par l'ADEME, de nombreux projets de démonstrateurs de réseaux intelligents ont vu le jour en zones insulaires (appelées « Zones Non Interconnectées » ou ZNI, comme par exemple la Réunion, où les énergies renouvelables représentent 36% de la production d'électricité) ainsi qu'en métropole. Ces démonstrateurs incluaient des actifs de stockage par batterie et ont permis de tester les technologies et d'obtenir de premiers retours d'expériences sur des cas d'usage précis.

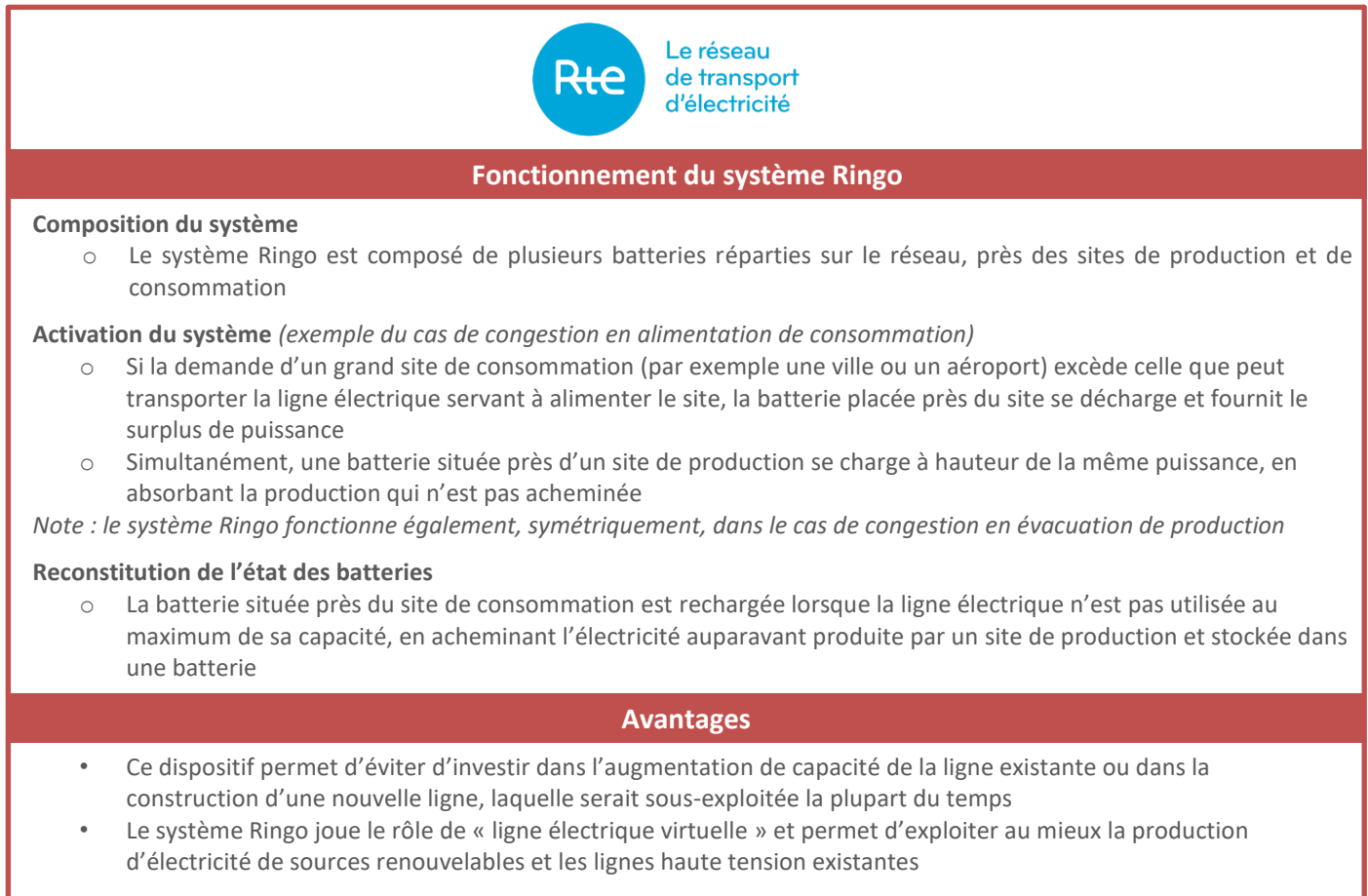
Figure 9 : Exemples d'expérimentations menées dans le domaine du stockage par batterie

	Nom du projet	Pilote	Année de lancement	Technologie de stockage	Services testés
ZNI	PEGASE (La Réunion)		2009	Batterie Sodium-Soufre	Intégration de la production solaire PV et éolienne au réseau
	MYRTE (Corse)		2011	Pile à combustible / Hydrogène	Écrêtage de la pointe appelée par le réseau, lissage de la puissance photovoltaïque produite
Métropole	Nice Grid (Région PACA)		2011	Batterie Lithium-Ion	Réduction de la pointe de consommation, intégration de la production solaire PV locale, îlotage d'un quartier
	IssyGrid (Région Île-de-France)		2012	Batterie Lithium-Ion	Stockage de l'énergie solaire PV grâce à des batteries de véhicules électriques recyclées
	Venteea (Région Grand Est)		2012	Batterie Lithium-Ion	Intégration de la production éolienne locale, stabilisation du réseau
	Smart Grid Experience (Région Occitanie)		2014	Batterie Lithium-Ion	Stabilité du réseau via le réglage de fréquence, grâce à la solution innovante BattGrid

