

Chapitre III

Adaptation des systèmes énergétiques

1 Transition énergétique

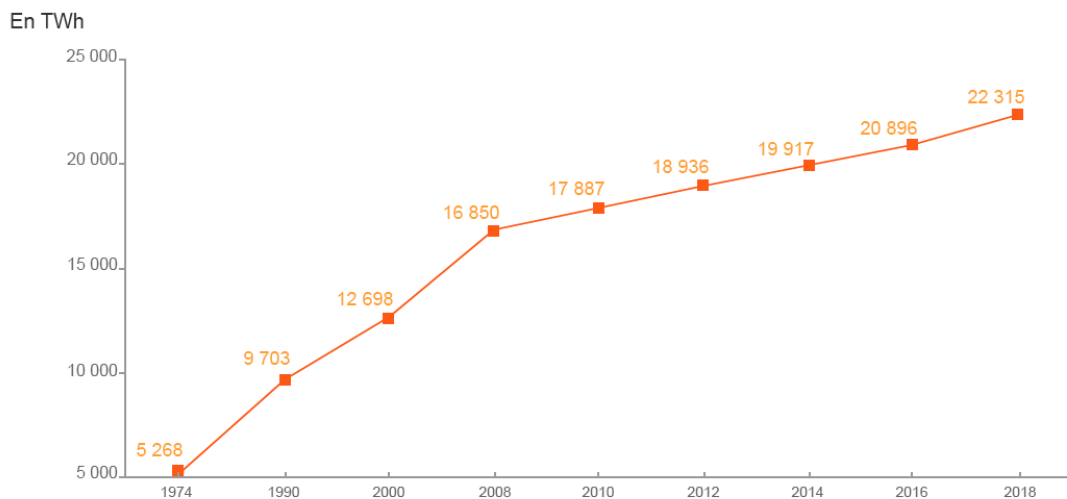
1.1 Accroissement de la demande en électricité

L'électricité est très difficile à stocker. Il est donc nécessaire à tout instant d'équilibrer le réseau, en d'autres termes de s'assurer que la production (l'offre) est égale à la consommation (la demande). Si l'écart entre production et consommation augmente trop, le réseau subit des écarts de fréquence et de tension dommageables pour les équipements du réseau et ceux des consommateurs. Les conséquences peuvent aller jusqu'à la déconnexion de certaines branches du réseau (entraînant la coupure du courant chez certains consommateurs), voire l'incident généralisé (blackout). Pour préserver cet équilibre du réseau, il est nécessaire de prévoir au mieux la consommation et de disposer de capacités d'ajustement très réactives s'appuyant sur la mise en œuvre de moyens de production adéquats.

Cependant, la consommation d'électricité est éminemment variable. Cette variabilité est sensible à l'échelle d'une année, avec des consommations plus ou moins fortes selon les saisons. Dans un pays comme la France, où le chauffage électrique est très répandu, la « pointe saisonnière » a lieu en hiver. Dans les pays plus chauds, largement équipés en climatisation, la pointe saisonnière a plutôt lieu en été. La consommation d'électricité varie également sensiblement à l'échelle d'une journée. L'équilibrage du réseau est particulièrement crucial à la « pointe maximale », c'est-à-dire lorsque la demande atteint son maximum durant les jours de très grande consommation. C'est la valeur de cette pointe qui dimensionne le réseau d'électricité ; pour assurer la sécurité du réseau, des capacités de production complémentaires doivent être dédiées à la couverture de cette pointe.

A l'échelle mondiale, l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) a prévu un doublement de la demande d'électricité de 2003 à 2020. En Europe, la consommation électrique devrait augmenter de 40% entre 2003 et 2030. Cette tendance à la hausse est liée à la croissance globale de l'économie et, plus particulièrement, à la croissance de l'économie tertiaire et de l'économie numérique. Ces économies s'appuient sur le développement de technologies particulièrement gourmandes en électricité et très sensibles à la sécurité du réseau électrique (Datacenters, serveurs, calculateurs, infrastructures de télécommunication).

La tendance s'explique également par le développement de nouveaux usages électriques et le transfert d'usages depuis une source d'énergie non électrique vers l'électrique. Le véhicule électrique, dont le développement est l'occasion de transformer la consommation d'énergie issue du pétrole en une consommation électrique, représente le cas le plus emblématique de ces transferts d'usage.

