



ENJEUX DU STOCKAGE

Jean-Baptiste BART
EDF R&D

20 janvier 2016
Conférence SFEN Rhône-Ain-Loire

AGENDA

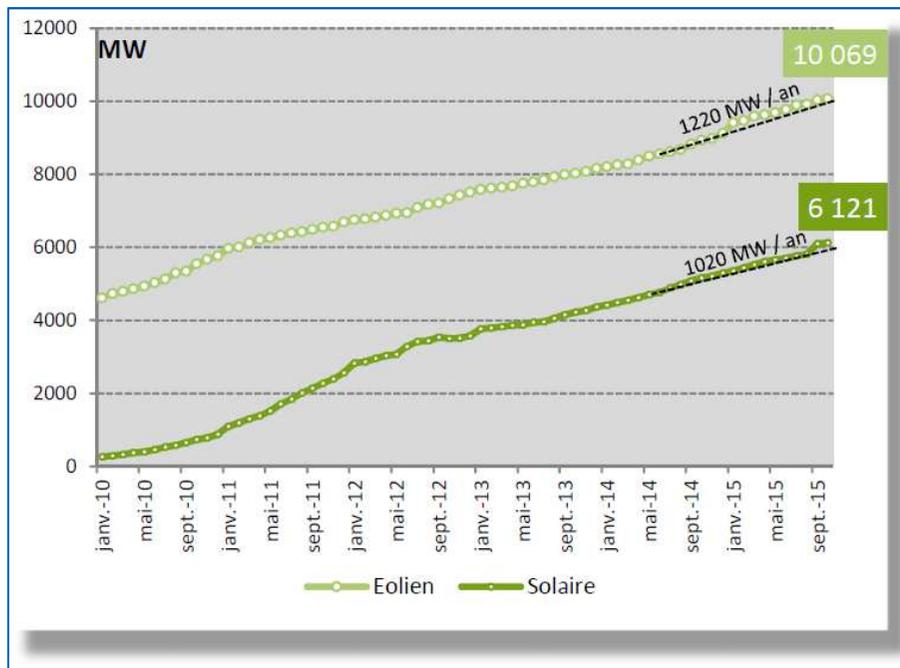
1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

AGENDA

1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

L'ÉOLIEN ET LE PV JOUENT UN RÔLE CROISSANT AUX NIVEAUX NATIONALS ET LOCAUX

- Le mix électrique français contient de plus en plus d'EnR intermittentes
 - Le développement de l'éolien et du PV en France a connu un ralentissement mais un regain est constaté depuis 2014



Énergie produite	TWh	Variation 2014/2013	Part de la production
Hydraulique	68,2	-9,7%	12,6%
Eolien	17,0	6,7%	3,1%
Photovoltaïque	5,9	27,2%	1,1%

Source : RTE

→ Enjeu pour l'équilibre Offre / Demande national

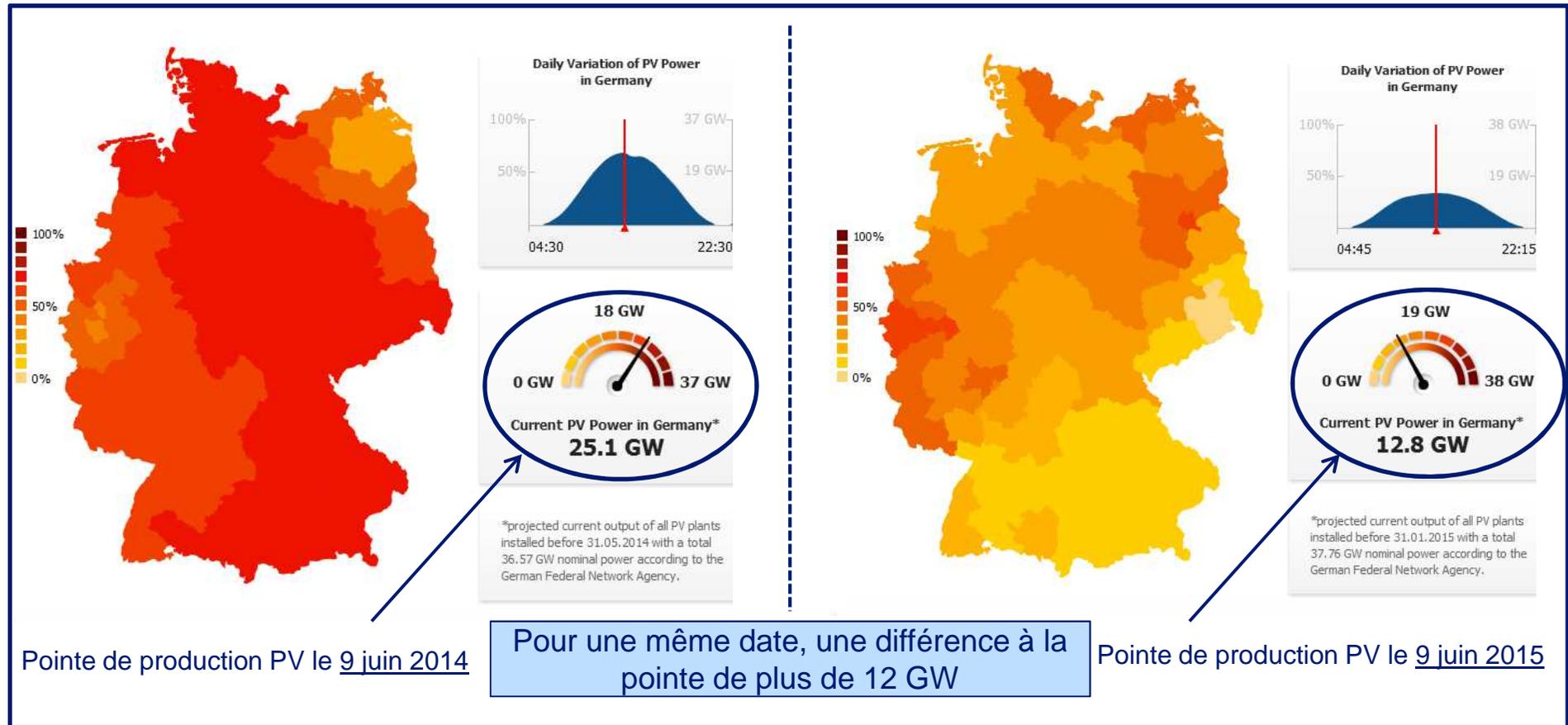
- 95 % des EnR intermittentes sont raccordées au niveau des réseaux de distribution

→ Enjeu pour l'intégration dans les réseaux locaux



UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ LOCALE, NATIONALE ET ... INTERNATIONALE

- La variabilité des productions EnR est déjà forte actuellement

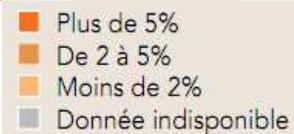


UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ LOCALE, NATIONALE ET ... INTERNATIONALE

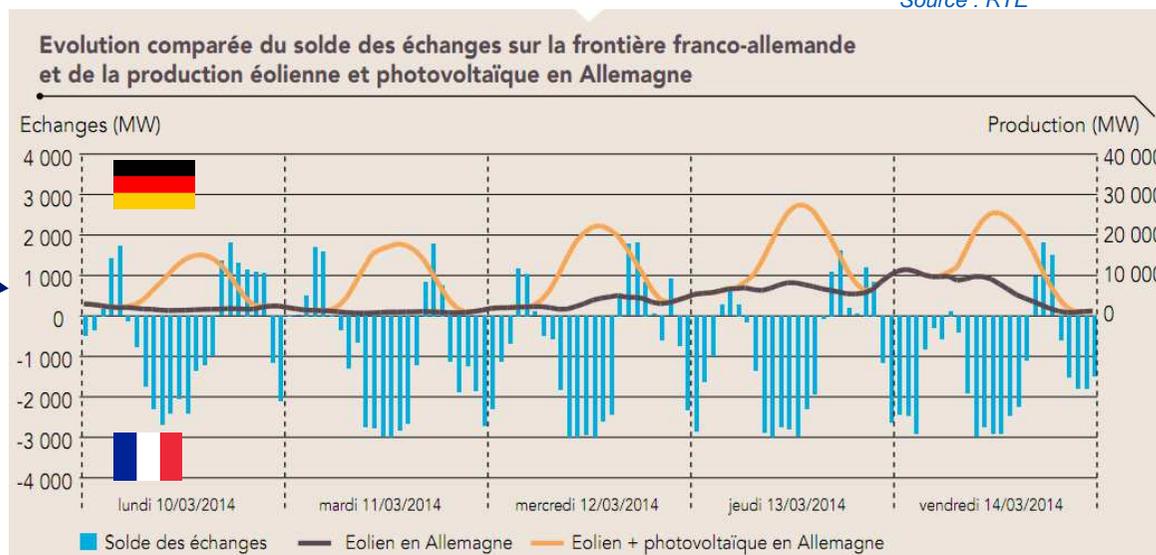
- **Systeme électrique français : le besoin croissant de flexibilité est également lié aux autres systèmes électriques européens**
 - Etant très interconnectée avec ses voisins, la France est très exposée à l'évolution de leurs mix énergétiques

L'équilibre offre / demande français est dépendant en partie des productions EnR intermittentes étrangères, en particulier du PV et de l'éolien allemands

Part de la consommation couverte par la production photovoltaïque



Source : RTE

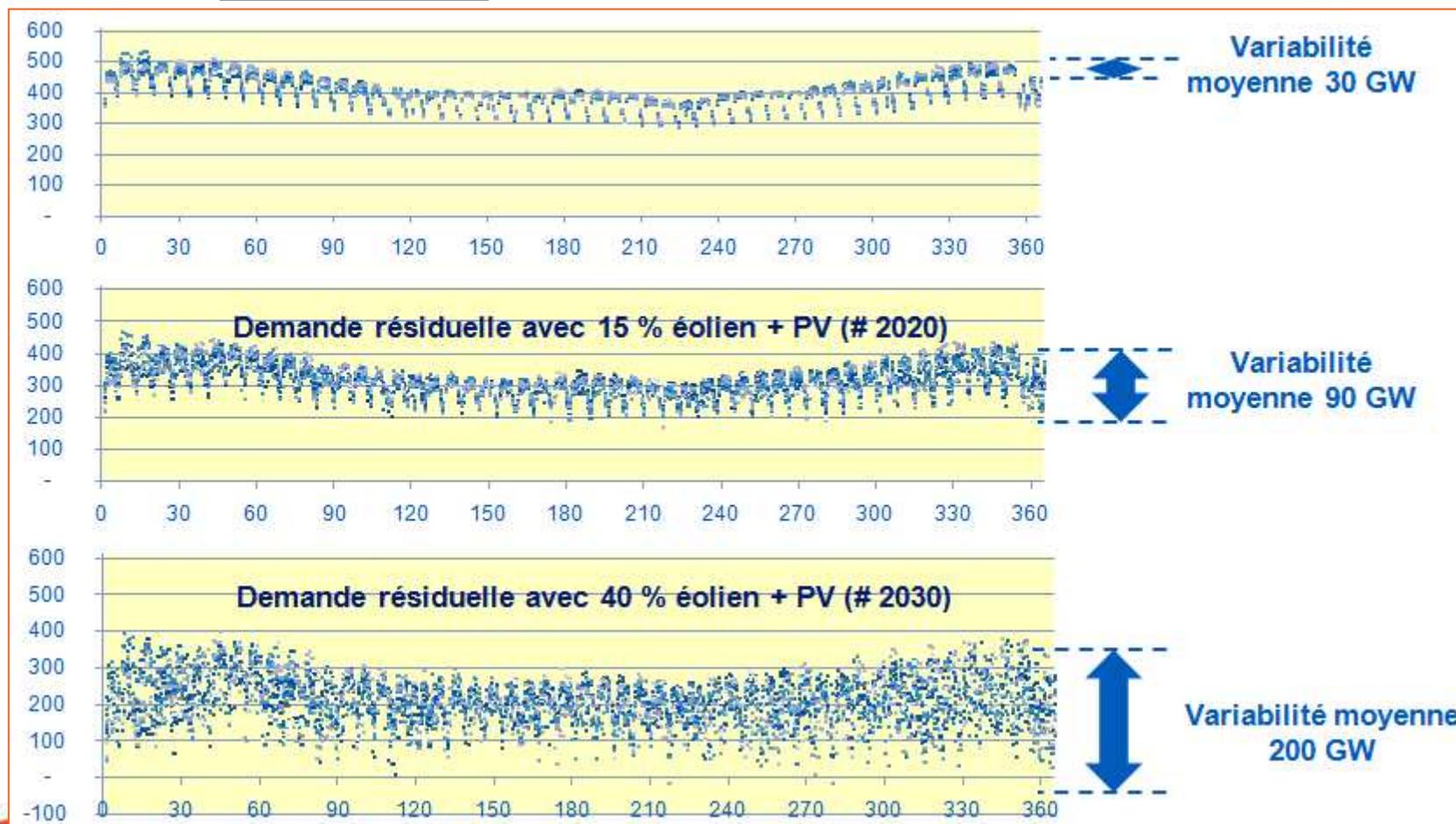


- **Une approche commune sur le gestion de cette flexibilité internationale semble nécessaire**

UN BESOIN CROISSANT ET DURABLE DE FLEXIBILITÉ INTERNATIONALE

- L'arrivée potentiellement massive des EnR intermittentes dans les années à venir va maintenir ce besoin croissant de flexibilité