Sources : CRE, presse, analyse Yélé Consulting

Par ailleurs, le gestionnaire du réseau de transport RTE développe une solution innovante appelée « Ringo », qui utilise des actifs de stockage placés à plusieurs endroits du réseau pour absorber les pointes de transit sur certaines portions du réseau pendant un certain temps, tout en préservant l'équilibre offre/demande dont RTE est le garant à l'échelle nationale.

Figure 10 : La solution innovante « Ringo » de RTE



Source : RTE

Des investissements conséquents

Le principal investissement réalisé récemment dans le domaine du stockage par batterie est celui du rachat du constructeur de batteries Saft par le groupe Total en 2016, pour un montant de 950 millions d'euros. L'acquisition de Saft « nous permettra d'intégrer dans notre portefeuille d'activités des solutions de stockage d'électricité, compléments indispensables à l'essor des énergies renouvelables » indique Patrick Pouyanné, PDG de Total (Les Echos, 9 mai 2016).

Par ailleurs, les groupes ENGIE et EDF investissent dans des sociétés spécialisées dans le stockage par batterie, comme par exemple la start-up américaine AMS (Advanced Microgrid Solutions) dans laquelle ENGIE a investi 6 millions de dollars, ou l'entreprise allemande Sunfire, fabricant de piles à combustible dans laquelle EDF a investi via le fonds Electranova Capital.

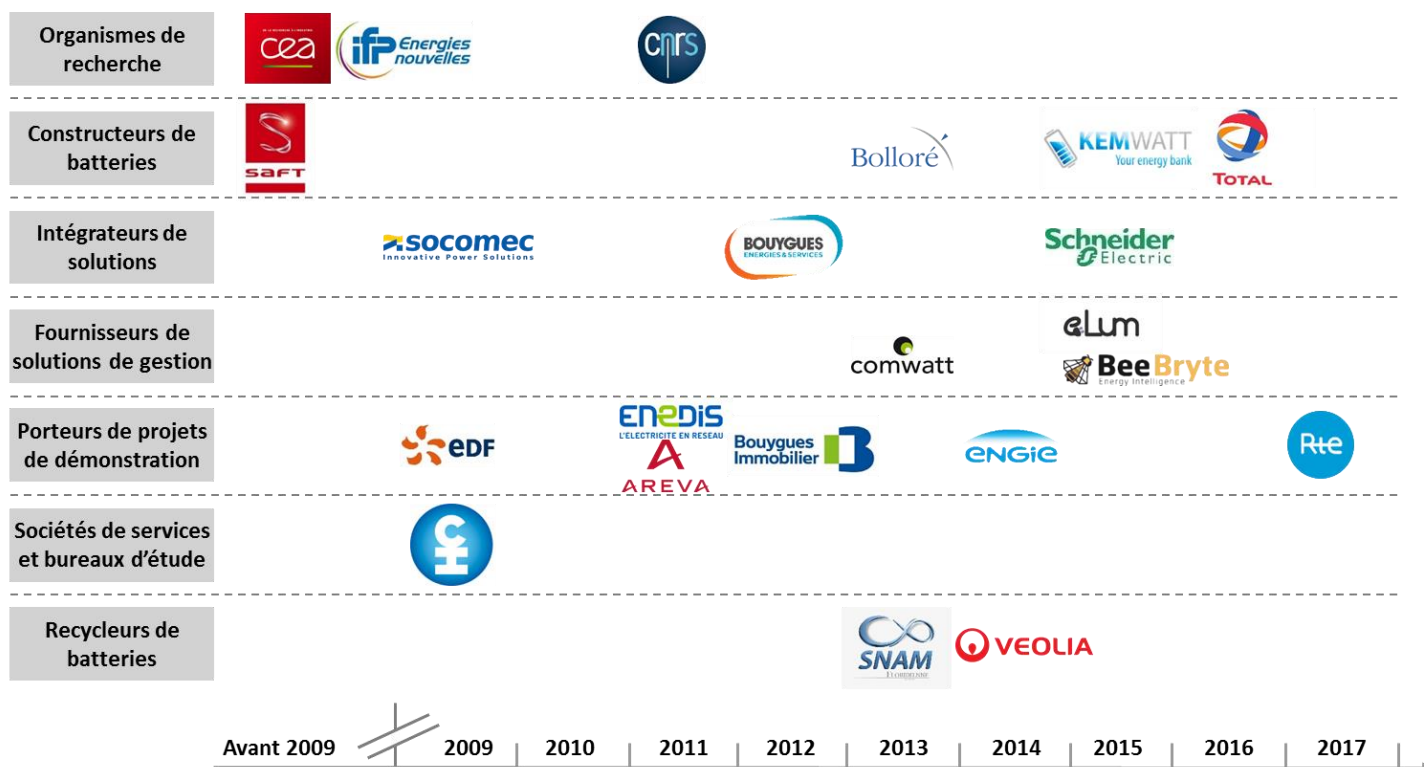
Un écosystème de start-ups innovantes dans le domaine du stockage

