

# Stockage d'énergie: Attributs et applications

Prof. Dr. Fabrizio Sossan (HES-SO Valais-Wallis)  
[fabrizio.sossan@hevs.ch](mailto:fabrizio.sossan@hevs.ch)

Slides compiled on: September 18, 2024

Slides available at:

<https://shorturl.at/pAago>

# Stockage d'énergie et attributs de stockage d'énergie

Le stockage d'énergie (bidirectionnel) fait référence à une technologie capable de convertir l'électricité en une forme d'énergie stockable et de reconvertir cette énergie stockée en électricité.

## Propriétés technologiques

- Densité de puissance et d'énergie
- Rendement aller-retour (rapport entre l'énergie produite et l'énergie consommée)
- Temps de réponse et taux de montée en puissance (kW/sec)
- Vieillissement (deux dimensions : cycle et calendrier)
- Puissance de décharge/charge

## Autres attributs importants

- Coût
- Scalability (taille maximale d'un appareil, capability of being reproduced)
- Impact environnemental et cycle de vie

# Puissance et densité énergétique : diagramme Ragone

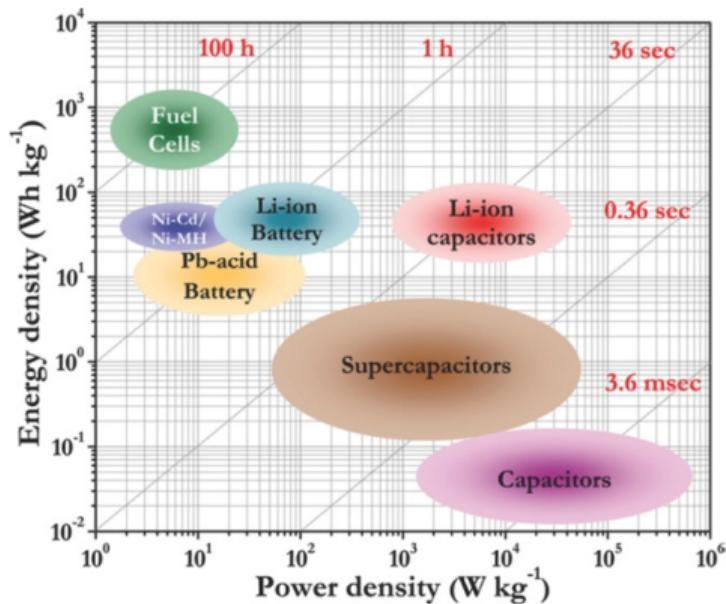


Figure: Ragone chart, Aravindan et al. (2014), Insertion-type electrodes for nonaqueous Li-ion capacitors. Chemical reviews.

Gasoline: 13 kW/kg; Amprium lithium-ions energy cells: 0.45 kW/kg.

# Puissance spatiale et densité énergétique des sources de production

La densité spatiale de l'énergie hydroélectrique est définie comme la capacité de production d'énergie installée sur la surface inondée. Les valeurs sont comprises entre 0,008 W/m<sup>2</sup> et 0,87 W/m<sup>2</sup> (Van Zalk et al. (2018), The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S.).

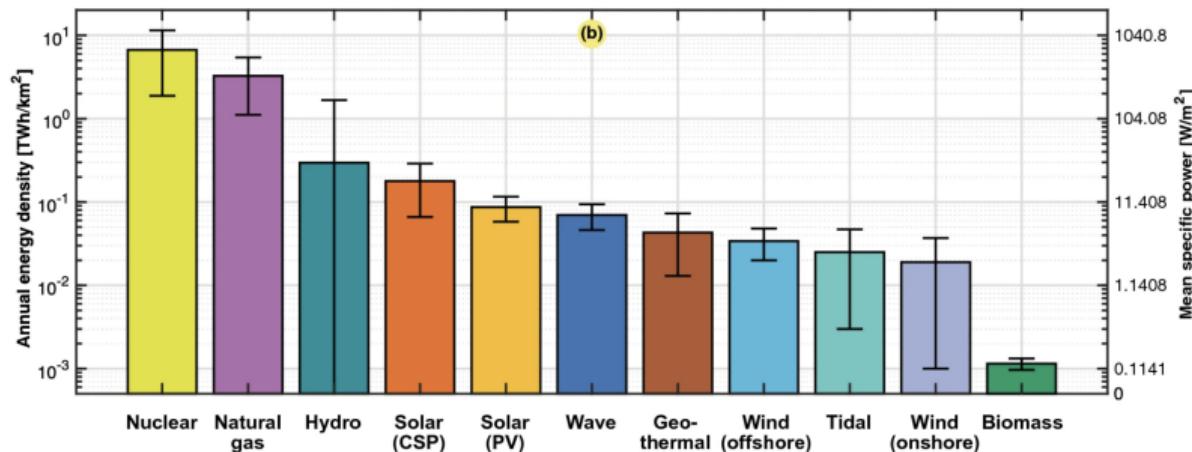


Figure: Average and standard deviation values of the annual energy and power density in log scale of various sources. Nøland et al (2022). Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide. Sci Rep.