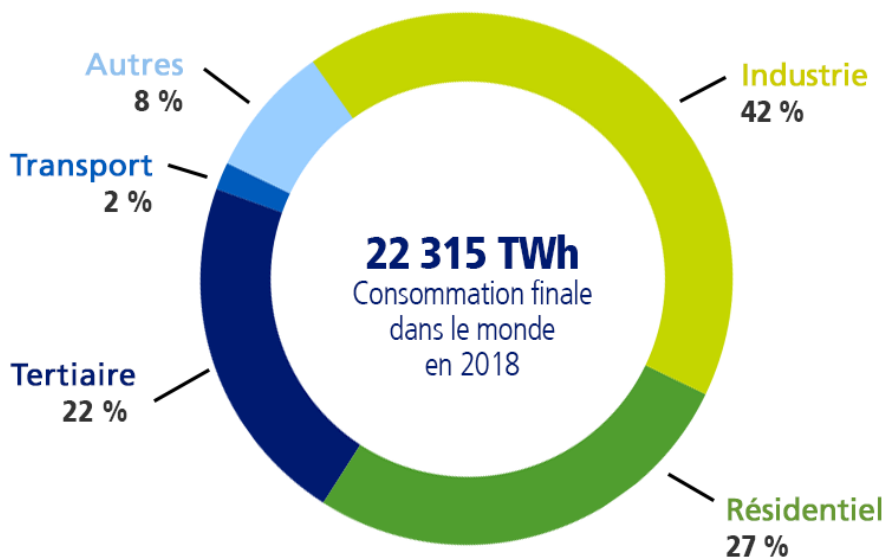


Évolution de la consommation électrique finale dans le monde entre 1974 et 2018

Source IEA - Electricity Information 2020

© EDF

Fig. 3.1 : Evolution de la consommation électrique



La consommation d'électricité finale par secteurs dans le monde en 2018

Source IEA - Electricity Information 2020

© EDF

Fig. 3.2 : Répartition de la consommation par secteur

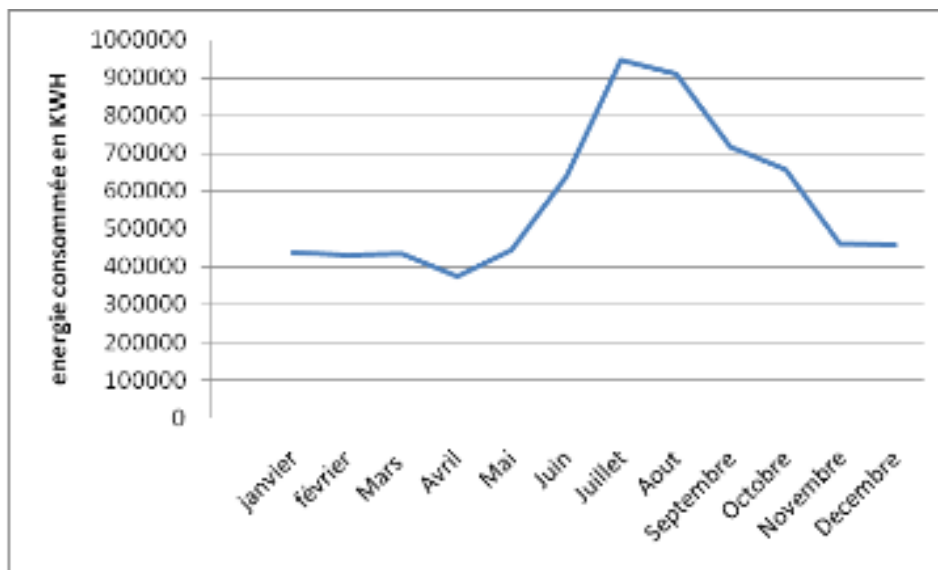


Fig. 3.3 : Exemple de variation saisonnière de la consommation



Fig. 3.4 : Exemple de variation journalière de la consommation

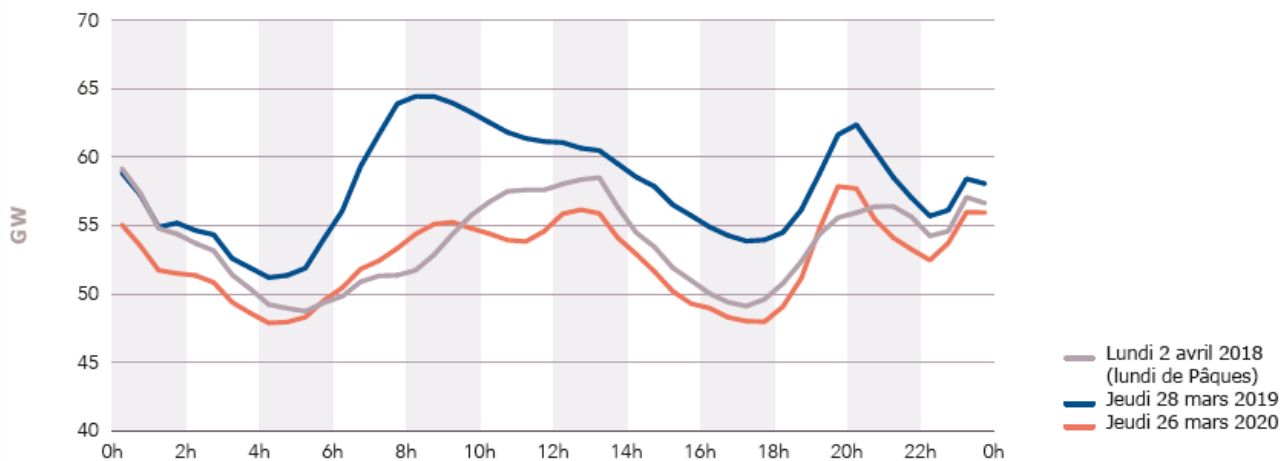


Fig. 3.5 : Impact Covid-19

La transition : mix de production

- Énergies renouvelables et intermittentes ;
- Avenir du nucléaire.