De nombreuses start-ups innovantes ont vu le jour ces dernières années, principalement autour de la collecte des données énergétiques et du pilotage de l'énergie. Ces start-ups exploitent notamment les possibilités offertes par les nouvelles technologies et l'augmentation des puissances de calcul (e.g. objets connectés, Big Data, intelligence artificielle). Les solutions matérielles et logicielles fournies par ces start-ups visent à contrôler et optimiser l'énergie produite et consommée à l'échelle d'un site industriel ou d'un bâtiment.

Un ensemble d'initiatives qui se traduit par le positionnement d'acteurs français dans le domaine du stockage par batterie, préalable à l'essor de la filière

L'ensemble de ces initiatives reflète le fort engouement autour du domaine du stockage. Cet engouement se traduit par le positionnement de nombreux acteurs français tout au long de la chaîne de valeur (des acteurs historiques qui intègrent ce sujet dans leurs projets et développent leurs offres autour du stockage, et de nouveaux entrants) : organismes de recherche, constructeurs de batteries, intégrateurs de solutions (fournissant l'électronique de puissance, les services auxiliaires et le système de gestion de la batterie), fournisseurs de solutions de gestion de l'énergie (fournissant l'algorithmie nécessaire à l'optimisation de la batterie et des flux énergétiques associés), porteurs de projets de démonstration, sociétés de services et bureaux d'étude, recycleurs de batteries.

Figure 11 : Exemples d'acteurs français positionnés dans le stockage par batterie, par année de lancement des activités dans ce domaine



Sources : presse, sites internet des organisations, analyse Yélé Consulting

Sur le plan international, le constructeur américain de voitures électriques Tesla s'est engagé dans un ambitieux programme de construction de batteries Lithium-Ion, pour des usages mobiles mais aussi stationnaires. En effet, Tesla offre des solutions de stockage stationnaire pour les particuliers (le Powerwall) et pour les industriels (le Powerpack). La mise en service de la « Gigafactory », une usine géante de production de batteries Lithium-Ion aux États-Unis, est au service de cette ambition et permettra de réduire le coût des batteries par la réalisation d'économies d'échelle.

V. Enjeux et perspectives de la filière française

La filière émergente autour du stockage par batterie a devant elle de nombreuses perspectives de développement. En effet, le stockage par batterie est lié à plusieurs marchés, eux aussi en plein essor, en France et à l'international.

Les perspectives de la filière française pour le marché national



Le marché de la mobilité électrique

L'essor de la filière des véhicules électriques et la mise sur le marché de nombreuses batteries recyclées présentent un intérêt pour le stockage stationnaire, en permettant de réduire le coût initial de la batterie. En effet, il est généralement considéré qu'une batterie doit être changée après utilisation dans un véhicule électrique quand sa capacité atteint environ 80%. Une telle batterie peut donc trouver d'autres applications dans le stockage stationnaire, de préférence à petite échelle.

Étant donnée la composition d'un système de stockage, il est souvent nécessaire, pour un constructeur de véhicules électriques, de s'associer avec des gestionnaires ou des intégrateurs de systèmes pour mettre en place une solution de stockage stationnaire. Nissan est l'un des leaders dans le domaine et s'est associé à Green Charge Networks (une entreprise californienne spécialisée dans le stockage, détenue à 80% par ENGIE depuis 2016) pour réutiliser les batteries des Nissan Leaf.

Les Français se positionnent également dans le domaine du recyclage avec le projet européen Energy Local Storage Advanced (ELSA) piloté par Bouygues Energies & Services et dont Renault-Nissan est partenaire. Le site de test français se trouve à la Défense, où des batteries de Kangoo électriques d'une capacité de 32 kWh sont installées dans le bâtiment Ampère dans le cadre de sa rénovation en bâtiment écologique. Ces batteries sont utilisées pour réduire la facture énergétique et l'empreinte carbone de l'immeuble tout en assurant en permanence la sécurité d'alimentation.

Plusieurs coûts sont à prendre en compte pour ces batteries de « seconde vie » : les coûts de reconditionnement, de transport et de gestion du stock. La rentabilité future du recyclage des batteries dépendra du montant et de l'évolution de ces coûts de recyclage, ainsi que de l'ampleur de la diminution des coûts des batteries neuves.



Les marchés naissants de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique ayant plusieurs applications : une fois produit et stocké, il peut être utilisé dans une pile à combustible pour produire de l'électricité, alimenter des véhicules via des stations d'hydrogène, être réinjecté dans les réseaux de gaz naturel ou encore utilisé directement dans certains procédés industriels.