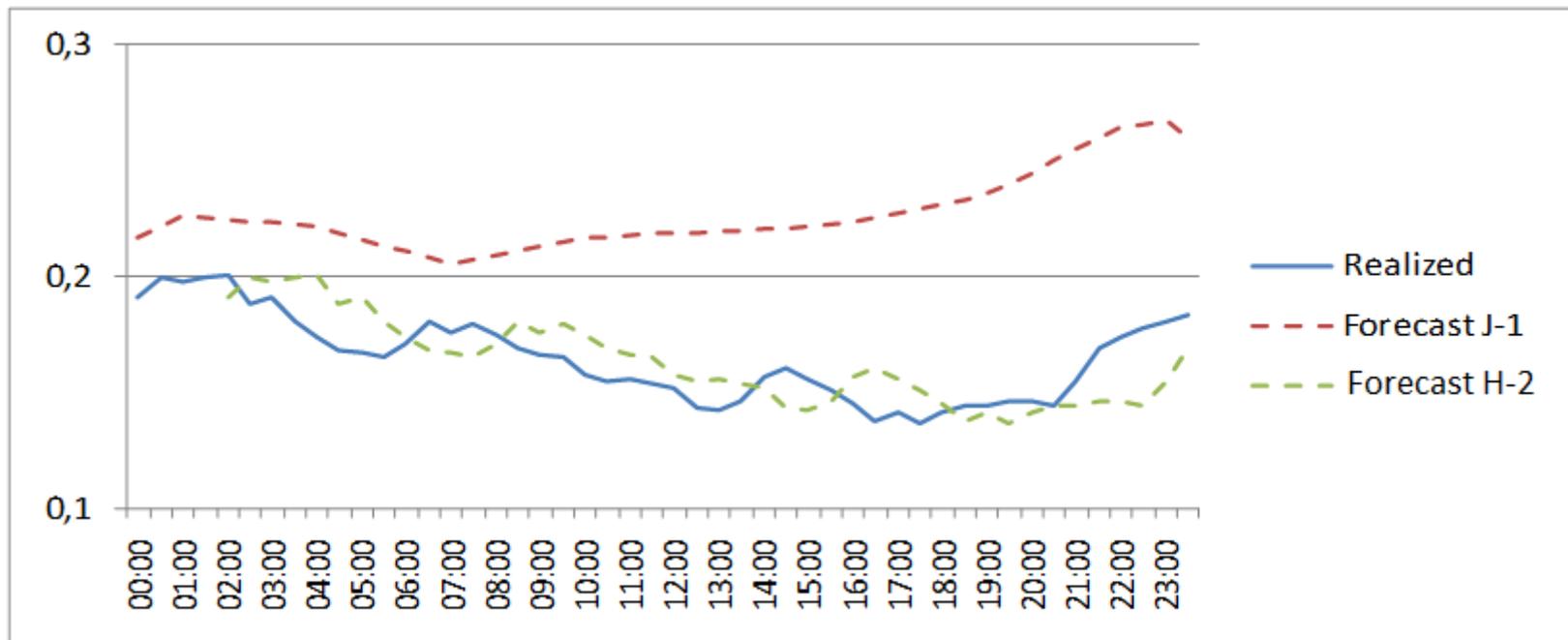
Variabilité de la demande résiduelle journalière dans différents scénarii de pénétration des EnR intermittentes



INCERTITUDE SUR LA PRODUCTION ENR : NOUVEAU BESOIN EN FLEXIBILITÉ

- Besoin de planifier davantage de marges opérationnelles à différents horizons de temps pour faire face à l'incertitude de la production éolienne et PV

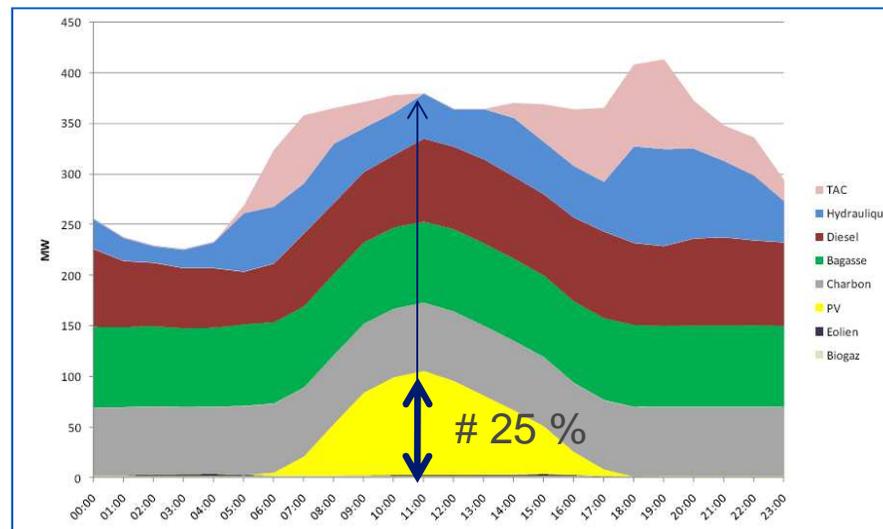
Exemple de facteurs de charge prévus et réalisés éolien en France le 14/01/2011



- Besoins de moyens supplémentaires pour fournir des capacités de back-up et des services système

LES SYSTEMES ILIENS FONT AUSSI FACE DE GROS ENJEUX

- Dans les territoires insulaires, l'éolien et le PV ont aussi connu un déploiement important
- Nécessité de gérer la puissance instantanée produite par les EnR intermittentes parce que, au-delà d'un certain seuil (fixé à **30%**), le manque d'inertie du mix fragilise le système.



Source : EDF-SEI

Production d'une journée typique à l'île de la Réunion

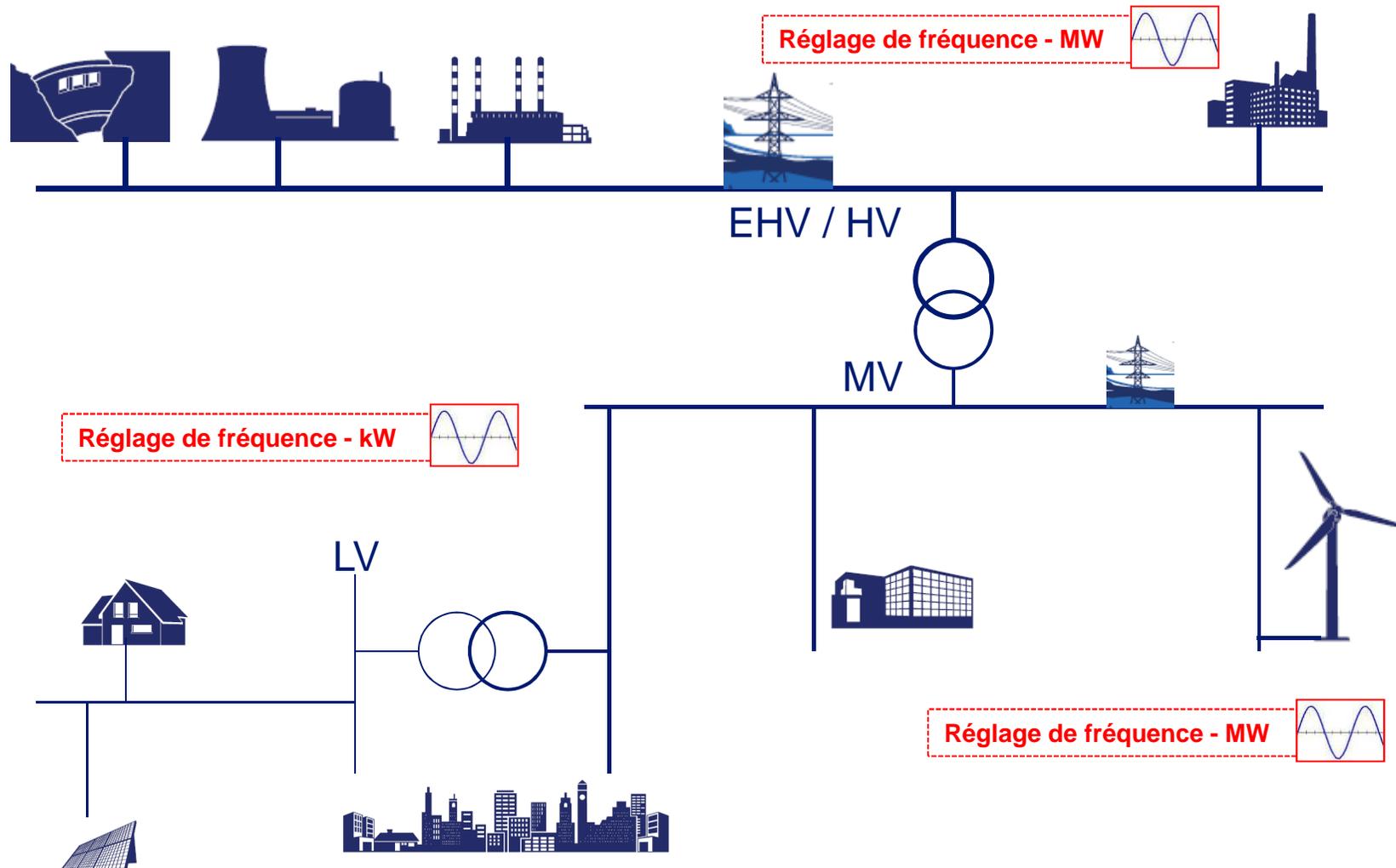
AGENDA

1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

LE STOCKAGE POURRAIT JOUER UN RÔLE CROISSANT DANS UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE PLUS FLEXIBLE

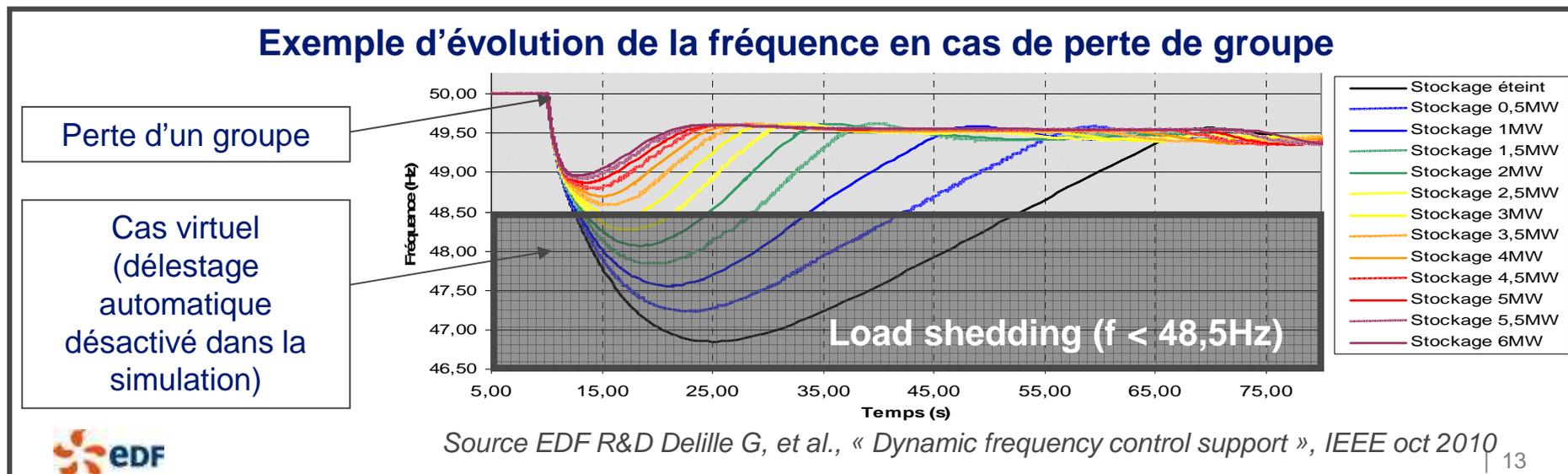
- Les progrès techniques et économiques de certaines filières du stockage pourraient lui donner un rôle dans la gestion du système
- Le stockage est une source potentielle de flexibilité pour le système, mais c'est un levier parmi d'autres :
 - Développement du réseau
 - Ajout de nouveaux moyens de production flexibles
 - Pilotage de la demande
- Deux défis à relever pour le stockage :
 - Défi économique : trouver un business model rentable
 - Défi technique : identifier les services possibles

LE STOCKAGE PEUT RENDRE DIFFÉRENTS SERVICES À DIFFÉRENTS ENDROITS DU RÉSEAU



LE STOCKAGE ET LE RÉGLAGE DE FRÉQUENCE

- Dans les systèmes iliens, la capacité du stockage à répondre vite est très intéressante pour le contrôle de la fréquence
 - Même si la réserve est suffisante, la perte d'un groupe important dans un système ilien peut provoquer des délestages de consommation
 - Elle nécessite une réponse très rapide ($<1s$) et une décharge de puissance durant plusieurs dizaines de secondes
- Dans la simulation ci-dessous, le délestage de consommation est évité avec un moyen de stockage d'au moins 4-5 MW, une réserve primaire de 20-25 MW dans le cas d'une demande de 250 MW



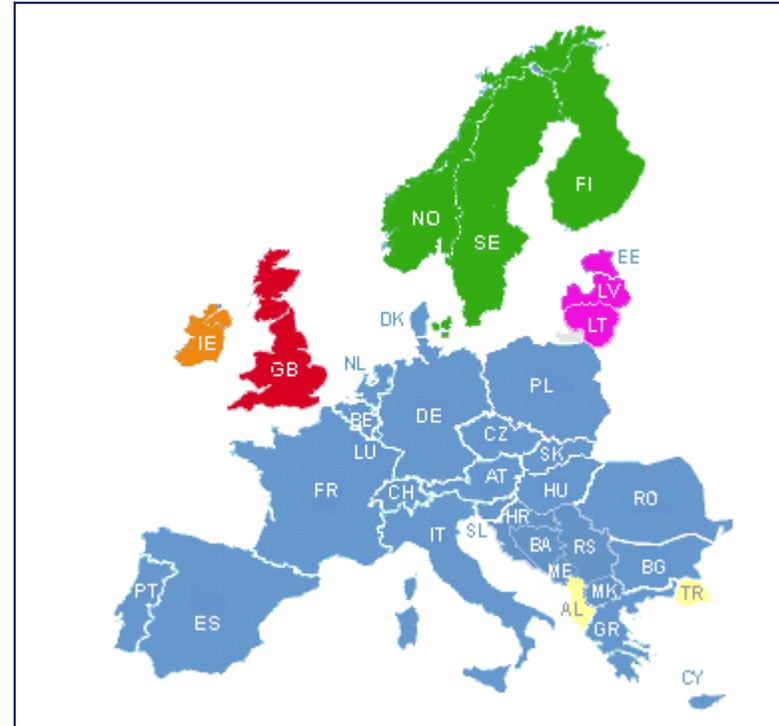
LE STOCKAGE ET LA RÉGULATION DE FRÉQUENCE EN EUROPE CONTINENTALE

- En Europe, la régulation de fréquence est souvent citée comme l'une des opportunités les plus prometteuses pour le développement du stockage mais ...