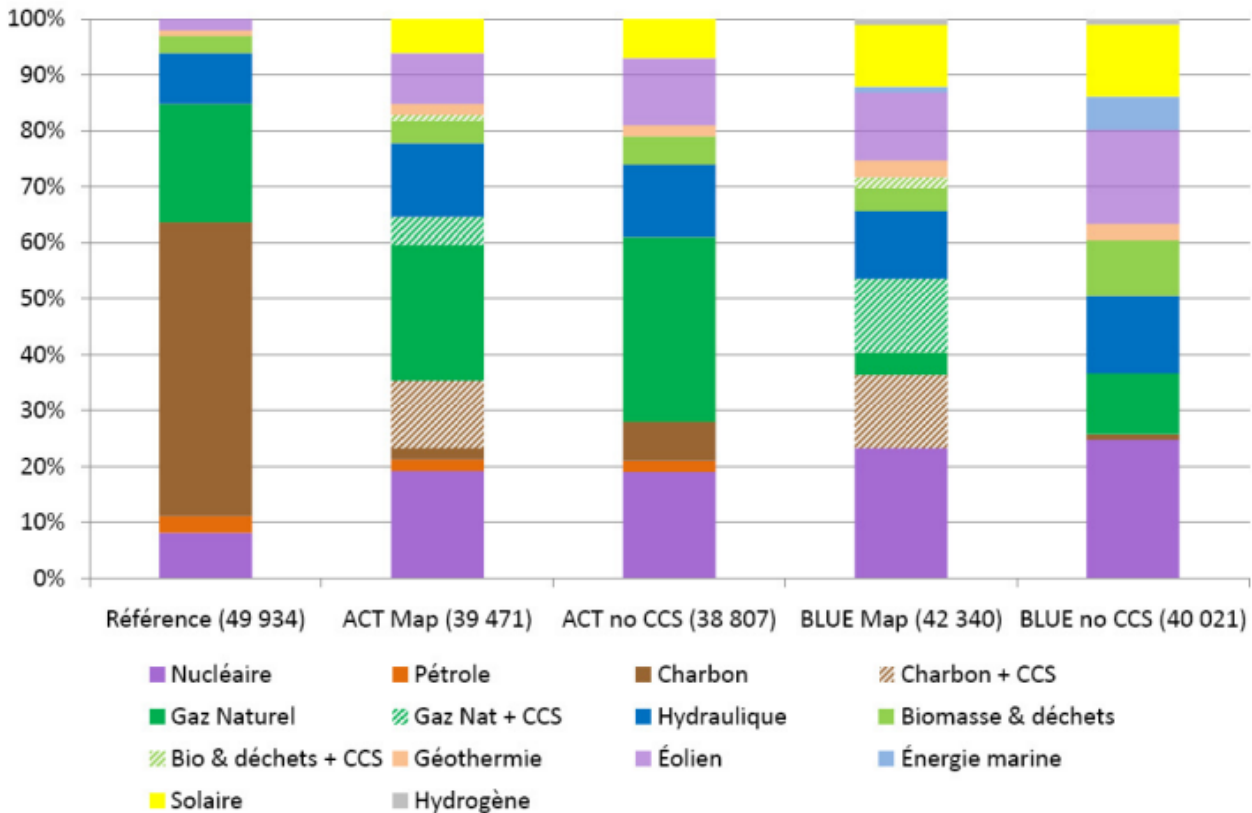


Fig. 3.6 : Mix de production d’électricité en 2050
 (Données : AIE 2008, Energy Technology Perspectives).

1.2 Gestion de la pointe

Les pointes augmentent 1,5 fois à 2 fois plus vite que la consommation moyenne (cf. données historiques et prévisions de croissance).