Les perspectives de la filière hydrogène sont donc multiples et favoriseront l'essor de la technologie de la pile à combustible, qui utilise de l'hydrogène, ainsi que celui des batteries à électrodes solides par le biais d'offres combinées composées d'un stockage long terme et d'un stockage court terme. Une start-up française, Sylfen, développe une telle offre combinée

à destination des bâtiments à énergie positive et des éco-quartiers : le « Smart Energy Hub ». Issu de 10 ans de recherche et développement au sein du CEA, ce système modulaire est composé d'un actif de stockage court terme, d'un actif de stockage long terme et d'une solution de gestion et de pilotage de l'énergie. Le caractère innovant réside dans l'électrolyseur haute température totalement réversible, c'est-à-dire utilisable en pile à combustible.



Plusieurs marchés de niche

Il existe quelques marchés de niche dont les acteurs de la filière peuvent profiter à court et moyen terme :

- L'insertion massive des énergies renouvelables dans des réseaux électriques isolés, typiquement dans les zones insulaires françaises ;
- La construction de bâtiments tertiaires dits « intelligents », anticipant même parfois les futures réglementations, bâtiments conçus pour intégrer du stockage par batterie et en mesure, grâce à leur label « écologique » ou équivalent, d'attirer des entreprises pour s'y installer ;
- Les projets de ville intelligente ou d'éco-quartier, portés par les collectivités territoriales. Celles-ci sont chargées de l'organisation et du pilotage de la transition énergétique au niveau local et pourraient vouloir intégrer du stockage par batterie dans de tels projets (qui pourraient par exemple inclure de la production locale à partir de solaire photovoltaïque, du stockage et des véhicules électriques) ;
- Le développement de l'autoconsommation individuelle et collective (la délibération de la CRE du 17 Novembre 2016 préconise une tarification favorisant l'autoconsommation pendant des périodes de pointe, en se basant sur le Code de l'énergie).

Les perspectives de la filière française à l'export



Le marché des micro-grids

Selon Navigant Research, le marché mondial des micro-réseaux ou « micro-grids » pourrait représenter près de 40 milliards de dollars en 2020. Les micro-grids sont des réseaux électriques de petite taille, composés de différents systèmes permettant de fonctionner en partielle ou en totale autonomie : production locale (e.g. générateur diesel, petit éolien, panneaux solaires photovoltaïques, petite hydraulique), installations de consommation, systèmes de gestion et d'optimisation de la demande, et actifs de stockage.

Les acteurs français du stockage peuvent donc adresser le marché mondial des micro-grids, notamment en zones insulaires (e.g. îles européennes, Cuba, Indonésie, Malaisie) ou en zones rurales isolées (e.g. Mali, Côte d'Ivoire).



Le marché de l'innovation digitale

Les start-ups et PME innovantes françaises ciblent des clients internationaux dans le domaine du pilotage de la consommation d'énergie, en proposant notamment des logiciels de gestion et d'optimisation de l'énergie de type « Software-as-a-Service » (SaaS) et de visualisation des données de production et de consommation, à l'échelle d'un bâtiment ou d'un site industriel.

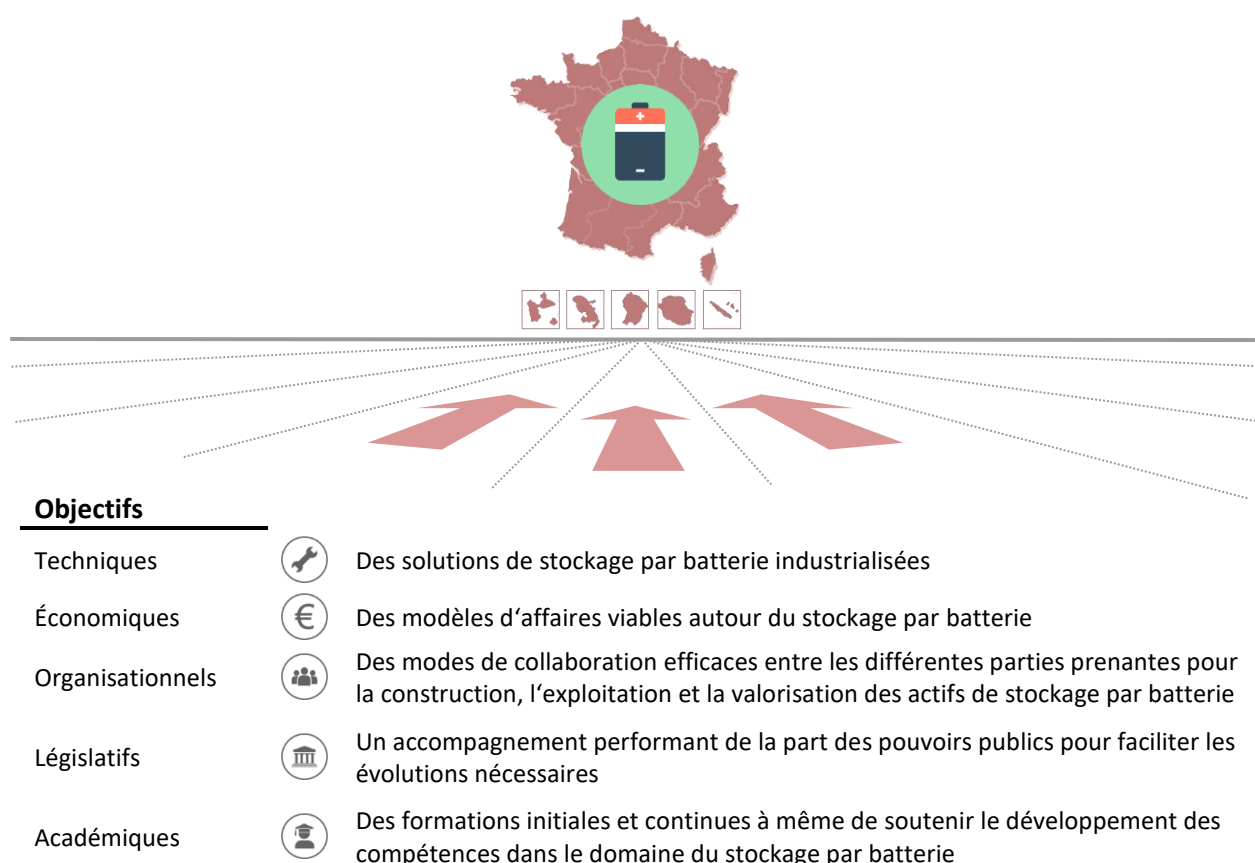
Une feuille de route possible pour faire émerger des champions français dans le stockage par batterie