# Projections des coûts du stockage d'énergie

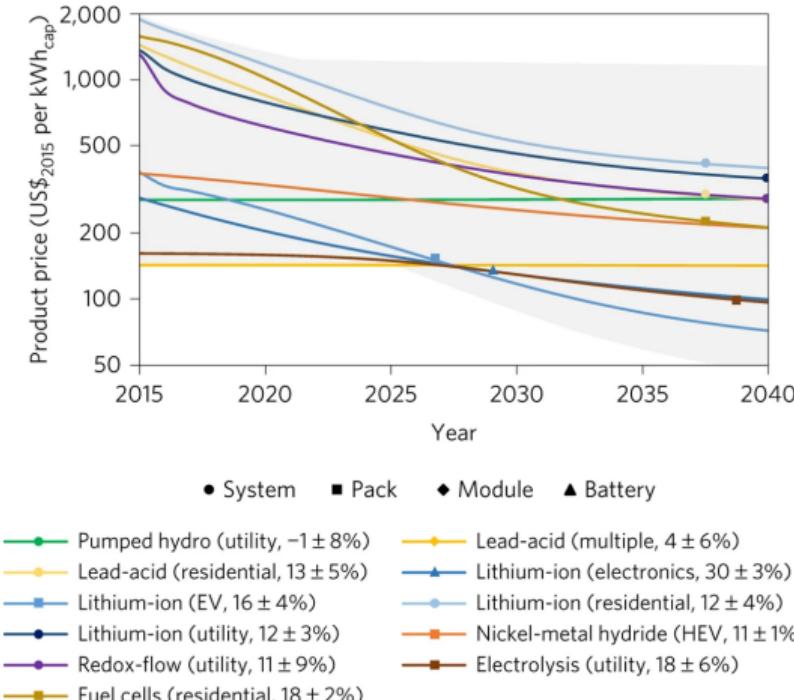


Figure: Projections des coûts du stockage d'énergie basées sur les taux d'expérience. Schmidt et al. (2017). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. Nature Energy.

# Coûts actuels des cellules et modules lithium-ion

Figure 1: Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013-2023



Source: BloombergNEF. Historical prices have been updated to reflect real 2023 dollars. Weighted average survey value includes 303 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles, and stationary storage.

Figure: Les prix historiques ont été mis à jour pour refléter les dollars américains réels de 2023. La valeur moyenne pondérée de l'enquête comprend 303 points de données sur les voitures particulières, les bus, les véhicules commerciaux et le stockage stationnaire. BloombergNEF (2023).