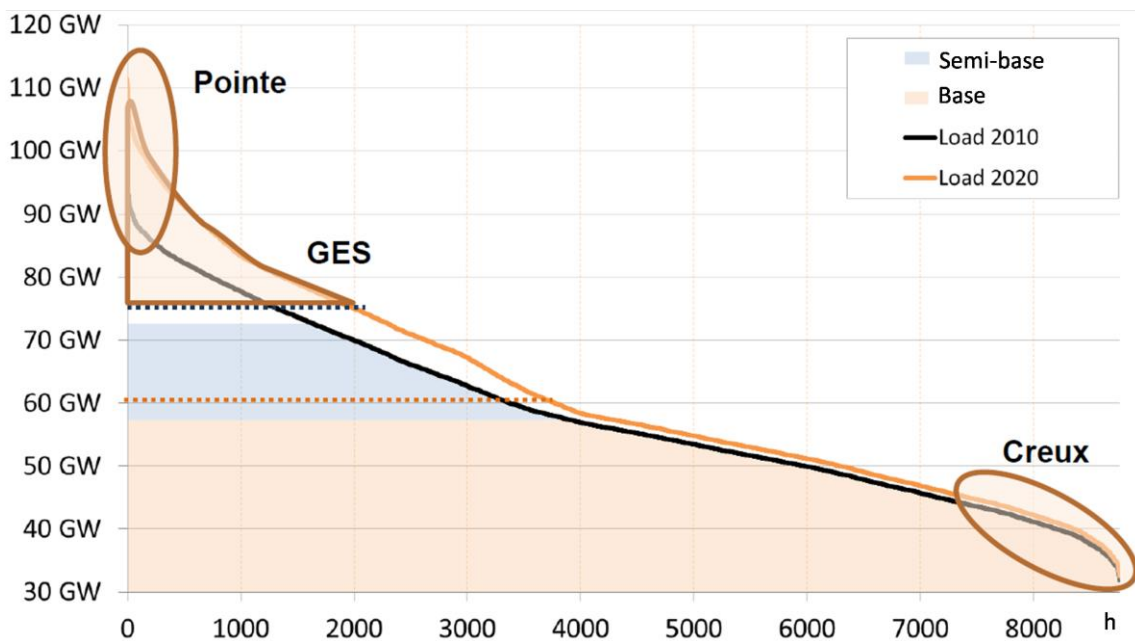
L’effacement de la pointe (peak shaving) est une solution rentable pour limiter les puissances de pointe. L’effacement permet de réduire les appels de puissance en pointe et de limiter les investissements en capacités de pointe.

Avantages de la gestion de la demande (**DR : Demand Response**) :

- L’annulation de consommation ou report de la pointe vers la base.
- La stimulation de consommation pendant les creux permet d’absorber l’énergie excédentaire.
- La DR apporte une valeur réelle au système électrique, mais les mécanismes de redistribution ne sont pas tous en place : mécanisme d’ajustement, marché de capacités, marché de réserves, ...

- Offre alternative aux signaux tarifaires et aux contrats entre clients industriels et fournisseurs

Les **agrégateurs d'effacement** contractualisent des capacités d'effacement auprès de plusieurs clients et disposent d'une grande flexibilité tout en garantissant un impact limité chez les clients.



Source : Energy Pool 2011, d'après RTE 2010

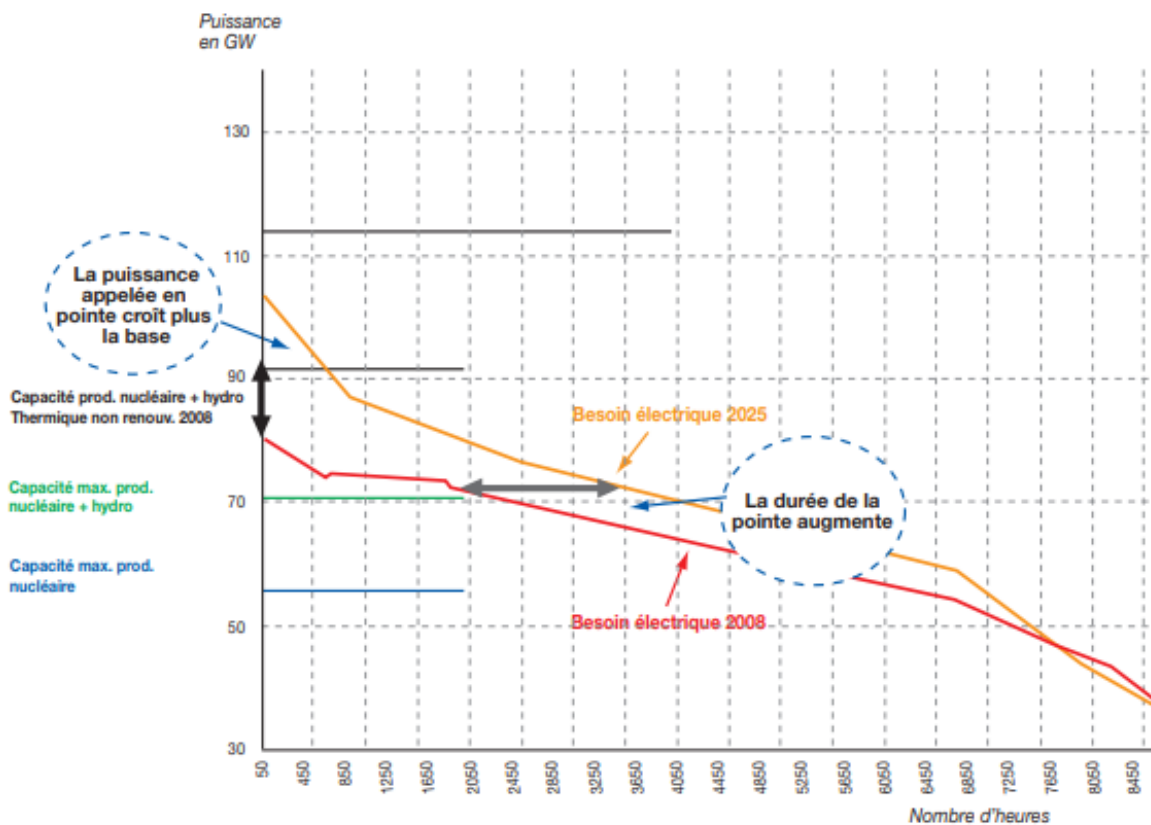


Fig. 3.7 : Evolution de la pointe de consommation

2 Production décentralisée – Ressources renouvelables

Le réseau électrique a été conçu pour alimenter une consommation diffuse et intermittente à partir d'une production contrôlable, de disponibilité prévisible et élevée, raccordée au réseau de transport.