L'enjeu principal pour la filière française du stockage par batterie est de faire émerger des champions nationaux en particulier dans la fourniture de systèmes et de services associés à l'actif de stockage, en exploitant les compétences et expériences des acteurs académiques et industriels français. Dans le domaine de la fabrication des batteries, il sera a priori difficile de concurrencer les acteurs étrangers, notamment asiatiques, déjà positionnés sur ce segment.

Une telle stratégie industrielle nécessite de créer les conditions d'émergence de ces champions dès aujourd'hui, sans attendre que l'ensemble des conditions de la rentabilité du stockage par batterie soient réunies, au risque de voir des acteurs étrangers fournir les solutions matérielles et logicielles (sur le territoire français et au-delà) bien avant 2030.

Afin de mettre en œuvre cette stratégie et déployer le stockage par batterie à grande échelle d'ici 2030, plusieurs objectifs techniques, économiques, organisationnels, législatifs et académiques doivent être poursuivis, comme le montre le graphe ci-dessous :

Figure 12 : Les objectifs à remplir pour déployer le stockage à grande échelle en France d'ici 2030



Sources : interviews d'experts, analyse Yélé Consulting

Afin d'atteindre l'ensemble de ces objectifs, un certain nombre d'actions pourraient être menées :

Déployer le stockage là où il est déjà rentable, en passant de l'expérimentation à l'industrialisation des solutions testées en zones insulaires suite aux nombreux projets réalisés dans ces territoires

Définir le rôle du stockage pour donner une meilleure visibilité aux acteurs impliqués,

- En lançant une consultation publique par le biais de la Commission de Régulation de l'Énergie sur le thème du stockage ou plus généralement sur celui des flexibilités
 - En élargissant la définition du rôle du stockage mentionné dans le Code de l'énergie (L315-1), rôle aujourd'hui limité à son association à l'autoconsommation individuelle (un élargissement à l'autoconsommation collective et aux services réseau par exemple)
 - En intégrant la problématique du stockage par batterie dans la documentation technique de référence
-

Identifier les facteurs clés de succès du déploiement généralisé du stockage en métropole, notamment les modèles d'affaires et de collaboration viables,

- En publiant et en partageant les retours d'expériences détaillés issus des premiers démonstrateurs, incluant : des Analyses Coûts Bénéfices, l'identification des services les plus rentables, des services les moins rentables et des pistes d'amélioration de la rentabilité
 - En renouvelant pour 4 ans l'expérimentation sur les flexibilités locales issue de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte
 - En lançant une seconde phase d'expérimentations en métropole afin d'approfondir certains cas d'usage ou en tester de nouveaux, et d'expérimenter des technologies innovantes issues d'activités de Recherche & Développement
-

Identifier les meilleures modalités de soutien et de développement de la filière, en publiant les recommandations issues du plan de la Nouvelle France Industrielle (NFI), permettant de :

- Définir l'objectif national en termes de capacité installée avant 2025
 - Déterminer les moyens législatifs à activer pour le développement de certains services rendus par le stockage particulièrement pertinents pour la France
 - Évaluer l'impact de ce développement sur les secteurs industriels de la fabrication des batteries et du recyclage des batteries des véhicules électriques
-