# Round-trip efficiency

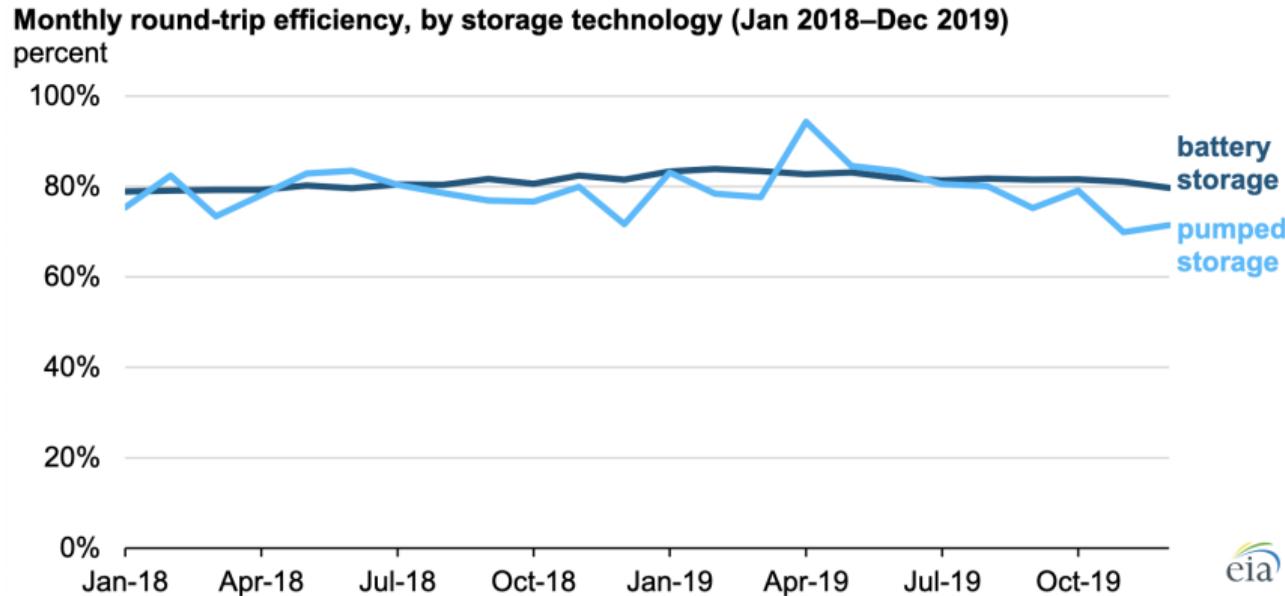


Figure: U.S. Energy Information Administration.

## Round-trip efficiency (cont'd)

Some more evidence:

- Lithium-ion: 83%
- Pumped hydro 81%
- Vanadium redox flow: 75%
- Sodium sulfur: 75%
- Advanced lead-acid: 85%
- Flywheel: 81%.
- Compressed air: 50%
- Electrolysis + Fuel cell: 40%

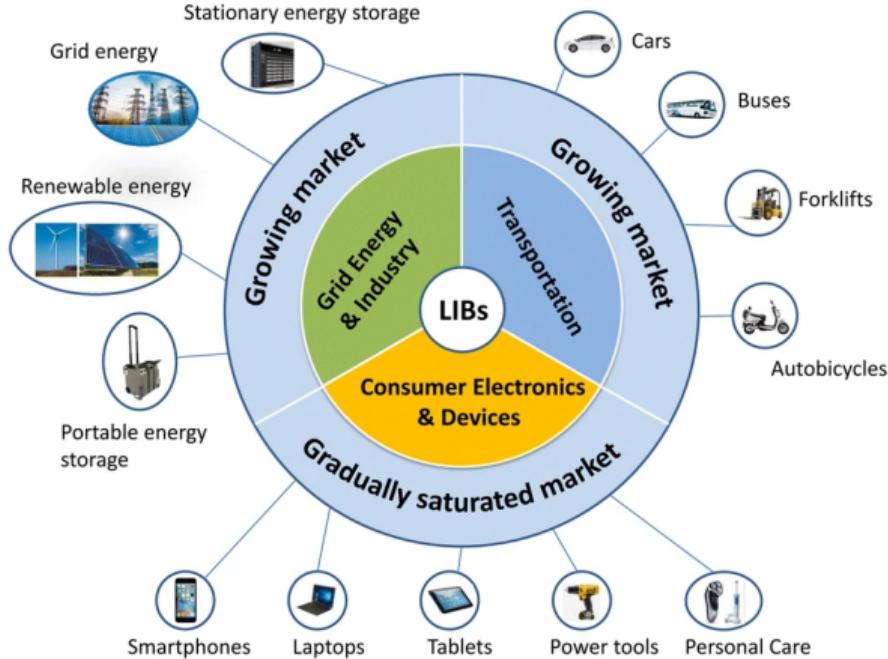
Various references: W.G. Manuel (2014) Energy Storage Study 2014, V. Viswanathan et al. (2013), National Assessment of Energy Storage for Grid, IEC (2011), Electrical Energy Storage: White Paper, IEC (2011), Electrical Energy Storage: White Paper, Headley et al. (2022) Chapter 11: Hydrogen Energy Storage.

## Closing remarks

- Taux de montée en puissance. Exemples de chiffres : Hydroélectricité : 20% de la puissance nominale par minute (constante de temps mécanique et eau ...) ; batteries : 10 fois la puissance nominale par seconde.
- Vieillissement. Exemples de chiffres : Hydroélectricité : la durée de vie calendaire est d'environ 50 ans ; batteries : la durée de vie calendaire est d'environ 20 ans.
- L'analyse environnementale et du cycle de vie (ACV) sont des sujets vastes (non abordés dans ce cours). Par exemple, les technologies lithium-ion suscitent des préoccupations environnementales et sociales en raison de l'utilisation de terres rares ou de leur extraction dans des pays du tiers monde où les conditions de travail sont mauvaises. Une grande partie de la complexité de l'ACV réside dans le fait que la quantification des avantages du stockage d'énergie dans les applications de systèmes électriques est difficile en raison des interactions complexes dans un système interconnecté au réseau électrique. Les technologies émergentes, telles que les cellules sodium-ions, offrent de nouvelles perspectives sur ces questions.
- Cette discussion a couvert les principales technologies de stockage d'énergie actuellement les plus prometteuses et n'est pas exhaustive ; il pourrait y en avoir d'autres (par exemple, le stockage gravitationnel avec des grues).