Au contraire, l'électricité des installations de production d'origine renouvelable est intermittente, décentralisée, variable. Leur développement implique une révision fondamentale des concepts ayant présidé au dimensionnement des réseaux.

On peut se demander si l'intégration des énergies renouvelables est une composante des smart grids ou si ce sont les smart grids qui devront s'y adapter. Dans les deux cas, les énergies renouvelables auront une influence sur le développement des smart grids.

2.1 Contraintes liées aux ENR

En intégrant de plus en plus de sources de production fondées sur des énergies renouvelables, la production d'électricité va progressivement changer de nature. La forte progression de ce type de production électrique répond au fort souhait sociétal d'accélérer leur développement. Néanmoins, ces sources d'énergie possèdent des caractéristiques tout à fait particulières qu'il s'agit de bien prendre en compte pour envisager d'en faire des sources importantes de production électrique.

1) Intermittence

Contrairement aux moyens de production conventionnels, les énergies renouvelables ne suivent pas la dynamique de la consommation. Il s'agit de sources d'énergie intermittentes et assez difficilement prévisibles, puisque dépendantes de contraintes météorologiques très variables : le ratio de disponibilité des ressources éoliennes et solaires dépend fortement de la vitesse du vent et des radiations solaires, qui varient d'une minute à l'autre. A contrario, les énergies thermique ou hydraulique dépendent de la situation pluviométrique ou de la température ambiante, dont la variabilité s'étale sur plusieurs jours.

2) hausse de la tension

La maîtrise de la tension induit le besoin de gestion de l'équilibre production - consommation localement. Des surproductions d'énergies décentralisées peuvent en effet faire apparaître des tensions trop élevées sur les réseaux de distribution qui nécessitent soit :

- de renforcer le réseau de distribution
- de mettre en place des équipements dédiés
- de faire appel au pilotage de la flexibilité permis par les smart grids :
 - Demande : gestion des recharges de véhicules électriques, effacements de consommation
 - Offre : effacement total ou partiel de la production en cas de surproduction locale par rapport à la consommation et aux capacités du réseau
 - Mise en place de moyen de stockage (thermique, chimique, inertiel)

De plus, ces contraintes impliquent la mise en œuvre de nouvelles technologies de conversion de puissance au niveau des installations – convertisseurs éoliens et onduleurs solaires – devant échanger des informations en temps réel avec les opérateurs de réseau pour être télé-réglées selon les conditions de fonctionnement d'ensemble du réseau.

2.2 Pilotage avancé des sources de production décentralisées

La production décentralisée est essentiellement associée à des moyens de production d'énergie renouvelable intermittente intégrés aux bâtiments (panneaux photovoltaïques, etc.), mais aussi à des moyens de production disponibles au niveau des infrastructures (cogénération, biomasse, moyens de génération de secours). Ces sources de production ont une capacité bien moindre (typiquement entre 0,1 et 50 MW) que celle des centrales de production (typiquement supérieure à 50 MW). Pour s'intégrer dans un réseau d'électricité intelligent, elles vont nécessiter :

- Une forte coordination de la production de multiples petites sources de production (alors qu'historiquement l'équilibrage temps réel offre/demande était réalisé au travers de quelques centaines de points de production);
- De meilleurs outils de planification de la production selon les données météo, les estimations de consommation, etc. ;
- Une intégration dans le réseau au travers de flux d'information bidirectionnels ;
- Des facilités d'intégration et raccordement au réseau électrique (de distribution notamment);
- L'intégration éventuelle de capacités de stockage permettant de compenser l'intermittence de ces sources d'énergie.

La transition de ces moyens de production intégrant une part croissante de ressources renouvelables nécessite donc de mettre en œuvre de nouveaux systèmes de pilotage et de contrôle de ces moyens de production pour amener une flexibilité opérationnelle suffisante.

La centrale virtuelle :

Le déploiement de capteurs permet de surveiller l'état du réseau (défaut, congestion, tension) et de prendre compte la production décentralisée pour la téléconduite et la supervision du réseau.

La centrale virtuelle, un ordinateur équipé d'un logiciel de contrôle du système, centralise les informations sur les prévisions et détermine le plan optimal d'utilisation du système.

Le concept représente un ensemble de méthodologies pour la connexion et la gestion des ressources d'énergie distribuées à grande échelle en tenant compte de l'intermittence. Il s'agit d'une agrégation de la production, du stockage et du pilotage de la consommation en vue de faire face aux contraintes de garantie de puissance de sortie de sources intermittente.