- Le marché est ...
 - ... limité : 3000 MW en Europe
 - 600/700 MW en France
 - ... incertain : les règles et rémunérations sont très diverses suivant les pays
 - ... concurrentielle : le stockage doit concurrencer ou compléter d'autres solutions existantes et robustes
- Des démonstrateurs sont encore nécessaires
 - Expérimentation lancée avec une batterie Li-Ion 1 MW / 30 minutes sur le "Concept Grid" d'EDF R&D aux Renardières

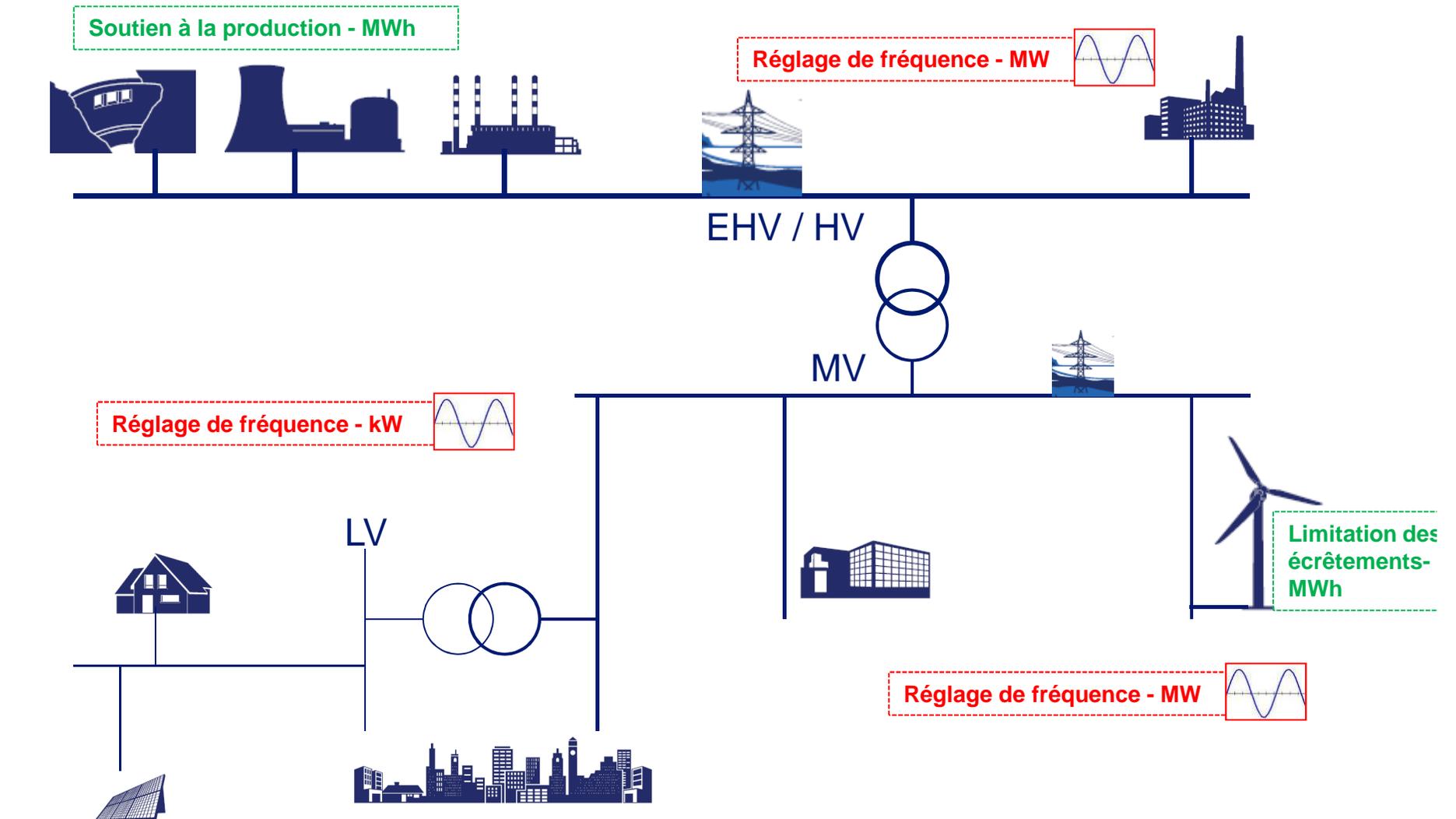
- Aux USA, des réglementations spécifiques ont été mises en place pour la régulation de fréquence

- "Pay for Performance" a été créée pour des moyens de régulation de fréquence très réactifs (ex : les *flywheels* y sont éligibles)