# Energy storage applications

# Applications of energy storage (batteries)



Y. Ding et al. (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochem. Energ. Rev.*

## Power systems crash course: Qu'est-ce qu'un réseau électrique ?

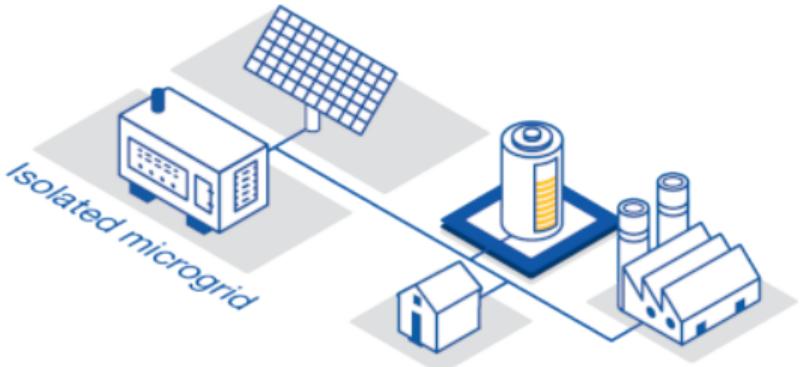
Un réseau électrique est un ensemble d'actifs, de technologies et de procédures opérationnelles visant à fournir de l'énergie électrique :

- de manière fiable (en continu et sans problème)
- résilient (s'il y a un problème, il peut être résolu)
- à bon marché
- à tous les endroits

Les réseaux électriques sont une infrastructure essentielle dont dépendent de nombreux autres services (hôpitaux, transports, etc.)

Les réseaux électriques sont probablement l'infrastructure la plus vaste, la plus complexe et la plus critique que les humains ont créée et exploitée

# Geographical extension of power systems



From microgrids (rural areas far from a public grid connection) ...



... to large interconnected grids (a portion of the European grid).

# Structure du réseau électrique



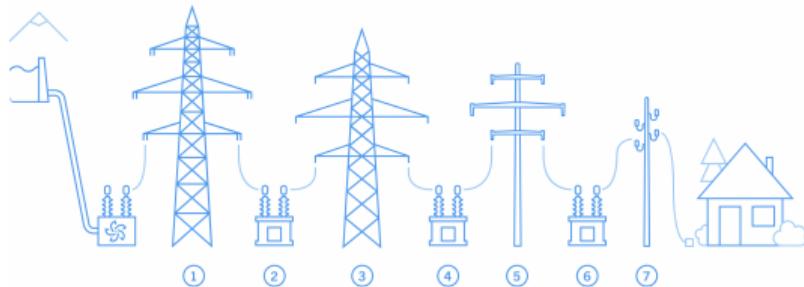
Les centrales électriques produisent de l'électricité en convertissant une source d'énergie locale

Les lignes de transmission transportent l'électricité sur de longues distances (haute ou très haute tension)

Les lignes de distribution fournissent de l'électricité aux consommateurs finaux (moyenne et basse tension)

Les consommateurs industriels, résidentiels et commerciaux utilisent l'électricité

# Swissgrid grid levels



## Transmission lines (lignes de transport)

- Level 1: The 380 kV or 220 kV electricity flows into the transmission grid from the power plants and from abroad → extra-high-voltage level
- Level 3: between 36 kV and 150 kV → high-voltage level

## Distribution lines (lignes de distribution)

- Level 5: between 1 kV and 36 kV → medium-voltage level
- Level 7: below 1 kV → low-voltage level. Voltage at which the electricity reaches the customers.

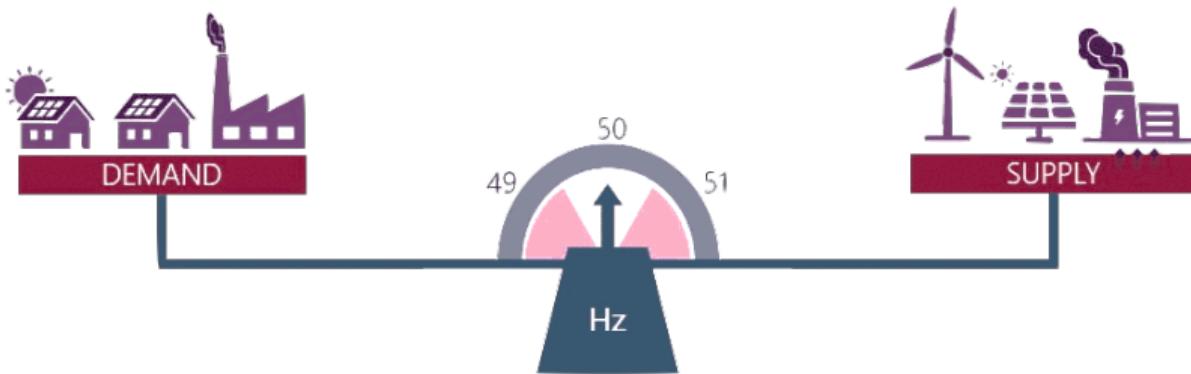
Levels 2, 4, 6 are transformers.