Concept de la coopérative énergétique : Centrale virtuelle

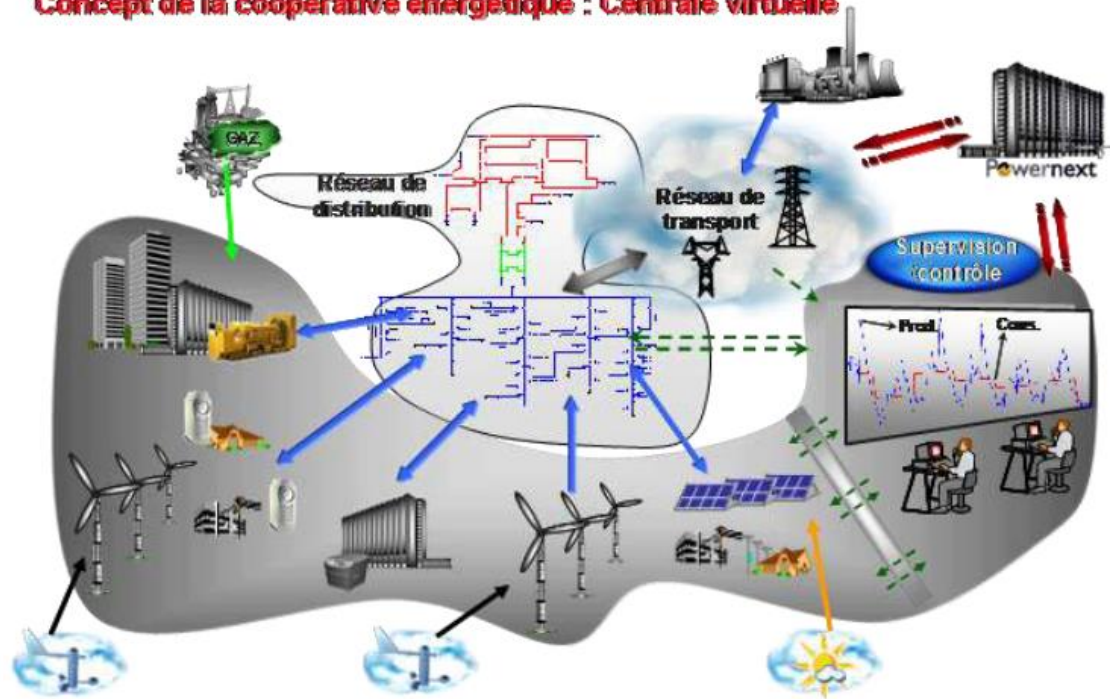


Fig. 3.8 : principe de la centrale virtuelle

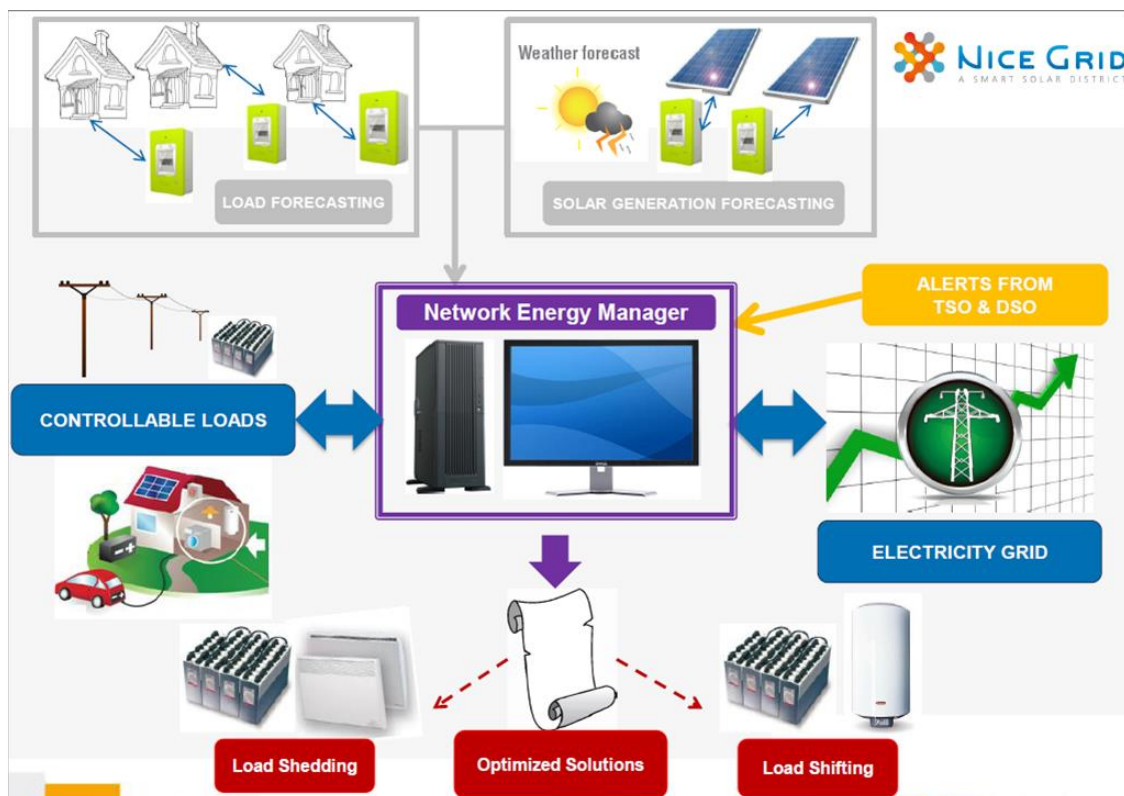


Fig. 3.9 : Gestion du smart-grid

3 Stockage

3.1 Intérêts du stockage

La pénétration des EnR non stockables, éolienne et solaire, a renforcé l'intérêt du stockage de l'électricité. La disponibilité du stockage à un coût compétitif et à grande échelle serait un facteur clé pour répondre à l'accroissement de la pénétration des énergies renouvelables et à la variabilité de la demande. On pourrait par exemple stocker l'énergie solaire produite dans la journée pour une utilisation nocturne, ou utiliser le stockage pour pallier l'intermittence de l'éolien.

C'est donc une solution à l'intermittence des énergies renouvelables :

- Lisser et garantir la production intermittente pour accompagner son développement
- Participer à l'équilibre offre-demande (pointe et creux)
- Contribuer aux services système
- Back-ups
- Qualité de la tension

L'utilité du stockage ne fait plus débat. Mais son intégration soulève encore quelques interrogations. En premier lieu, sa localisation et sa taille. Le stockage a en effet une fonction transversale sur le réseau. La question se pose de savoir s'il est plus efficace d'intégrer de nombreuses unités de stockage de petite taille sur le réseau de distribution au niveau de la production décentralisée et au plus près de la consommation ou quelques unités de stockage de grande dimension, éventuellement au niveau du quartier ou des sources de production renouvelables à plus grande échelle.

En second lieu, les technologies les plus adaptées aux besoins. En effet, selon le niveau d'intégration dans le réseau et la taille de l'application, différents modes d'utilisation peuvent être envisagés, ce qui implique un profil d'usage en matière de puissance appelée et de durée de l'appel de puissance (réglage en fréquence, réserve primaire, lissage de pointe, etc.). Ainsi chaque type d'application et lieu d'intégration aura une traduction technique en matière de puissance chargée et déchargée dans le stockage, de quantité d'énergie à stocker (et donc de durée de la charge ou décharge) ainsi qu'en matière de longévité du système de stockage. En outre, les contraintes opératoires ont un impact sur le choix de la technologie.

Il y a un autre frein sur le plan réglementaire, l'énergie stockée n'est pas valorisée selon sa source de production. Ainsi, un producteur d'énergie photovoltaïque qui stocke une partie de sa production ne peut prétendre au tarif de rachat lors de la réinjection de cette énergie.