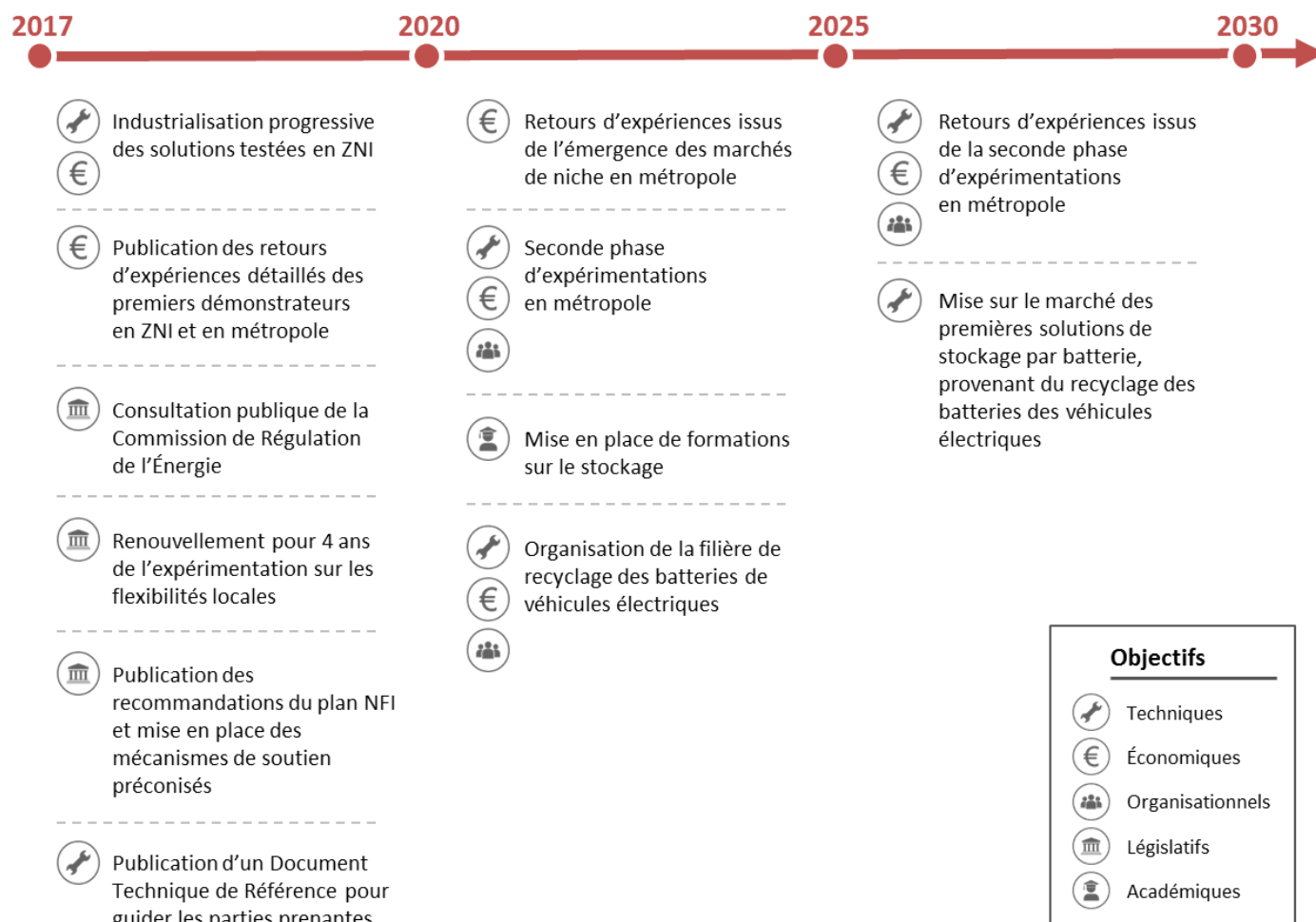
Concevoir, organiser et conduire des formations dédiées au stockage dans les universités et les écoles d'ingénieurs

Débuter le déploiement du stockage en métropole en limitant les risques,

- En organisant la filière de recyclage des batteries de véhicules électriques (mise en place du cadre réglementaire et des activités de collecte des batteries, de réalisation des tests et de certification)
- Puis en mettant sur le marché les premières solutions de stockage par batterie provenant du recyclage

Ces actions pourraient être séquencées en trois phases principales de 2017 à 2030, décrites ci-dessous :

Figure 13 : Séquencement possible de la feuille de route pour le développement de la filière du stockage par batterie en France



Sources : interviews d'experts, analyse Yélé Consulting

Les grands défis

La généralisation du stockage par batterie en France nécessiterait de relever plusieurs grands défis :

- **La définition des rôles et des responsabilités** autour de l'actif de stockage, notamment en termes de gouvernance et de modèles collaboratifs, de financement, de valorisation des services sur les marchés de l'énergie et de répartition des revenus entre les différents acteurs ;
- **La reconstitution de l'ensemble des flux** autour de la batterie à des fins de facturation, ainsi que la pleine exploitation du potentiel des compteurs intelligents (par exemple Linky pour les particuliers) et la mise en place de systèmes de comptage complémentaires si nécessaire ;
- **L'interfaçage des actifs de stockage avec d'autres systèmes et mécanismes** existants et futurs : plateformes de marché, réseaux centralisés, réseaux décentralisés, mécanismes de capacité, mécanismes d'effacement, blockchain ;
- **Les problématiques de cybersécurité** ou de protection des données, qui se situent à plusieurs niveaux :
 - Au niveau local de la batterie, laquelle peut être considérée comme un objet communicant via son système de gestion ;

- Au niveau de l'infrastructure de communication et des concentrateurs de données (serveurs), quand les batteries seront mises en réseau et communiqueront de nombreuses informations à un système d'information central, telles que des données de consommation, des données contractuelles, des données de géolocalisation ou encore des données à caractère personnel pour faciliter la facturation.