## Exigences opérationnelles

Deux catégories d'exigences opérationnelles :

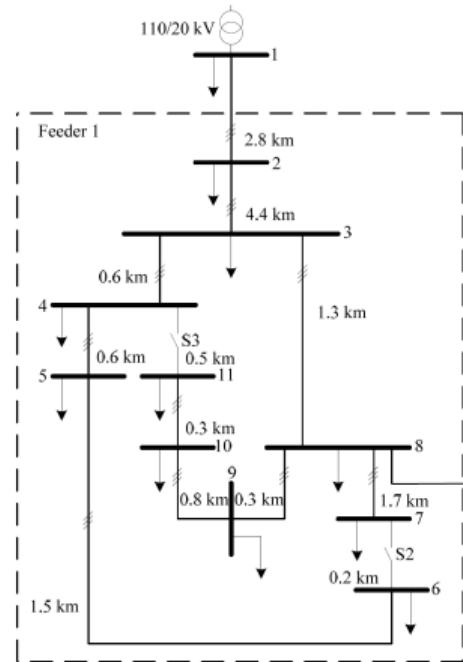
- Équilibrage du réseau
- Performances du réseau

## Exigences opérationnelles : Équilibrage du réseau



- L'électricité produite doit être égale à la demande d'électricité à tout moment
- La fréquence du réseau (c'est-à-dire les vitesses de rotation des générateurs synchronisés) est un indicateur des déséquilibres entre la production et la demande sur le réseau
- Réalisé en maintenant la fréquence du réseau proche de la valeur nominale (par exemple, 50 Hz)

# Operational requirements: Network Performance



- Les niveaux de tension doivent être dans les limites spécifiées à tous les niveaux du réseau
- Le courant dans les lignes et les transformateurs doit être inférieur aux valeurs nominales

# Power systems crash course: Vertically unbundling in power systems

La séparation verticale fait référence à la séparation des rôles opérationnels entre différentes entreprises en fonction du niveau fonctionnel du réseau. En Europe, la division suivante existe généralement :

- Sociétés de production : responsables de la production d'électricité ; Exploitation et maintenance (O&M) des centrales électriques - qui peuvent parfois être sous-traitées.
- Gestionnaires de réseau de transport (GRT) : O&M des lignes de transport ; responsables de maintenir le système global stable et fonctionnel, et de fournir de l'électricité aux sous-stations primaires ;
- Gestionnaires de réseau de distribution (GRD) : O&M des lignes de distribution ; responsables de la fourniture d'électricité aux consommateurs sur le réseau moyenne et basse tension.

La séparation verticale n'est pas mise en oeuvre partout. Par exemple, la notion de "utility" (une entreprise qui intègre toutes les fonctions ci-dessus pour une certaine région) est plus courante.