3.2 Stratégies de stockage

Les solutions de stockage de masse demeurent encore limitées. Le stockage diffus et décentralisé constitue une piste d'amélioration mais il faudra pouvoir l'intégrer au réseau et le piloter de façon globale avec les outils adéquats.

Stockage centralisé :

- Coût du MWh entre 75 et 250 € pour une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), contre 300 à 500 € pour du stockage électrochimique.
- Des coûts d'investissements importants, de l'ordre de 1000 €/kW, soit pratiquement le double d'une turbine à combustion.
- Un contexte réglementaire qui n'est pas adapté au stockage

Stockage décentralisé

Le stockage décentralisé a de l'avenir sur les réseaux de distribution pour pallier l'intermittence des moyens de production décentralisés. On peut distinguer le stockage distribué (HTA) et le stockage diffus (BT).

- La mise en place de systèmes de communication bidirectionnels et d'outils de mesure informatisés permettra de piloter les moyens de stockage d'énergie décentralisés.
- Le pilotage automatique permettra à partir de capteurs, d'automatismes de réglages et de télécommandes, de réagir rapidement en fonction des contraintes locales.

		Service	
		Opérateurs de génération et transmission	Utilisateurs
Localisation	centralisée (MW)	<ul style="list-style-type: none"> • Energie Déplacement d'énergie dans le temps • Puissance Ecrêtage - Lissage - Montée en puissance - Services réseaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Stockage commercial Ecrêtement de la demande pour réduire les facturations en heures "pleines"
	décentralisée (kW)	<ul style="list-style-type: none"> • Réseaux de distribution Contrôle des flux d'énergie entre génération décentralisée et réseau de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Maisons intelligentes Autoconsommation Maison avec zéro impact énergétique Protection contre les pannes secteur

Stockage et prix négatifs de l'électricité

Dans la nuit du 3 au 4 octobre 2009, le prix du MWh sur le marché spot allemand à Leipzig (EEX) a atteint -500 € donc largement négatif.

Cela signifie que le vendeur d'électricité est obligé de payer son acheteur pour se débarrasser de sa marchandise ! Ce phénomène s'est produit 25 fois en 2009 et 4 fois en 2010 (au 18/08), principalement en Allemagne, Belgique et Danemark. Une fois en France début janvier 2012 (-5 €/MWh).