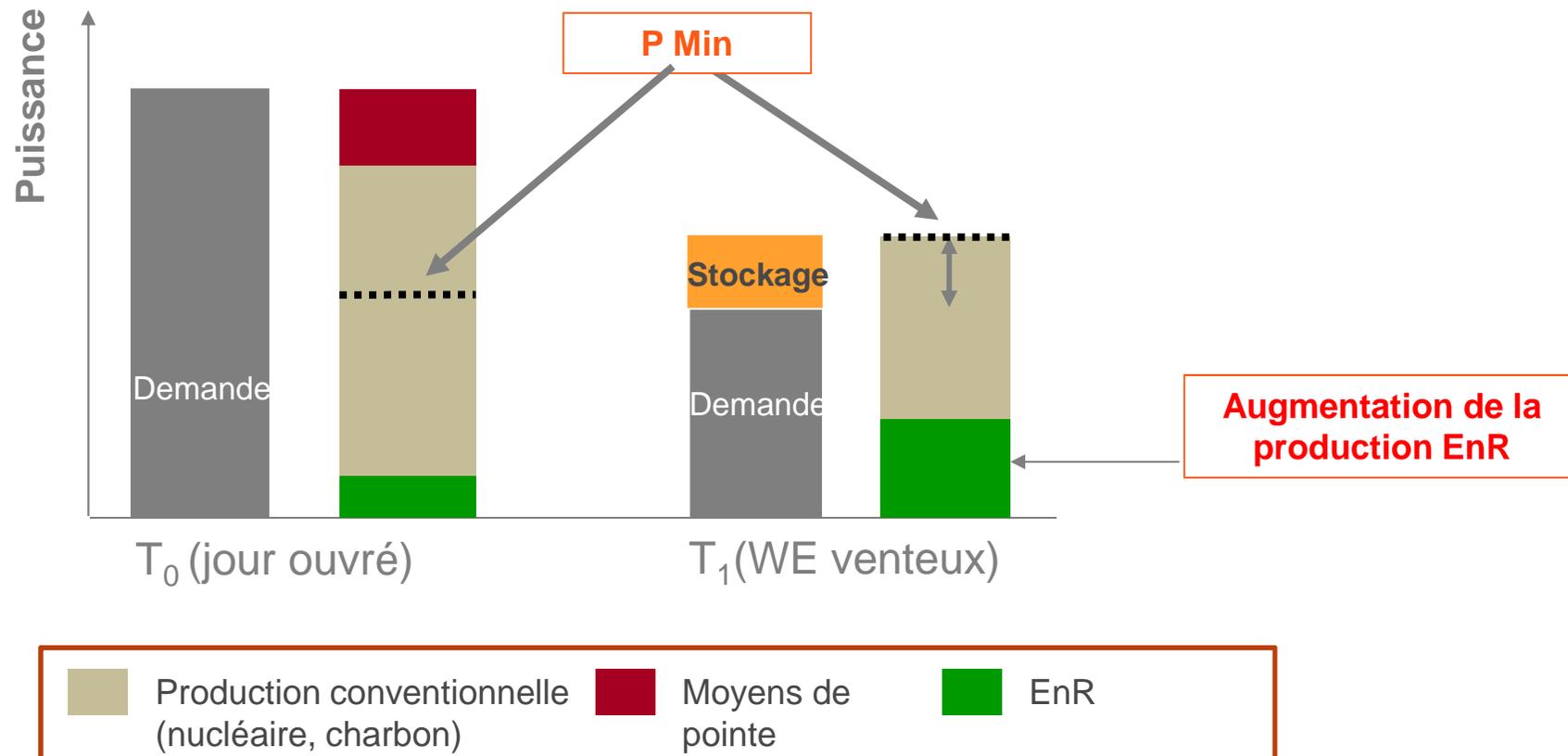


The synchronous zones of ENTSO-E

LE STOCKAGE PEUT RENDRE DIFFÉRENTS SERVICES À DIFFÉRENTS ENDROITS DU RÉSEAU

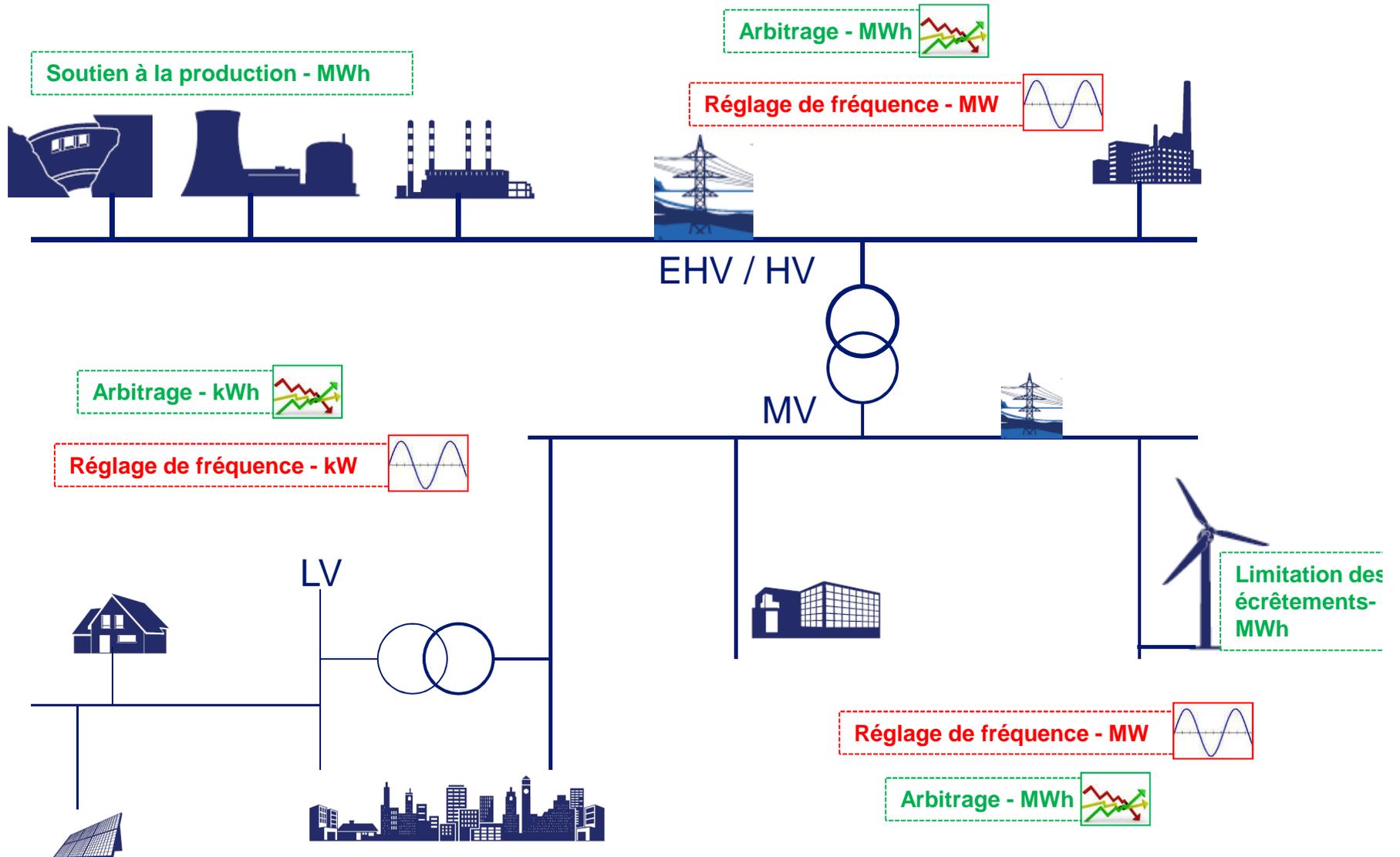


LE STOCKAGE : UN SOUTIEN A LA PRODUCTION CONVENTIONNELLE

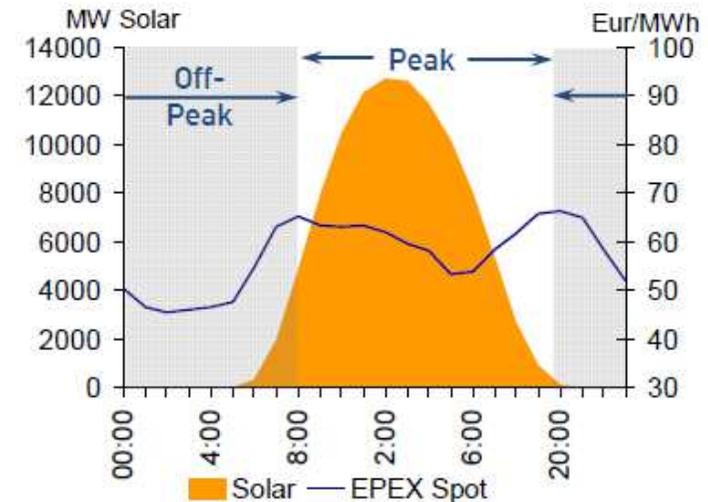
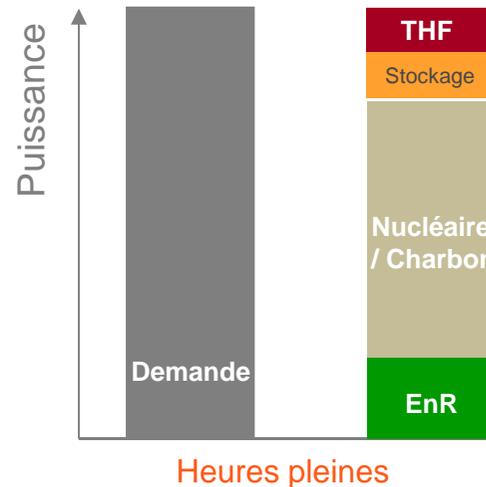
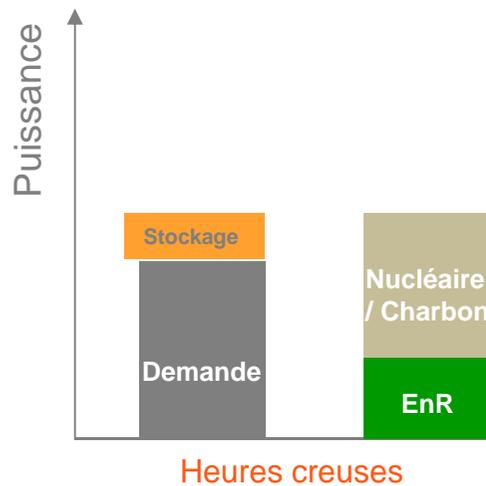


- L'intermittence et la variabilité des EnR ajoutent un nouvel aléa à la gestion de la production et accroissent le besoin de manœuvrabilité des centrales conventionnelles (nucléaire, charbon,)

LE STOCKAGE PEUT RENDRE DIFFÉRENTS SERVICES À DIFFÉRENTS ENDROITS DU RÉSEAU



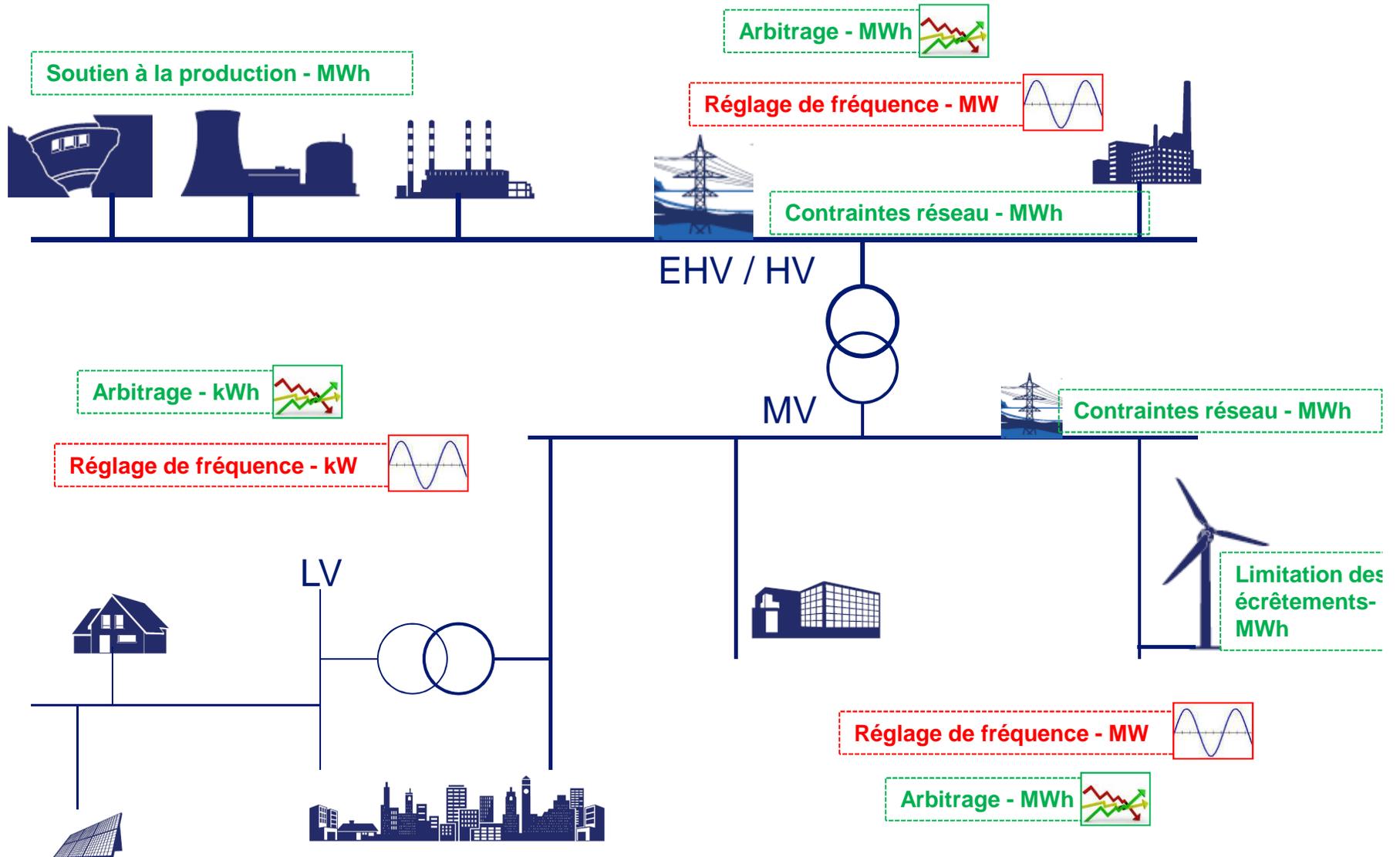
LE STOCKAGE, UN OUTIL POUR L'ARBITRAGE TEMPOREL



Source EnBW

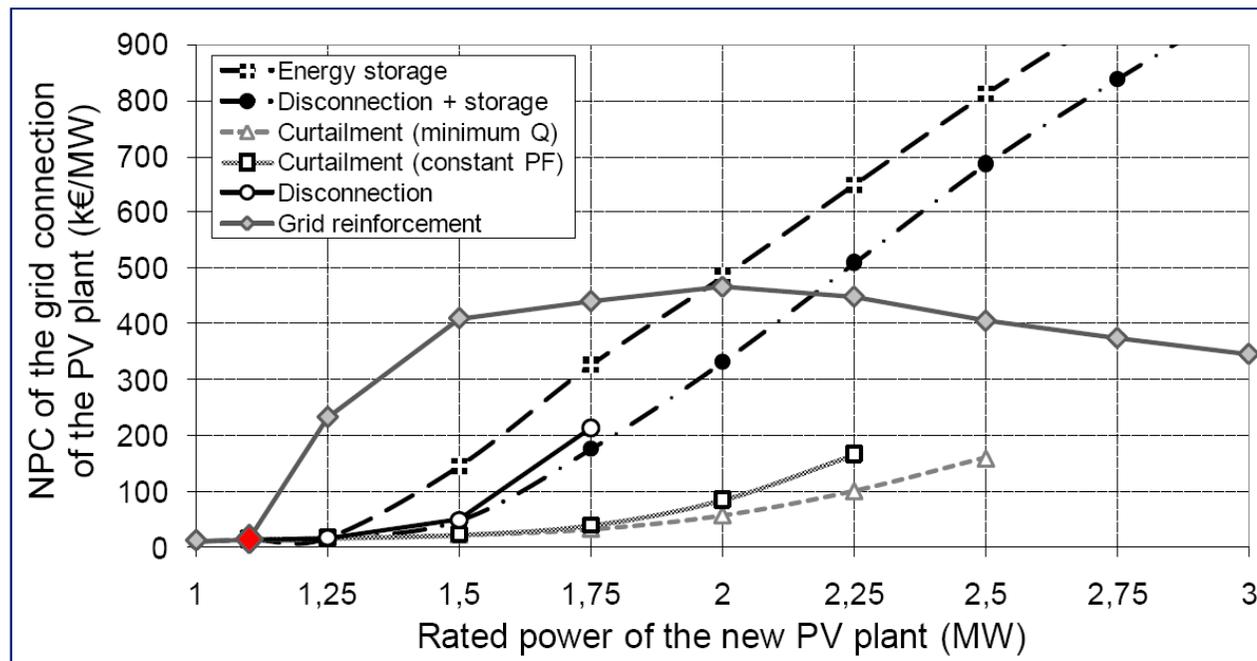
- Historiquement, l'arbitrage est la principale application du stockage
- Mais lorsque la production renouvelable est fortement corrélée à la demande, le spread de prix tend à diminuer (ex. de l'Allemagne)
- Ce seul service n'est plus suffisant pour atteindre la rentabilité
 - Le stockage doit rendre plusieurs services pour viser la rentabilité

LE STOCKAGE PEUT RENDRE DIFFÉRENTS SERVICES À DIFFÉRENTS ENDROITS DU RÉSEAU



LE STOCKAGE COMME COMPLÉMENT AUX INVESTISSEMENTS RÉSEAU

- Ce service est à regarder au cas par cas (chaque départ est différent)
- Le stockage est l'une des options pour lever des contraintes sur un réseau (suite à une forte arrivée de productions PV)
- Le stockage ne semble pas la solution la plus économique (s'il ne rend que ce service)



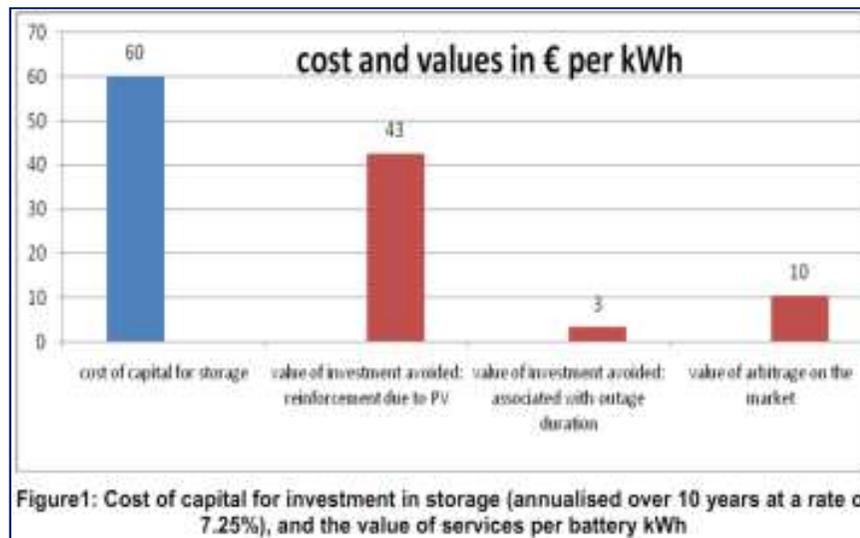
Comparaison des coûts de différentes solutions en fonction de la puissance PV raccordée

Source : Delille et al, CIRED 2013

- Mais en Italie, le GRT Terna utilise des batteries pour organiser ses renforcements des réseaux avec plus de flexibilité

LA MUTUALISATION DE DIFFÉRENTS SERVICES EST-ELLE FAISABLE ?