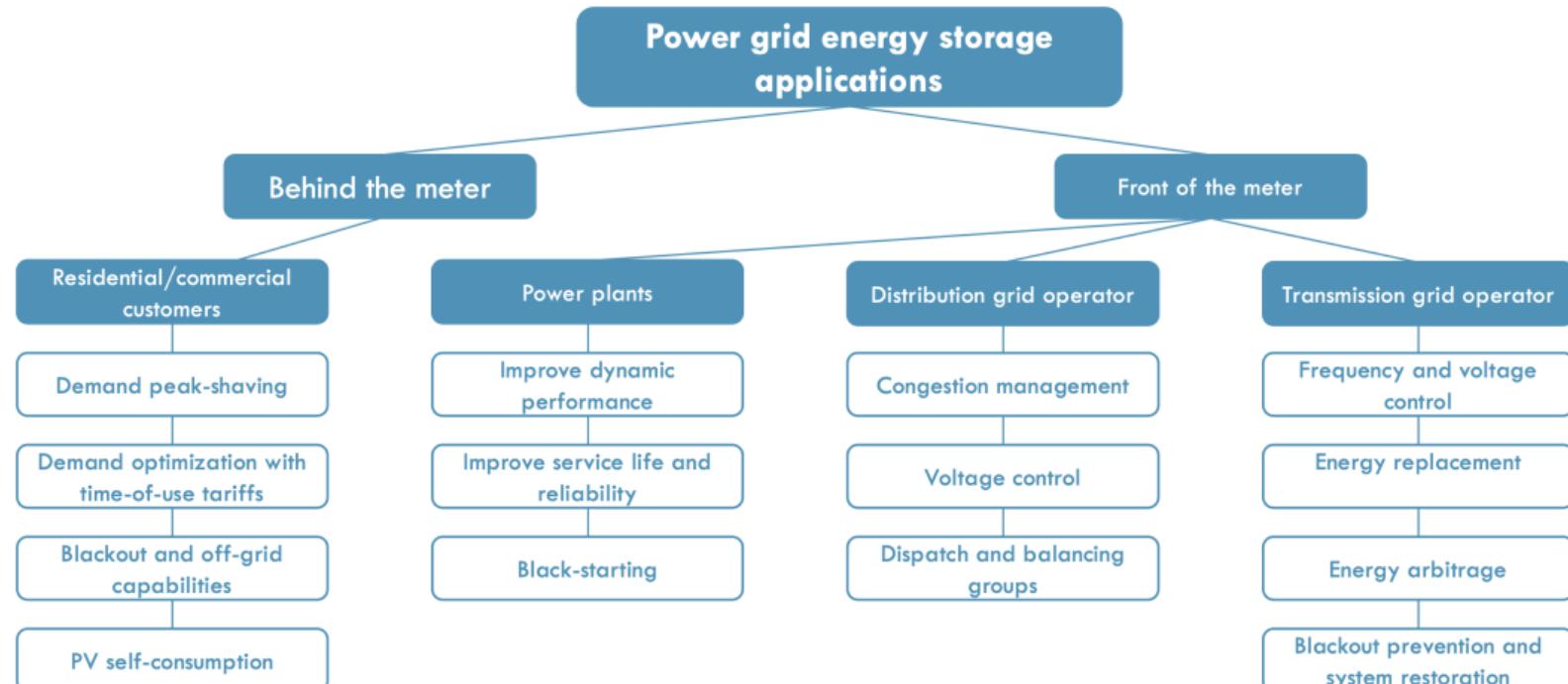
Autres entités qui méritent d'être mentionnées et qui ne sont pas liées au dégroupage vertical :

- Les opérateurs des marchés de l'électricité et les détaillants d'électricité (liés à la libéralisation des marchés de l'électricité ≠ dégroupage vertical)
- (trivial) Les consommateurs, comme cela a toujours été le cas, utilisent l'électricité à leurs propres fins (par exemple, usages résidentiels, conversion d'énergie et travail dans l'industrie).

Comme nous le verrons, les entités ci-dessus ont une compréhension et des interprétations différentes du rôle du stockage d'énergie.

# Applications de stockage d'énergie dans les systèmes électriques

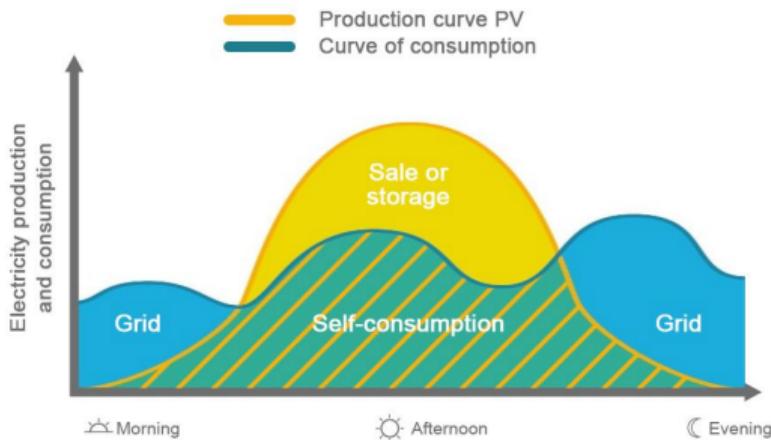
# Taxonomie des applications de stockage d'énergie dans les systèmes électriques



PV = Photovoltaic, behind-the-meter=Derrière le compteur,

# Exemple d'application : autoconsommation PV

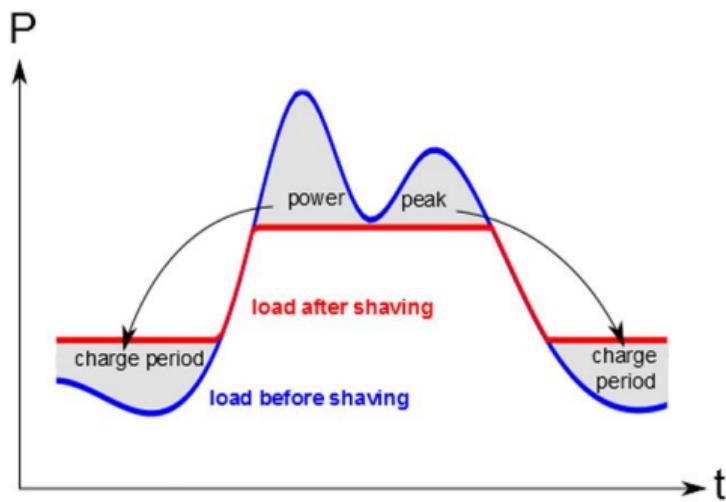
Imaginez un ménage équipé d'un système photovoltaïque sur le toit.