Les questions environnementales

Enfin, le développement du stockage par batterie soulève des questions environnementales qu'il conviendra de traiter :

- Des questions liées à l'analyse du cycle de vie, c'est-à-dire **l'évaluation de l'impact environnemental des batteries** (pollution de l'air et de l'eau, qualité des écosystèmes, quantité de déchets produits), de l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des composants jusqu'à la gestion des déchets ultimes ;
- Des questions liées à la disponibilité des ressources naturelles nécessaires à la fabrication des batteries, en particulier à **l'éventuelle insuffisance des réserves de Lithium**, principalement situées en Bolivie et au Chili, pour satisfaire la demande mondiale de véhicules électriques et par extension celle du stockage stationnaire par batterie.

Conclusion

Les multiples finalités du stockage par batterie font de celui-ci l'un des éléments essentiels des réseaux intelligents ou Smart Grids. Ces réseaux instrumentés utilisent les nouvelles technologies de l'information et de la communication pour créer un échange d'informations entre les consommateurs et les gestionnaires des systèmes énergétiques (réseaux, moyens de production centralisés et décentralisés) afin de piloter et de gérer la demande. Parmi l'ensemble des systèmes qui composent un Smart Grid, **le stockage par batterie est l'un de ceux qui se développent le plus lentement**, limitant ainsi la pleine exploitation du potentiel des réseaux intelligents pour réussir la transition énergétique.

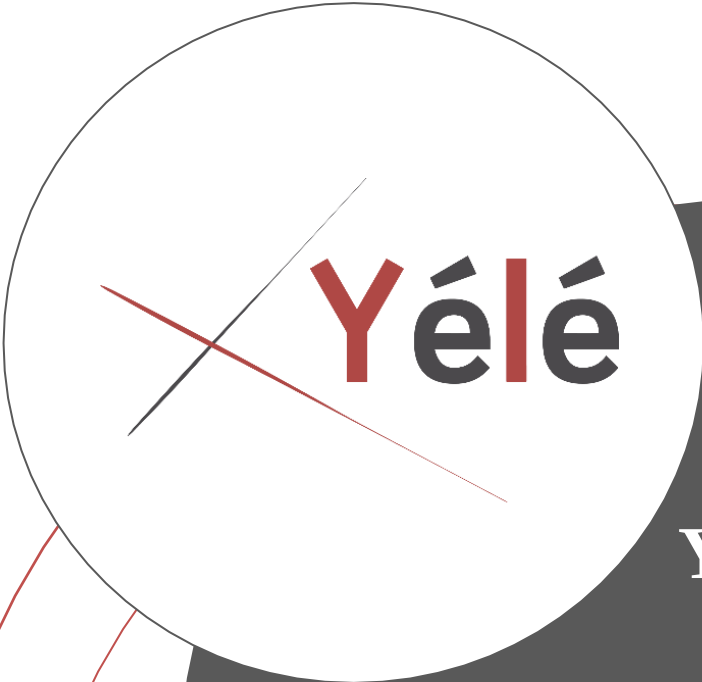
Lois, appels à projets, expérimentations, investissements, positionnement d'acteurs, solutions innovantes : **les signes de frémissement de la filière française du stockage par batterie sont nombreux.** Le rythme de développement du stockage par batterie dépendra de l'évolution des conditions de sa rentabilité, ainsi que du déploiement des autres solutions de flexibilité, concurrentes ou complémentaires : les solutions « inter-filières » comme les effacements de consommation, et les solutions « intra-filières » dans le domaine du stockage d'énergie comme le stockage thermique.

Cependant, **le développement de ce secteur industriel doit être considéré comme une opportunité** pour consolider et pour déployer des compétences nationales en la matière, ainsi que comme une nécessité pour réussir la transition énergétique.

C'est pourquoi de nombreuses parties prenantes plaident aujourd'hui pour un soutien de la puissance publique pour les segments de marché les plus prometteurs, soutien qui représenterait **un levier de développement au service d'une stratégie long terme créatrice d'emplois, de croissance et de compétitivité.**