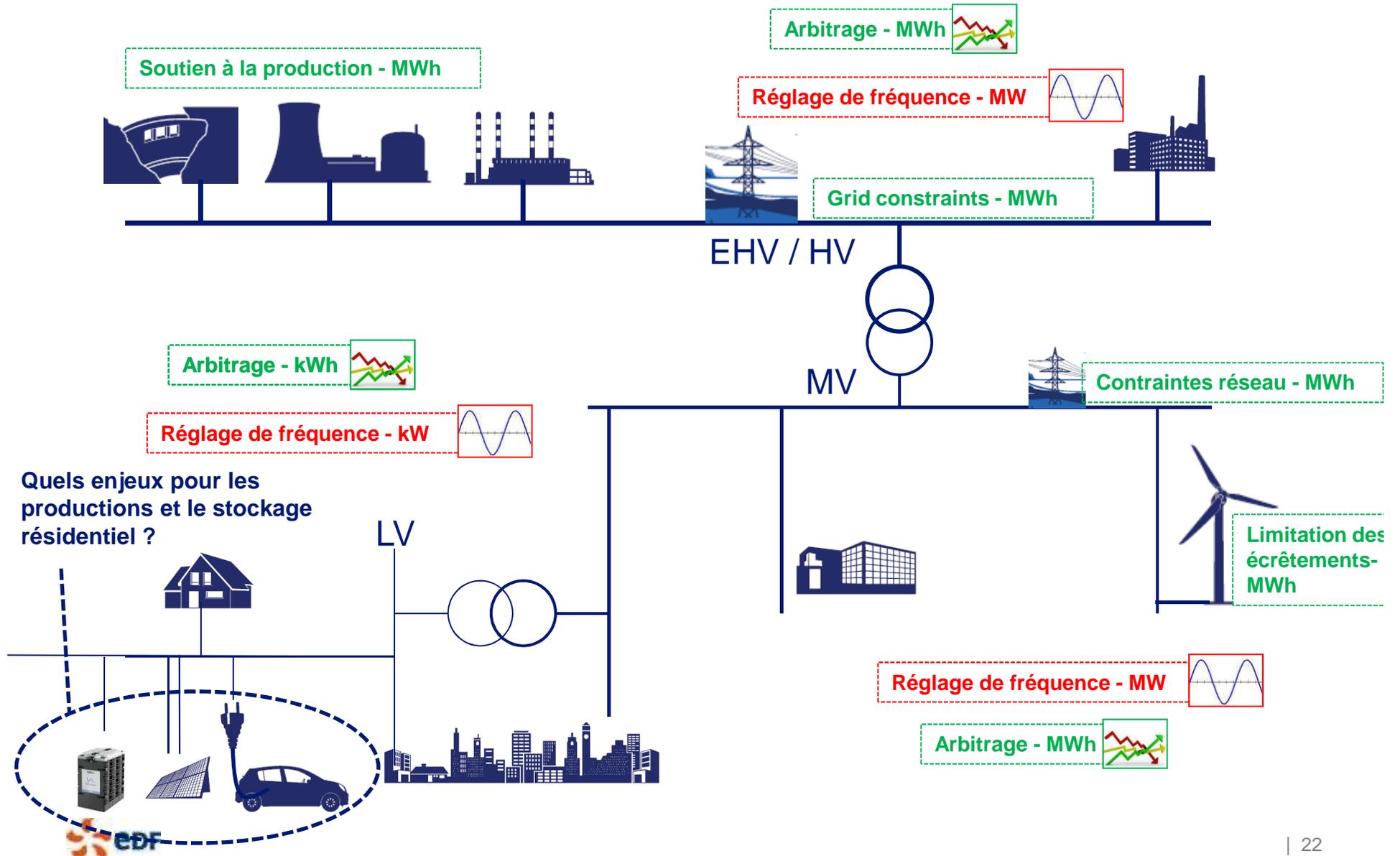
- Le point clé est de limiter les sollicitations simultanées d'un même moyen de stockage
 - Si la combinaison des services est bien choisie, les sollicitations simultanées peuvent être limitées
 - *Exemple* : lissage de tension, limitation des coupures et arbitrage



Based on Loevenbruck, CIRED 2013

- Il semble donc possible de mutualiser les services
 - Mais il faut définir un service principal – les autres services apportant moins de valeur
 - La décalage de renforcement de réseau semble un service « principal » intéressant
 - D'autres études sont nécessaires
 - En particulier, si l'on désire « utiliser » du stockage résidentiel

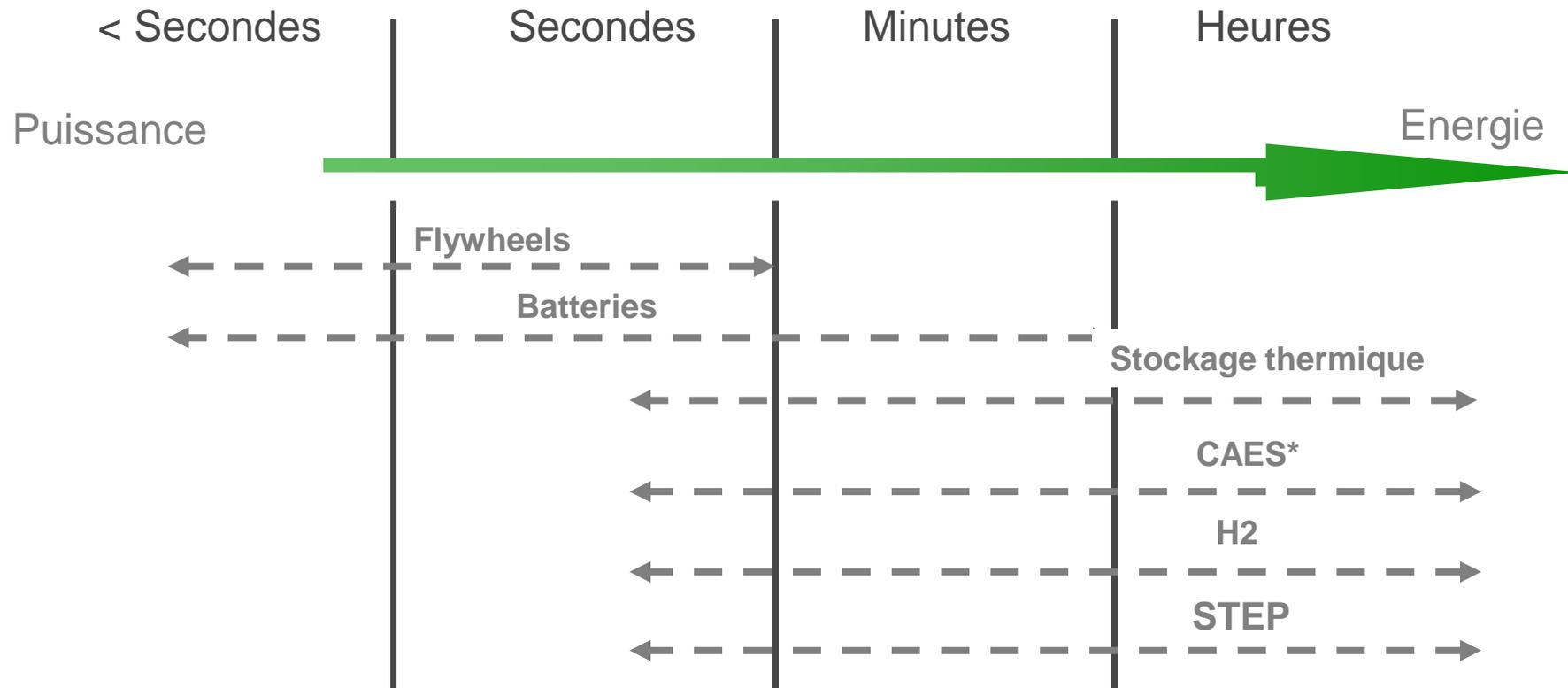
LE STOCKAGE PEUT RENDRE DIFFÉRENTS SERVICES À DIFFÉRENTS ENDROITS DU RÉSEAU



AGENDA

1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

TECHNOLOGIES DU STOCKAGE : UNE DISTINCTION ENTRE PUISSANCE ET ÉNERGIE



* CAES : Compressed Air Energy Storage

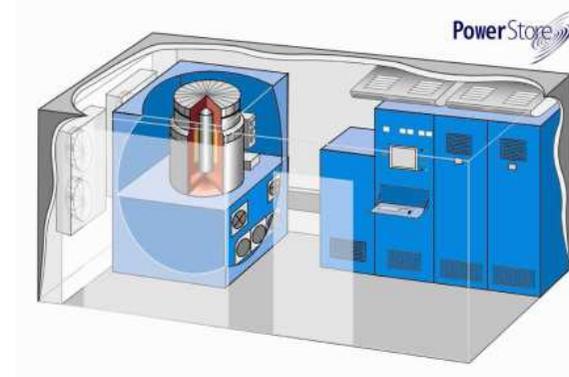
VOLANTS D'INERTIE (FLYWHEELS)

- Un volant d'inertie est une masse tournante stockant de l'énergie cinétique
 - Charge : augmentation de la vitesse de rotation / décharge : diminution
 - Energie stockable faible (~30 min max.)
 - Mais nombre de cycles très important
- Des coûts en évolution
 - Des possibles ruptures

Beacon Power (NY, U.S.A.) 20 MW / 15 min



PowerCorp (Azores) 500 kVA/30 s



Source : Sia partners

LE STOCKAGE PAR BATTERIES

- **Éléments d'une batterie**

- Assemblages d'électrodes positives et négatives entre lesquelles circulent des ions *via* un électrolyte
- La réunion de ces éléments permet de créer des batteries allant du Wh au MWh

- **Critères clés**

- **Performances** : nombre de cycles, puissance, énergie, rendement, etc.
- **Sécurité** : analyse de risque, impact environnemental
- **Coût** : CAPEX (parts énergie et puissance) & OPEX

- **Les batteries sont souvent adossées à des onduleurs pour produire du courant alternatif**

- **Système Concept Grid 1 MW–30 minutes** : batterie de 15 tonnes, onduleur de 9 tonnes, 2 containers de 15 m²



Qu'est-ce qu'une batterie?



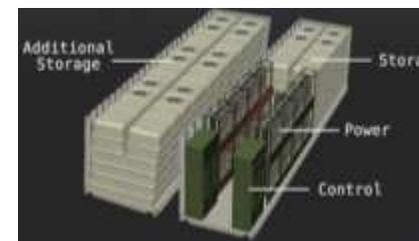
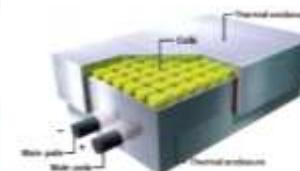
Les batteries stationnaires



Onduleur ALSTOM et batterie SAFT (1 MW – 30 minutes) installés sur Concept Grid à EDF Lab Les Renardières

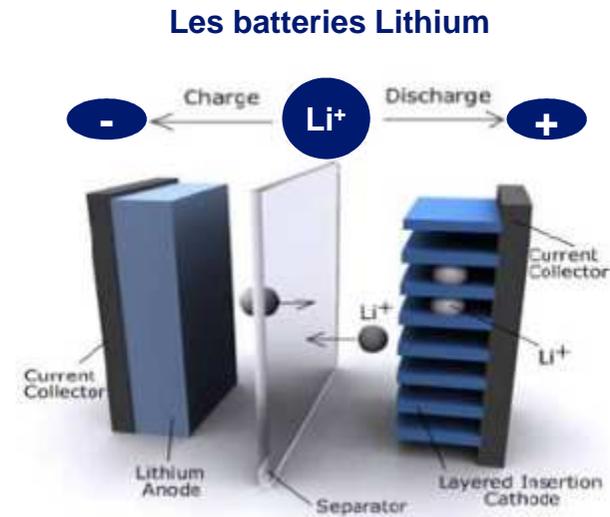
5 GRANDES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES POUR LES BATTERIES

- Les batteries au **plomb** (Pb, VRLA...)
 - Robuste et bas coût mais durée de vie limitée en cyclage
- Les batteries **alcalines** (NiCd, NiMH, NiZn, etc.)
 - Technologies robustes mais coûteuses
- Les batteries **sodium** (Zebra Na-NiCl₂, NaS)
 - Bonne cyclabilité, gros systèmes possibles
- Les batteries **lithium** (Li-ion, Li Métal Polymère)
 - Grande flexibilité de dimensionnement, bonne cyclabilité, coûts trop élevés aujourd'hui pour des applications de grande énergie
- Les batteries à **circulation** (Redox flow)
 - Design simple mais coûts élevés, encombrement important et technologies actuelles encore non matures

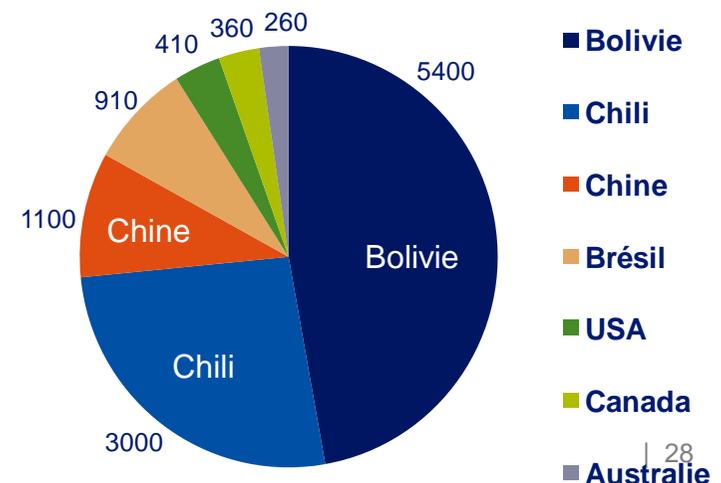


LE LI-ION TEND À S'IMPOSER COMME UNE RÉFÉRENCE

- La batterie Li-ion est commercialisée depuis 1992 : elle est aujourd'hui une technologie de référence
- **Après le téléphone portable, le Li-ion s'impose pour la mobilité électrique**
 - Il est aussi de plus en plus présent sur le marché stationnaire, notamment pour les usages en puissance
- **Avantages / inconvénients**
 - Densité énergétique élevée, bonne cyclabilité, rendement élevé (90 % pour Li-ion, 75-80 % pour les autres types de batteries)
 - Avancées technologiques importantes
 - Pas de contrainte limitante liée à la disponibilité des matériaux
 - Coût encore élevé pour les applications d'énergie