- Selon les contrats (par exemple, net billing), la production PV exportée peut être rémunérée à un taux inférieur (\$/kWh) à celui utilisé pour facturer la consommation → il est économiquement logique de consommer sa propre électricité PV.
- Un certain degré d'autoconsommation PV peut survenir naturellement. L'autoconsommation PV peut être améliorée en décalant la consommation lorsque l'électricité PV est disponible.
- L'autoconsommation PV pourrait être mise en œuvre par un stockage d'énergie bidirectionnel local ou par un déplacement de la demande (activation de votre chauffe-eau, recharge de véhicules électriques, etc.).
- Notion simple et facile à mettre en œuvre qui profite également indirectement aux gestionnaires de réseau.

# Exemple d'application : écrêtement des pointes de demande derrière le compteur

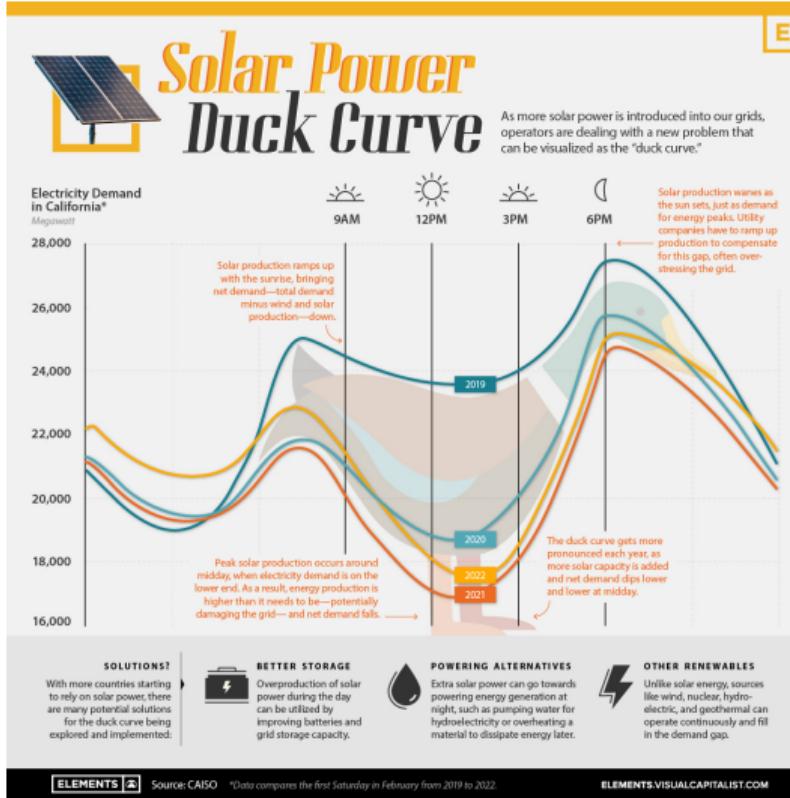
Les séries chronologiques de la demande d'électricité sont généralement caractérisées par des pics et des creux.



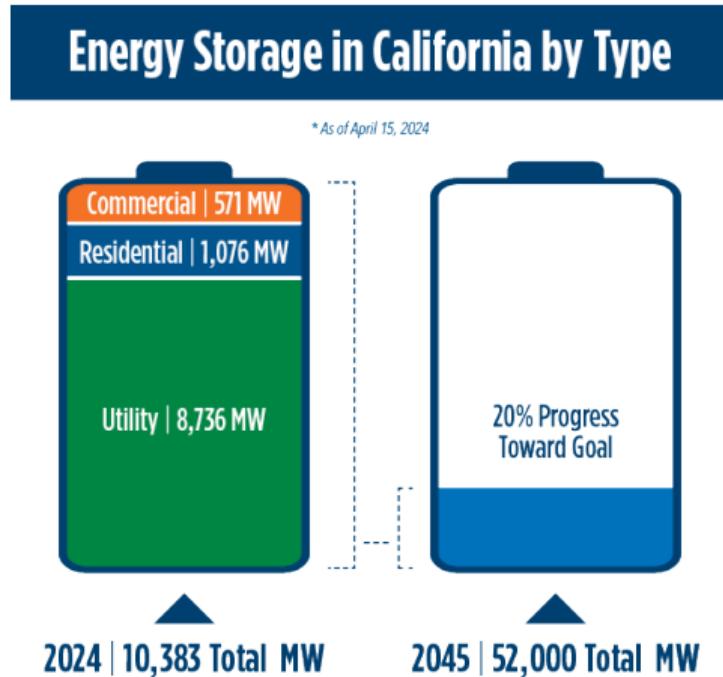
- L'écrêtement des pointes consiste à réduire les pics de consommation
- Utile lorsque l'on a des obligations contractuelles sur la puissance maximale qui peut être tirée du raccordement au réseau
- Les gros consommateurs <sup>(1)</sup> sont soumis non seulement aux tarifs de l'électricité mais aussi aux tarifs de l'électricité (CHF/kW par mois appliqués à la plus grande puissance enregistrée en un mois, mesurée sur une base de 15 min.)