Bibliographie

- *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies*, (ATEE/DGIS/ADEME, Octobre 2013)
- *La Nouvelle France Industrielle – Présentation des feuilles de route des 34 plans de la nouvelle France industrielle*, (Gouvernement Français, Septembre 2014)
- *Commercialisation of energy storage in Europe*, (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU), Mars 2015)
- *Le stockage de l'énergie électrique : une dimension incontournable de la transition énergétique*, Conseil économique, social et environnemental, (Alain OBADIA, Juin 2015)
- *Stockage Électrique – Quel potentiel pour la seconde vie des batteries de véhicules électriques ?*, (E-Cube, Février 2016)
- *Bloomberg New Energy Finance Summit, New York* (Michael LIEBREICH, 5 Avril 2016)
- *Stockage d'Électricité – Étude de cas sur une zone d'activités des Hauts-de-France*, Conférence ATEE, La place du stockage d'énergies dans la transition énergétique - Enjeux pour le développement des EnR, Lille, (IFP-EN/Pôle Synéo, 20 Octobre 2016)
- *Systèmes Électriques Intelligents – Premiers résultats des démonstrateurs*, (ADEME, Octobre 2016)
- *Service de flexibilité local pour les GRD – Journées ATEE Stockage d'énergies*, Paris, (Frédéric EVE, ENEDIS, 15 & 16 Novembre 2016)
- *Les obstacles à lever pour permettre le développement du stockage* – Journées ATEE Stockage d'énergies, Paris, (Didier LAFAILLE, CRE, 15 & 16 Novembre 2016)
- *Délibération de la Commission de Régulation de l'Énergie du 17 novembre 2016 portant décision sur les tarifs d'utilisation des réseaux publics d'électricité dans les domaines de tension HTA et BT* (CRE, 17 Novembre 2016)
- www.smartgrids-cre.fr (Smart Grids, CRE)
- www.ifpenergiesnouvelles.fr (IFP Énergies Nouvelles)
- www.nicegrid.fr (Nice Grid, Enedis)
- www.issygrid.com/fr (IssyGrid, Bouygues Immobilier)
- www.venteea.fr (Venteea, Enedis)



Yélé

À propos de Yélé Consulting

Yélé Consulting est un cabinet de conseil spécialisé dans la transition énergétique et la transformation numérique. Spécialistes du domaine des Smart Grids et des Smart Cities, notre approche est résolument tournée vers l'innovation, aussi bien en termes de méthodes que de solutions apportées. Nous accompagnons nos clients, acteurs du secteur de l'énergie et collectivités territoriales, dans leurs programmes d'expérimentation et d'industrialisation en lien avec les réseaux intelligents, la valorisation des données énergétiques à l'échelle d'un territoire et le développement de services urbains innovants et de nouveaux usages intégrés au réseau électrique.

Créé en 2010, Yélé compte aujourd'hui plus de 40 collaborateurs issus de parcours professionnels au croisement des filières énergétique et numérique. Yélé est membre de l'association professionnelle Think Smartgrids et du pôle de compétitivité Systematic Paris-Region dédié au numérique.

Retrouvez-nous sur www.yele.fr



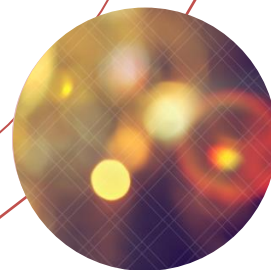
Smart Grid



Données & IoT



Innovation



Smart City

À propos des auteurs



Benjamin Cano est diplômé de Polytech Clermont-Ferrand et actuellement Consultant spécialisé dans les Smart Grids. Il a contribué à plusieurs programmes de démonstrateurs, comme par exemple Greenlys, en traitant des problématiques liées aux études électriques et à l'intégration des énergies intermittentes au réseau de distribution. Benjamin coordonne les activités de Recherche & Développement de Yélé relatives à la planification réseau et participe à des missions d'engagement solidaire, comme un projet d'électrification rurale porté par Électriciens Sans Frontières en Côte d'Ivoire.

Contact : benjamin.cano@yele.fr



Caroline Dornstetter est diplômée de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG - ENSE3) et actuellement Manager spécialisée dans le secteur de l'énergie. Elle a occupé plusieurs fonctions opérationnelles et stratégiques au sein des énergéticiens ENGIE, EDF et E.ON, ainsi qu'au Boston Consulting Group, en France et en Allemagne. Caroline est impliquée dans plusieurs projets visant à appuyer les gestionnaires de réseaux dans leurs programmes de développement des réseaux électriques intelligents, et développe les activités de Yélé en région Auvergne-Rhône-Alpes.

Contact : caroline.dornstetter@yele.fr



Rémi Gilliotte est diplômé de l'École Supérieure d'Électricité (Supélec) et actuellement Consultant spécialisé dans la modélisation de la production et du comportement du réseau électrique. Il a participé à des projets de prévision de production nucléaire et hydraulique, d'amélioration de la qualité de la tension et d'optimisation du réseau basse tension. Rémi est responsable du développement de l'offre « études électriques » de Yélé à l'international.

Contact : remi.gilliotte@yele.fr



Alexandra Perrin est diplômée de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) et actuellement Consultante Senior spécialisée dans la modélisation des données et le développement de systèmes d'information appliqués aux Smart Grids. Elle a participé à la conception et au déploiement de plusieurs outils de gestion et de valorisation des données dans les secteurs de l'énergie, de la santé et des biens industriels en France, au Royaume-Uni et en Argentine. Alexandra dirige la cellule de veille et d'analyse stratégique de Yélé dédiée aux nouveaux usages intégrés au réseau.

Contact : alexandra.perrin@yele.fr