C'est la conséquence d'un double phénomène :

- Une faible demande d'électricité,
- Des vents forts qui font tourner les éoliennes à plein régime (l'électricité éolienne est prioritaire sur le réseau avec obligation d'achat à un prix garanti rémunérateur par le distributeur).

Le surcoût engendré par ces prix négatifs est à la charge du consommateur.

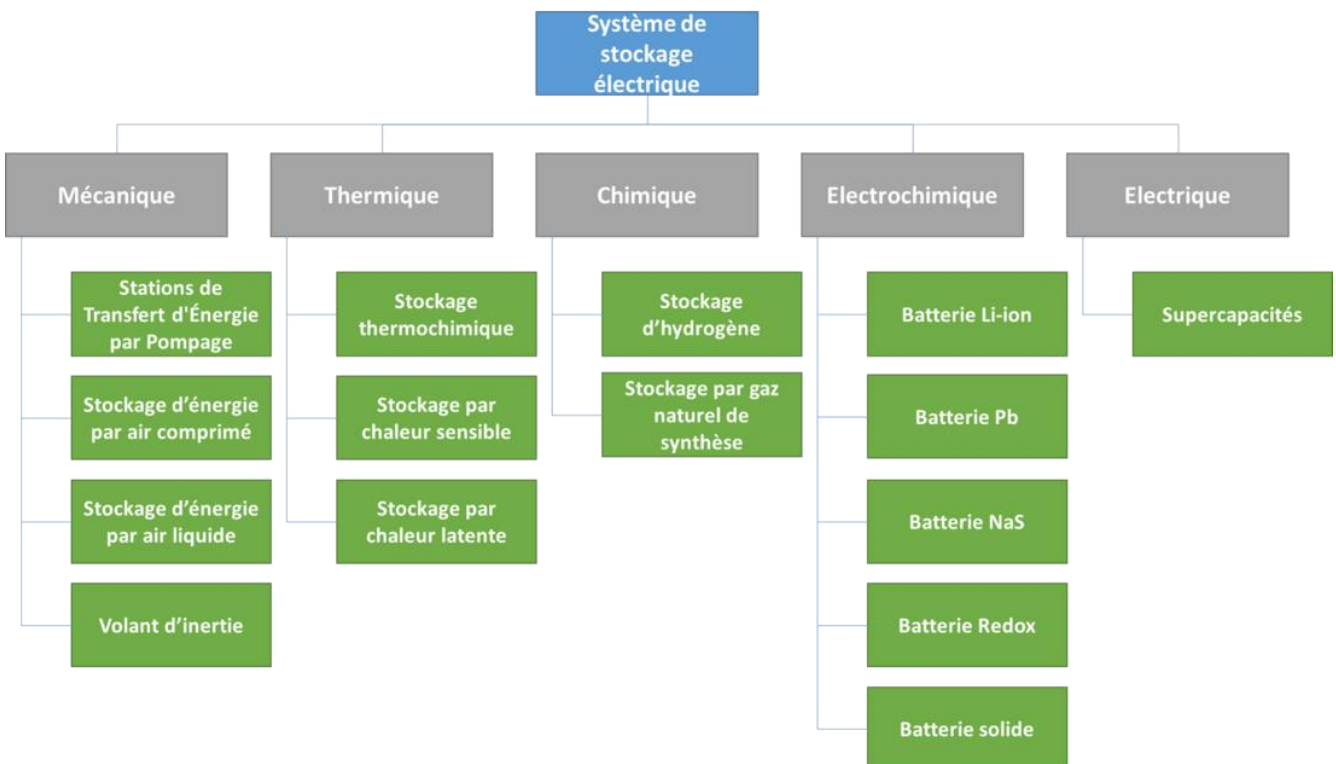
Cela crée un "effet d'aubaine" pour les propriétaires de barrages (en Suisse notamment): ils se font payer pour acheter cette électricité excédentaire avec laquelle ils actionnent des pompes pour remplir des réservoirs et ils produiront de l'électricité aux heures de pointe quand le prix spot est élevé.

3.3 Equipements de stockage

Les équipements de stockage proposés par les entreprises sont principalement basés sur l'électrochimie Li-Ion. Cette technologie s'est dans un premier temps développée pour répondre aux deux extrêmes du spectre des attentes ; d'un côté, le stockage destiné à la grande consommation de faible capacité, faible coût et durée de vie réduite, essentiellement pour téléphonie mobile et petits équipements similaires et, de l'autre côté, le stockage très performant à cyclage fréquent, longue durée de vie et très faible série pour satellites civils et militaires. Cette technologie peut dorénavant être utilisée pour les applications de stockage au sein d'un réseau électrique.

Les solutions de stockage d'énergie se divisent en quatre catégories :

- Mécanique (barrage hydroélectrique, Station de transfert d'énergie par pompage - STEP, stockage d'énergie par air comprimé – CAES, volants d'inertie),
- Electrochimique (piles, batteries, vecteur hydrogène),
- Electromagnétique (bobines supraconductrices, super-capacités),
- Thermique (chaleur latente ou sensible).



Principales technologies de stockage de l'électricité. Source : CGE d'après Conseil mondial de l'énergie, 2017.