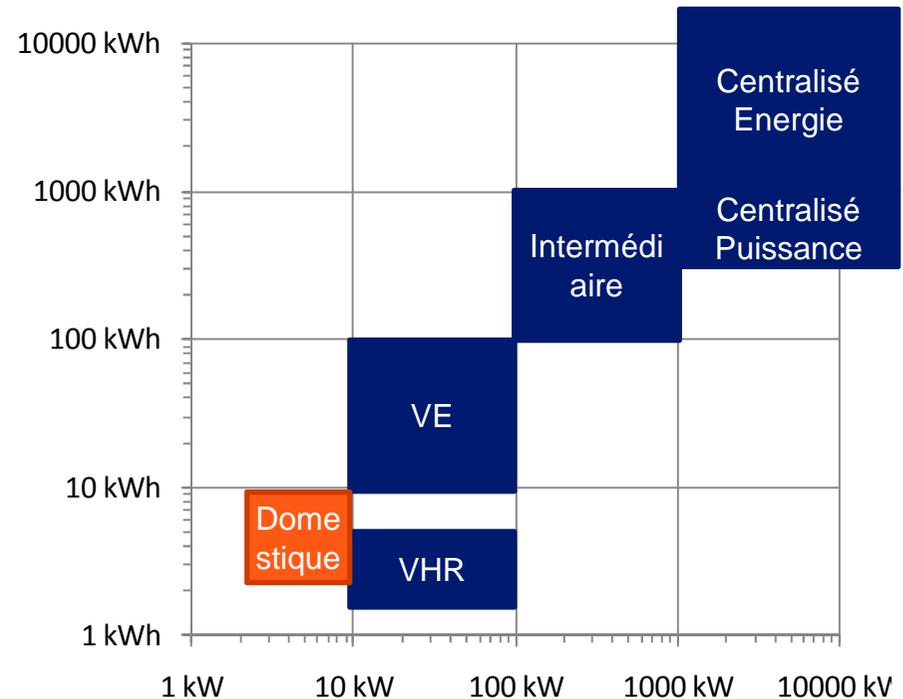


~12 000 kt de réserves de Lithium, équivalent à 5 milliards de packs de VE

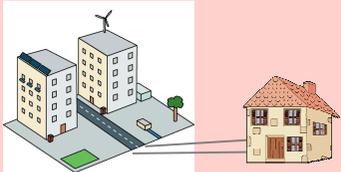


STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE : SEGMENTATION EN 5 FAMILLES D'USAGES

- **Domestique : Stockage décentralisé**
 - Taille typique: **3kW – 10kWh**
 - Usage domestique : intégration PV, back-up, optimisation de consommation.
- **VE/VHR: Batteries pour les véhicules**
 - Taille typique: **60kW – 20 kWh pour VE**
60kW – 6 kWh pour VHR
- **Stockage « intermédiaire »**
 - Taille typique: **100 kW – 300 kWh**
 - Applications en distribution (smart-grid, report d'investissement ou intégration d'enr en site isolés)
- **Stockage centralisé pour des applications puissance**
 - Taille typique: **1 MW – 750 kWh**
 - Dédié aux applications sur le réseau de transport : fréquence, tension
- **Stockage centralisé pour des application énergie**
 - Taille typique: **1 MW – 6 MWh**
 - Applications de type transfert d'énergie : arbitrage, soutien au réseau...



EDF R&D MÈNE DES RECHERCHES SUR LES BATTERIES DU FUTUR AFIN DE LEVER LES FREINS

	Aujourd'hui	Les perspectives R&D sur les batteries du futur
L'autonomie (VE) 	80 - 160 km	> 500 km grâce à une densité d'énergie théorique potentiellement élevée
Le coût (VE) 	50% du prix de VE	Des baisses de coûts importantes car les matériaux visés sont abondants
L'empreinte écologique 	Recyclage, pollution	Recyclage plus facile, pas de matériau nuisible à l'environnement
La sécurité 	Incendie, toxicité	Non inflammable, pas de produit toxique

- EDF est moteur dans le développement de trois technologies :
 - Zinc-air rechargeable** / Lithium-air aqueux rechargeable / La batterie Fer 3D
- Des travaux de laboratoire, pas de commercialisation avant nombreuses années



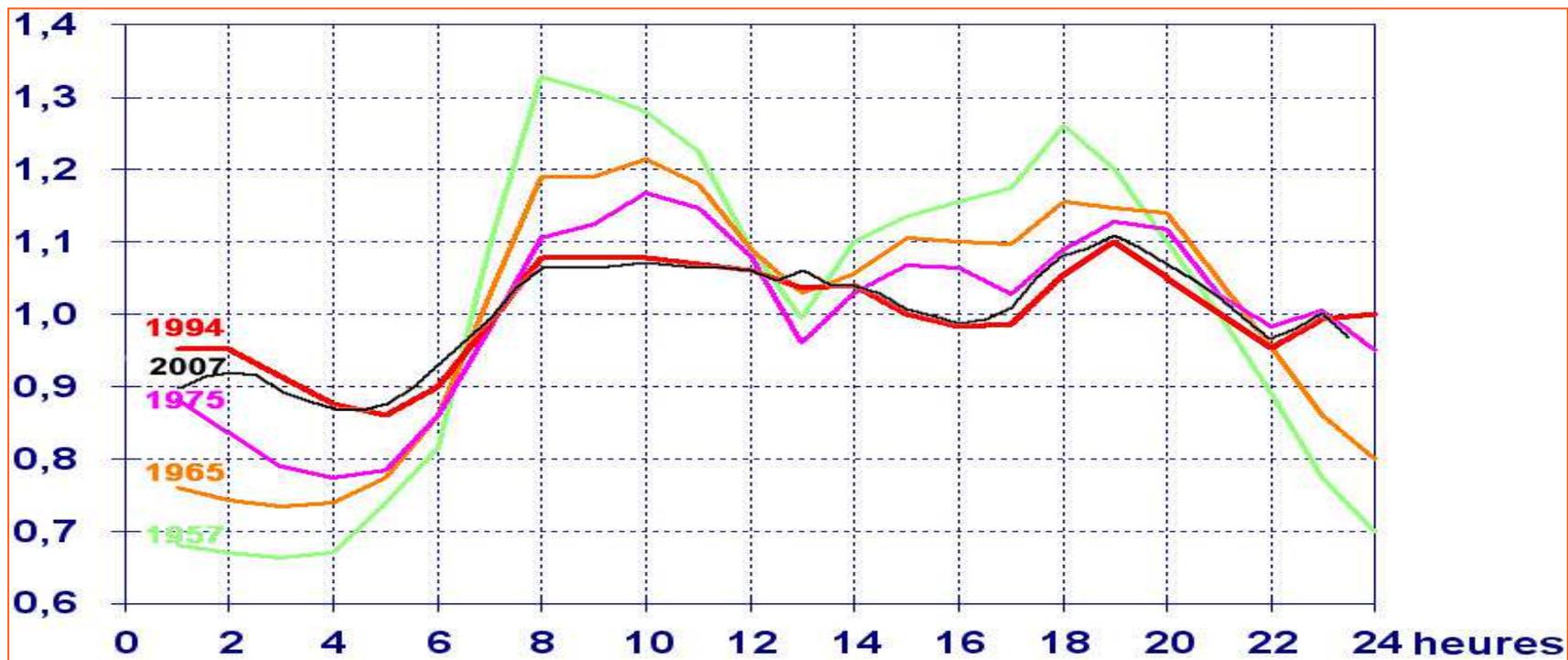
→ EDF prépare l'après Li-ion

Li-air : première démonstration d'une Li-air rechargeable.
100 mAh/cm²
(première mondiale)



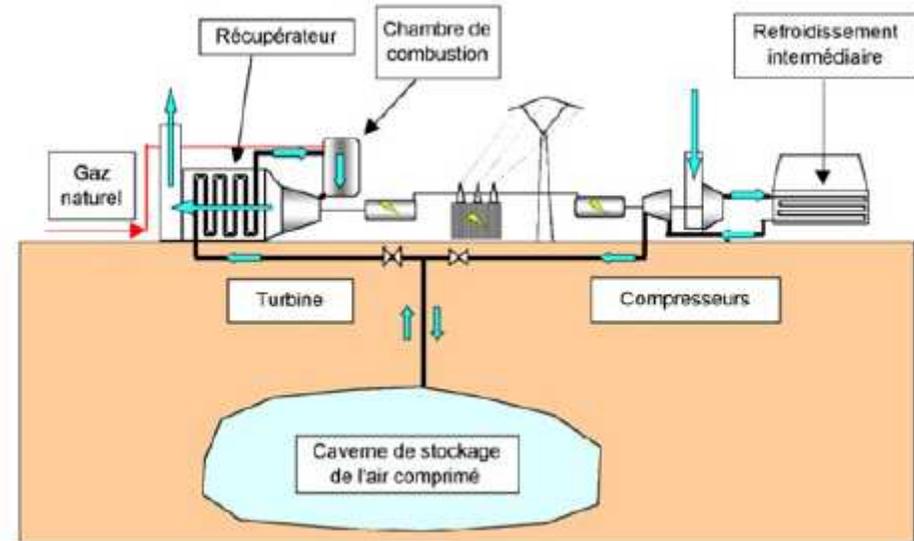
LES CHAUFFE-EAU SONT UN MOYEN EFFICACE DE STOCKAGE D'ENERGIE EN FRANCE

- Depuis les années 60, 11 millions de chauffe-eau ont été installés en France, ce qui représente une consommation annuelle de 20 TWh.
- Ces chauffe-eau sont pilotés de façon à contribuer au lissage de la courbe de consommation nationale (le chauffage de l'eau se fait en effet durant les heures creuses)
 - Dans les années 60, le rapport des consommations pointe/creux était de 1,6 alors qu'aujourd'hui, il n'est plus que de 1,3



LE STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ (CAES)

- Charge = compression de l'air / Decharge = décompression
- Couplé à une TAC ou à un stockage de chaleur
- 2 centrales existantes depuis plusieurs années :
 - En Allemagne : 290 MW
 - Aux USA : 110 MW
- Nécessité des cavités importantes (hors technologies récentes)
- Des évolutions technologiques possibles (micro CAES, stockage de chaleur, etc.)



Source : CRE

EN ALLEMAGNE, L'HYDROGÈNE (H₂), UN DÉBOUCHÉ POUR LA GESTION DES ENR FATALES ?

- **L'H₂ est très majoritairement produit à partir d'hydrocarbures (vaporeformage)**
 - L'H₂ produit par électrolyse représente moins de 5 %.
- **L'H₂ a différents débouchés :**
 - Industrie (chimie, ...)
 - Transformation en méthanol et injection réseau gaz
 - Injection directe dans les réseaux de gaz (transport ou distribution)
 - Automobile (moteur Pile à combustible)
 - Production de carburant de synthèse
 - Production d'électricité (rendement ~30%)
- **L'Allemagne est aux avant-postes sur le « Power To Gas »**
- **La mobilité hydrogène semble un débouché intéressant, en complément aux batteries**
 - Véhicules piles à combustibles (pour le haut de gamme ou le transport collectif)
- **H₂ par électrolyse "hors jeu" pour la réutilisation dans l'électricité : rendements finaux liés à la restitution électrique (~30%) trop faibles**

LES STEP, UNE TECHNOLOGIE ÉPROUVÉE AU DÉVELOPPEMENT INCERTAIN EN EUROPE

- 6 STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) sont en service en France. Une 7ème STEP, « Lac Noir », est en cours de réhabilitation.
- Ces moyens de stockage ont été construits dans années 70 et 80 dans le but d'optimiser la production nucléaire en « déplaçant » de l'énergie des creux vers les pointes



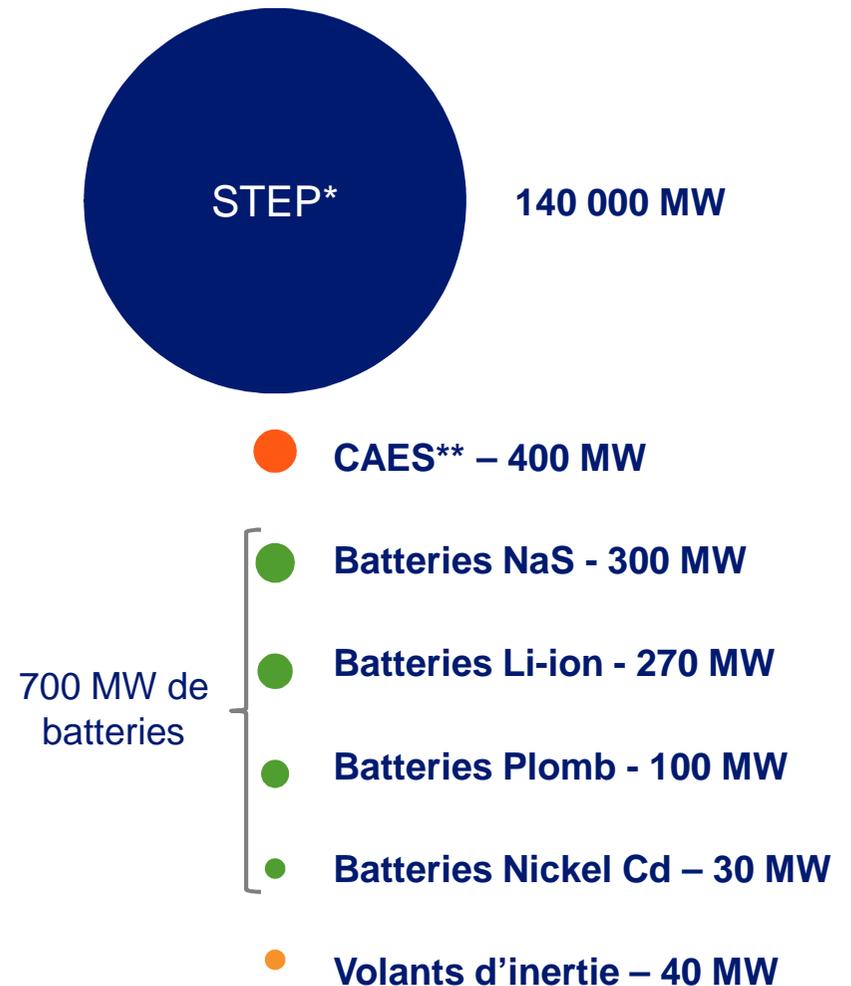
Carte des STEP EDF en France métropolitaine

- Les conditions actuelles rendent difficile la rentabilité de nouvelles STEPs en Europe
 - Des projets gelés ou arrêtés
 - Trouver de nouvelles sources de rentabilité (rémunération de la capacité, ...)
- Dans les territoires insulaires, les STEP « marines » pourraient être une solution mais les coûts restent aujourd'hui trop importants
- En Chine, 13 GW de STEP actuellement en construction.