<sup>1</sup>All customers supplied with high and medium voltage, or with low voltage when consumption  $\geq$  50 MWh/year (BKW).

# Example: energy storage in California, US – Duck curve



## Example: energy storage in California, US



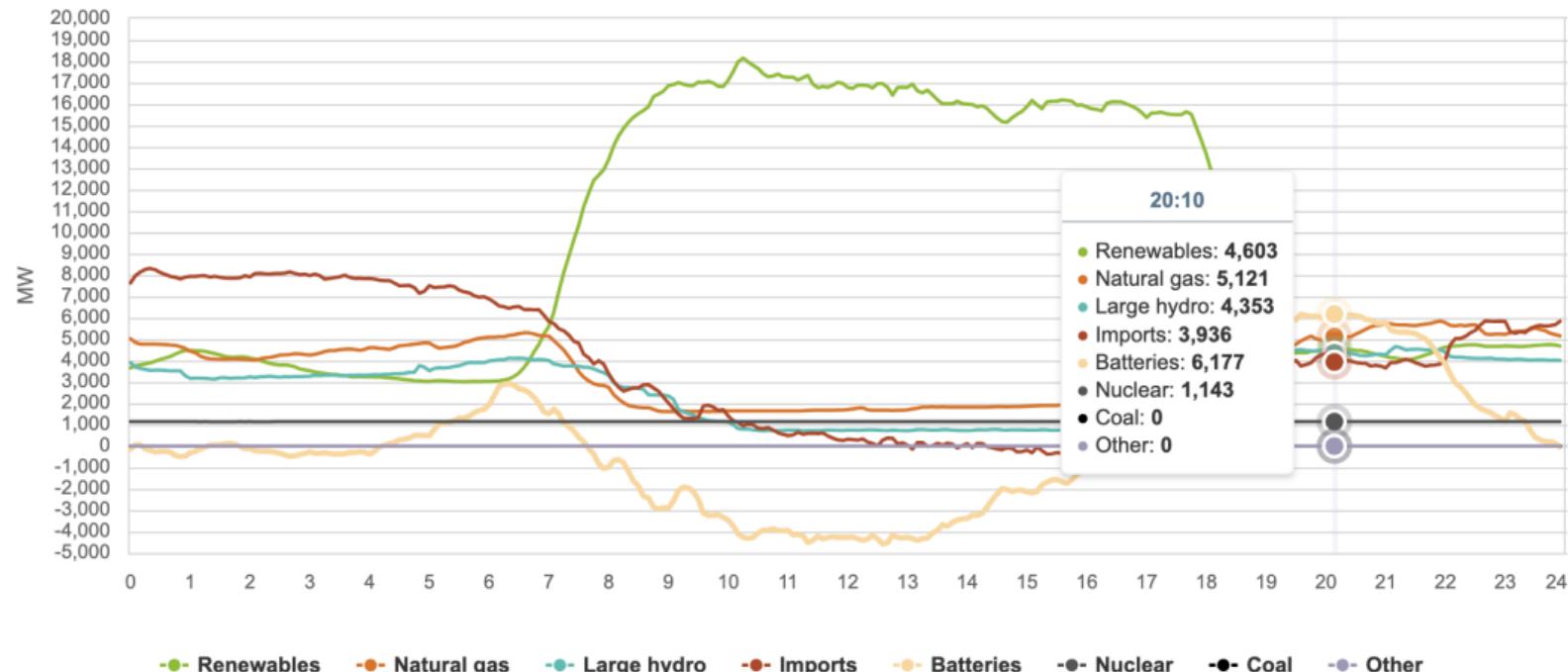
\*Hydropower installed capacity in CH amounts to 17 GW.

# Recent empirical evidence: energy storage in California, US

04/16/2024 ▾

Options ▾

Download ▾





## Self-assessment

- Que montre le diagramme de Ragone ?
- Quelle est la définition de round-trip efficiency ?
- Quel est le coût actuel du kWh d'une cellule lithium-ion ? Ce prix correspond-il à un produit final de système de stockage d'énergie par batterie ?
- Que signifient devant le compteur et derrière le compteur ?
- Citez quelques applications du stockage d'énergie dans les systèmes électriques.