LE STOCKAGE DANS LE MONDE

- **Plus de 140 GW de stockage par pompage en exploitation dans le monde**
 - 40 GW en Europe, + 5 GW en construction
 - 4 GW en France
 - 22 GW en Chine, + 13 GW en construction
- **700 MW de batteries**
 - 250 MW aux USA
 - 300 MW de NaS au Japon depuis 1995-2000

Capacités de stockage dans le monde à fin 2014



QUELS COÛTS ET QUELLES MATURITÉS ?

- Des hypothèses de coûts qui restent élevées
- Des niveaux de maturité très divers

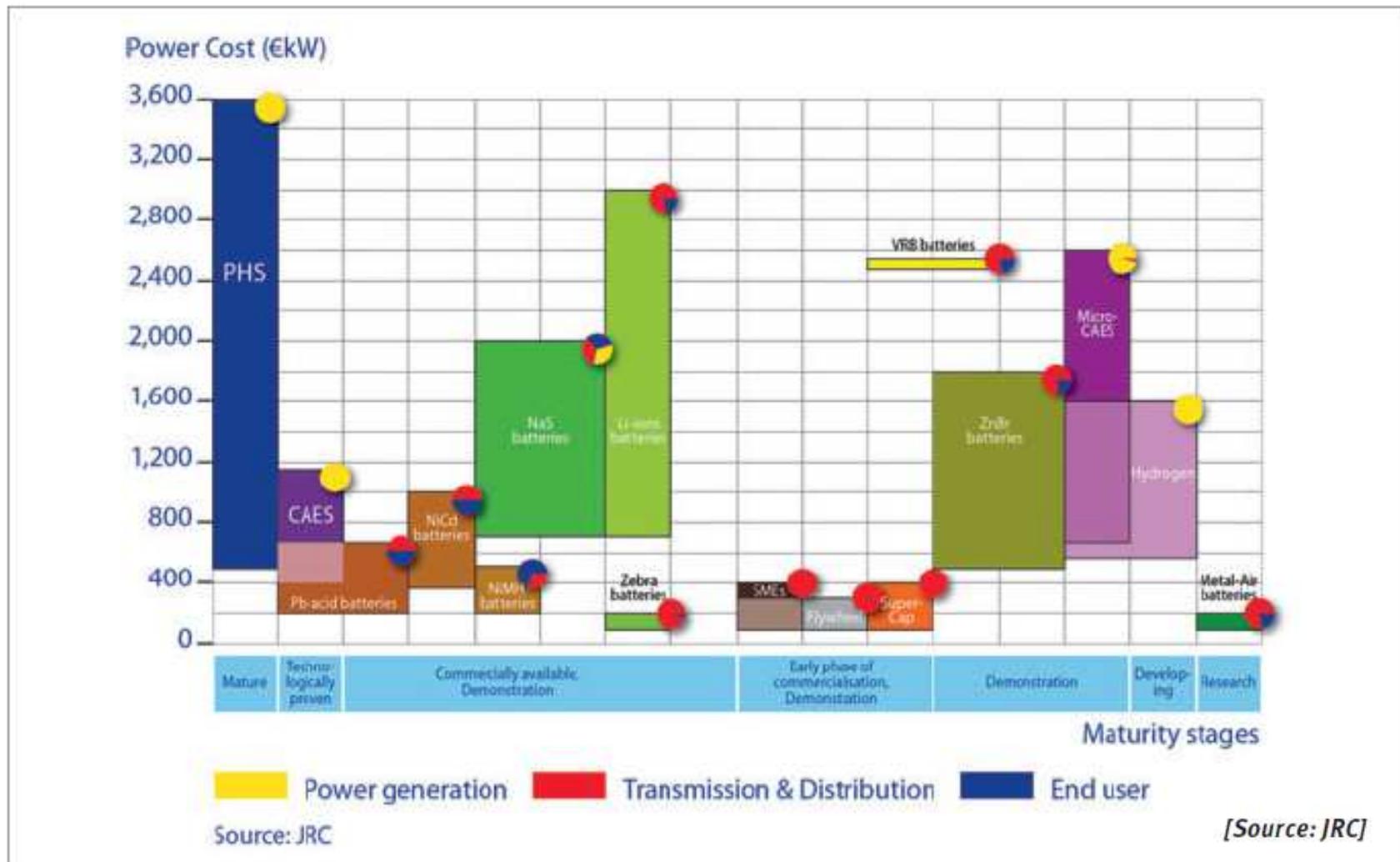
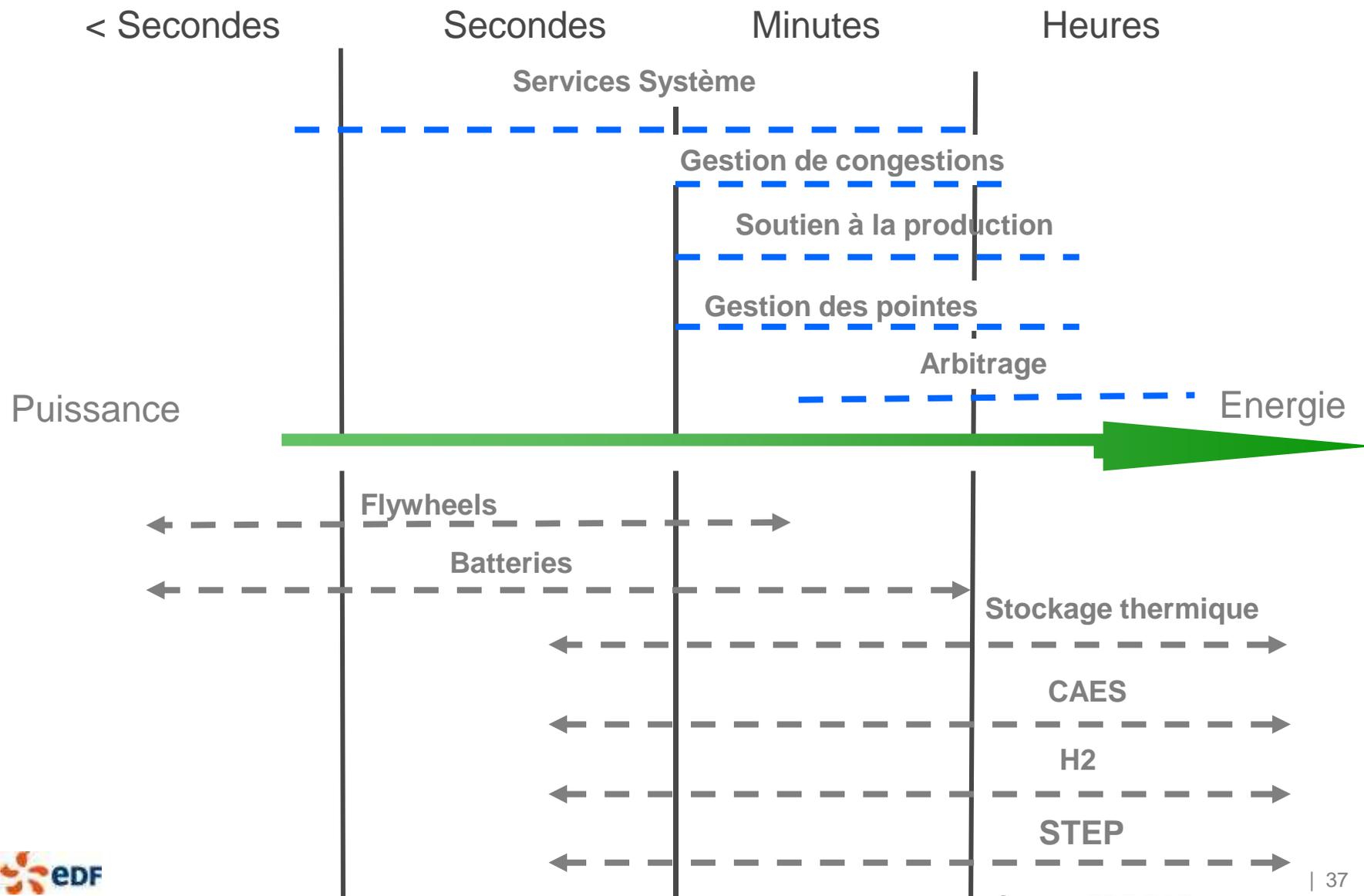


Figure 16.1: Power storage technologies as a function of their cost and development stage

CROISEMENT SERVICES / TECHNOLOGIES DU STOCKAGE

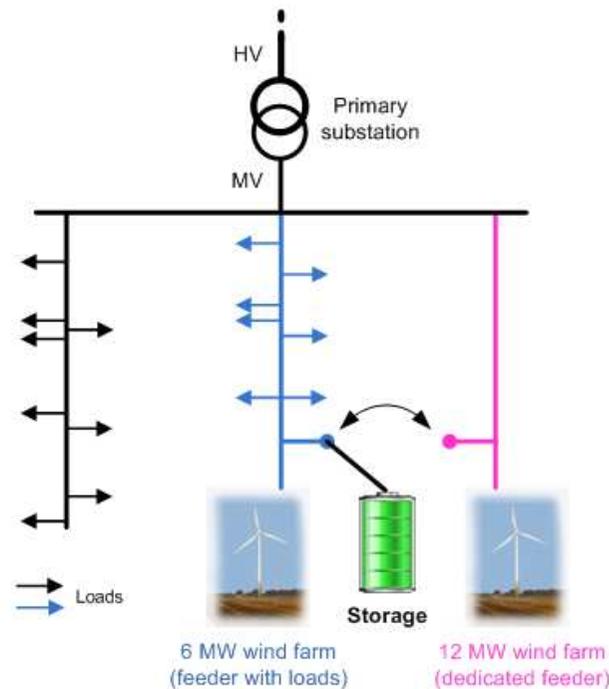


AGENDA

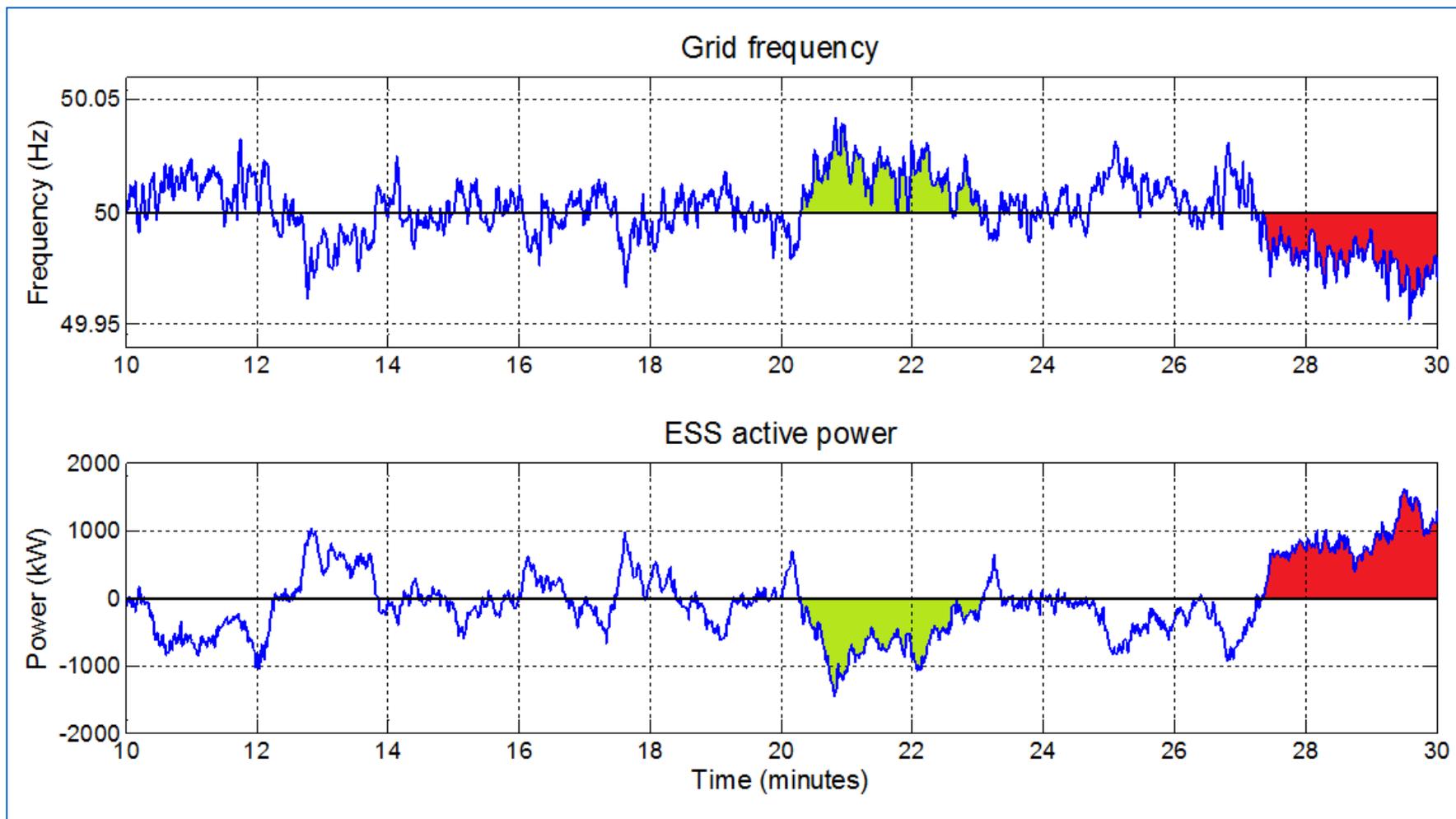
1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

VENTEEA : TEST D'UNE BATTERIE MULTISERVICES

- VENTEEA : démonstrateur mené par ERDF dans l'Aube.
- L'un des objectifs de VENTEEA est de démontrer la possibilité d'utiliser un même moyen de stockage distribué pour plusieurs services.
- La batterie Li-Ion « 2 MW / 1.3 MWh » a été inaugurée le 5 juin 2015.
- Les services testés dans VENTEEA :
 - Réglage de fréquence.
 - Réglage de tension.
 - Lissage de production éolienne.
 - Arbitrage
 - Etc.



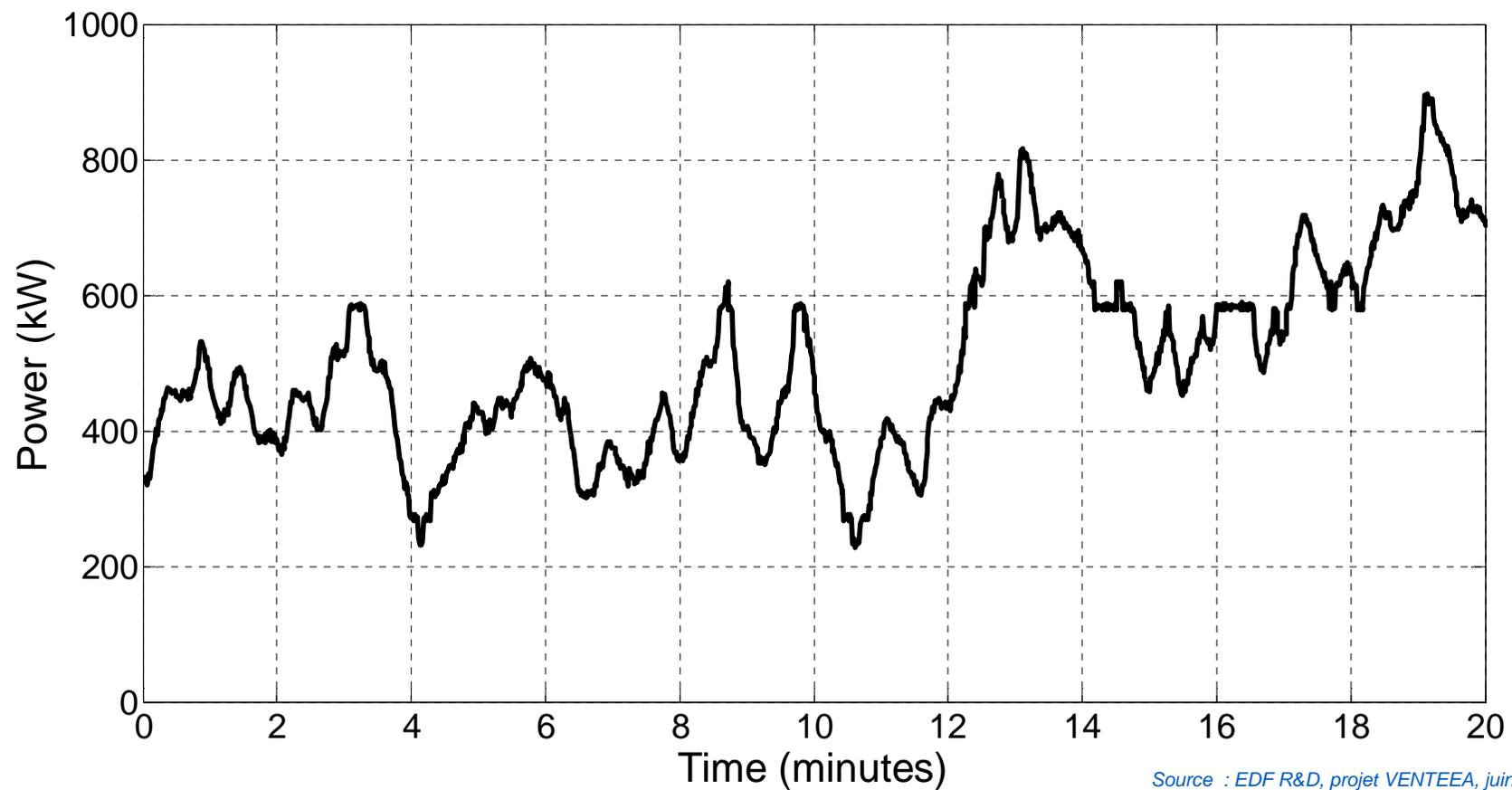
VENTEEA : UTILISATION DU STOCKAGE POUR LA RÉGULATION DE FRÉQUENCE



Source : EDF R&D, projet VENTEEA, juin 2015

VENTEEA : UTILISATION DU STOCKAGE POUR LE LISSAGE DE PRODUCTION ÉOLIENNE

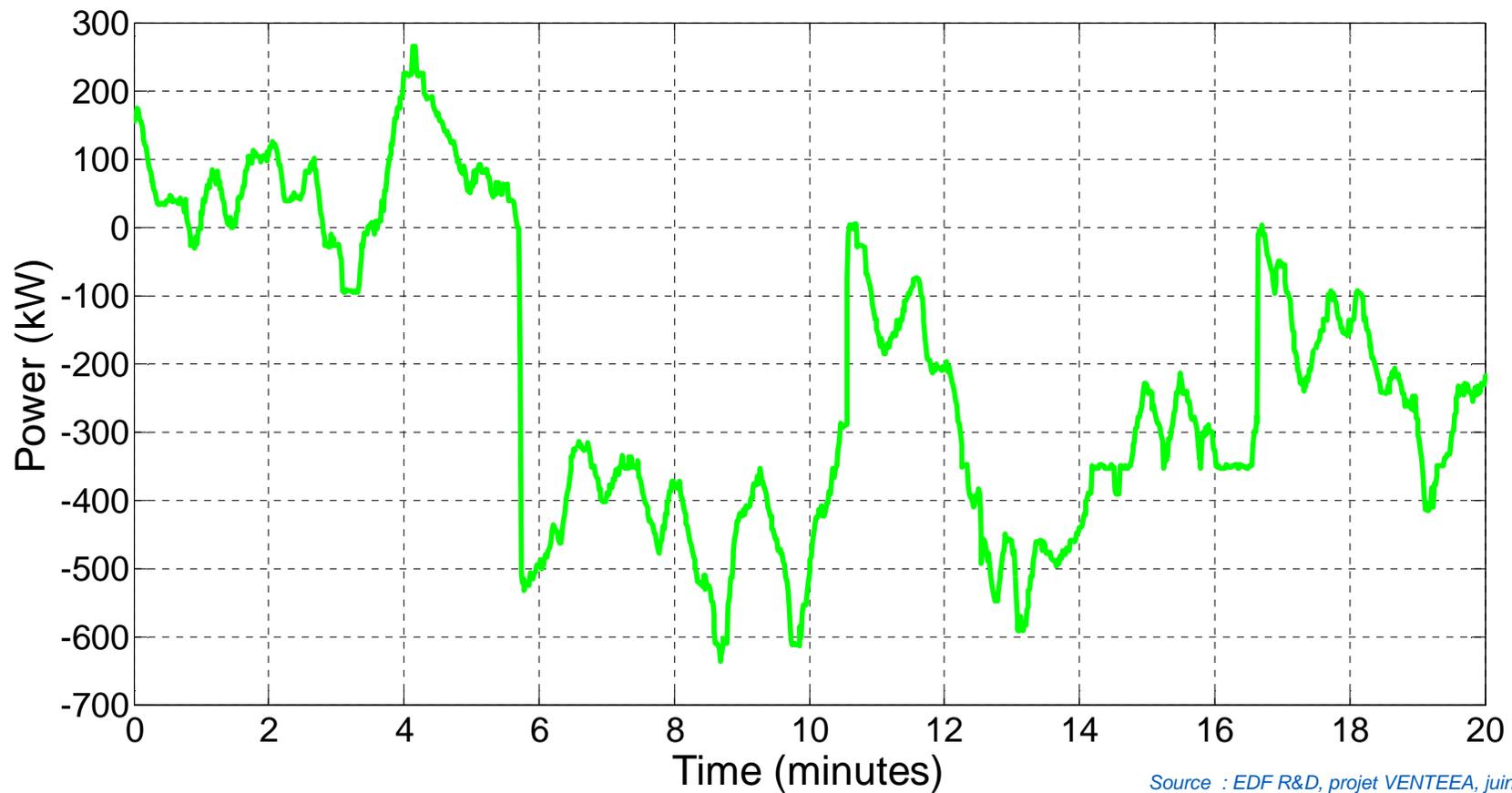
Production éolienne



Source : EDF R&D, projet VENTEEA, juin 2015

VENTEEA : UTILISATION DU STOCKAGE POUR LA RÉGULATION DE FRÉQUENCE

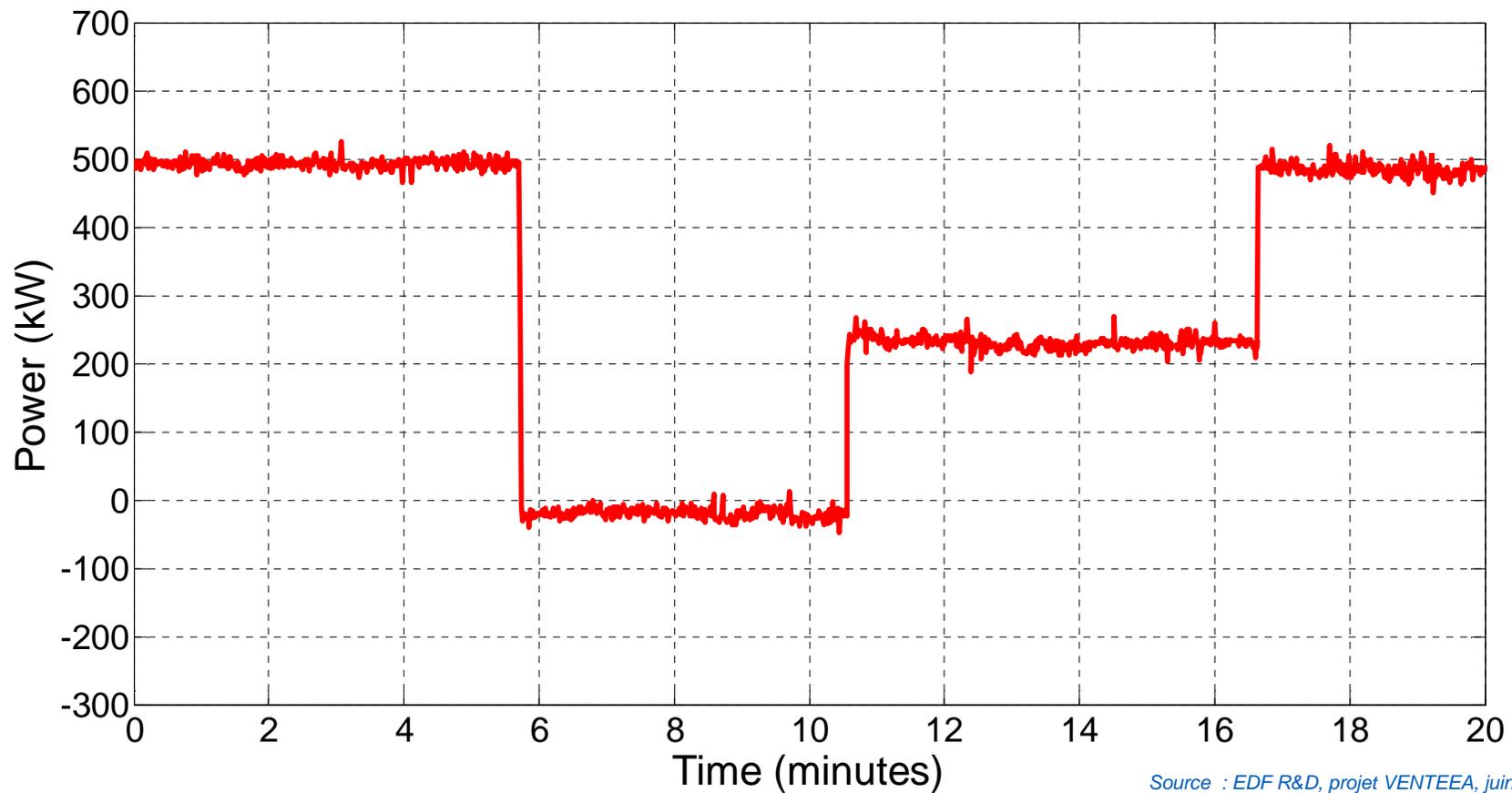
« Action » de la batterie



Source : EDF R&D, projet VENTEEA, juin 2015

VENTEEA : UTILISATION DU STOCKAGE POUR LE LISSAGE DE PRODUCTION ÉOLIENNE

Combinaison de la production éolienne et du stockage/déstockage de la batterie



Source : EDF R&D, projet VENTEEA, juin 2015

AGENDA

1. UN BESOIN CROISSANT DE FLEXIBILITÉ DANS LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES
2. LES RÔLES POSSIBLES DU STOCKAGE
3. PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE
4. EXEMPLE D'UN DÉMONSTRATEUR : VENTEEA
5. CONCLUSION

QUEL AVENIR POUR LE STOCKAGE ?

- **Pour évaluer le rôle du stockage dans le système électrique du futur, il faut :**
 - Déterminer les applications du stockage, leur potentiel et les revenus associés.
 - Etablir un *merit order* des technologies du stockage.
- **En terme de technologie, les STEP resteront probablement prédominantes.**
- **Le développement de la mobilité électrique et des smart grids pourraient donner un rôle majeur aux batteries.**

MERCI