

17. Stockage de l'énergie

17.1 – Introduction aux technologies de stockage

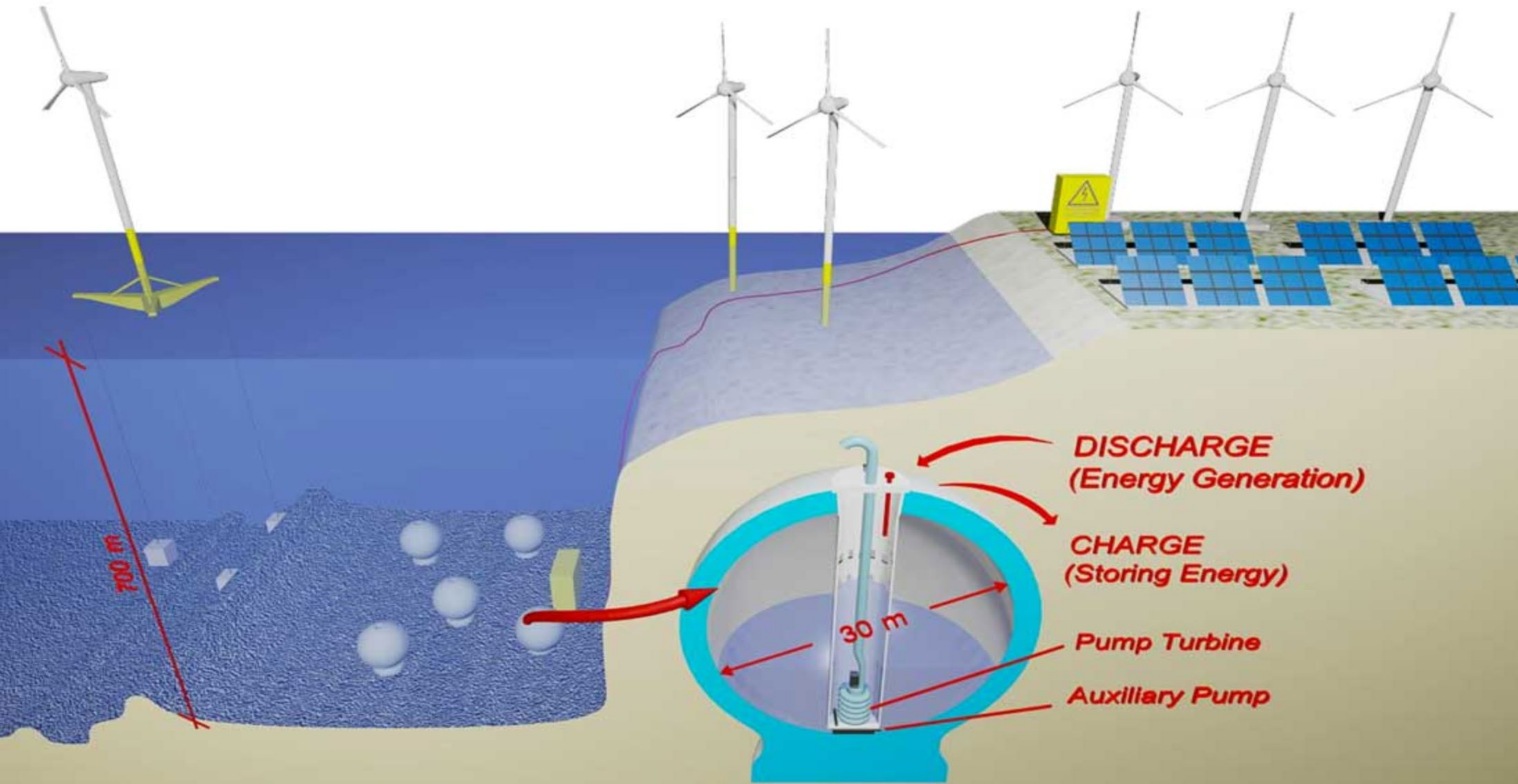
Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.



STENSEA Concept Overview



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- Stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Pourquoi le stockage?
- Stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Il existe conceptuellement deux manières d'utiliser de l'énergie :
 - utiliser le flux d'énergie au moment où celui-ci est capté ou converti
ou
 - convertir l'énergie en « quelque chose » que l'on va pouvoir conserver pour un usage ultérieur.
- Dans le second cas : il s'agit de **stockage d'énergie**.
- Ce stockage réalisé à un moment où l'offre est supérieure à la demande et il permet d'utiliser l'énergie produite lorsque l'inverse se produit (à différentes échelles de temps selon les technologies, de la milliseconde à la saison).

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Poser les bases des problématiques actuelles liées au stockage de l'énergie
 - Donner un aperçu des méthodes et technologies de stockage existantes
 - Faire réfléchir sur les enjeux du stockage dans le contexte de la transition énergétique mondiale et québécoise

Cette présentation répond aux questions :

Pourquoi stocker de l'énergie ?

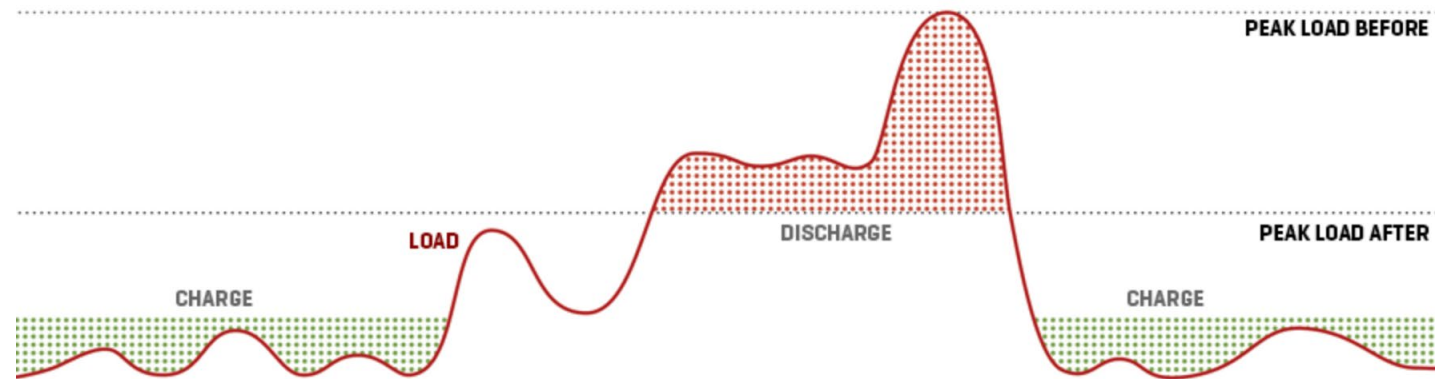
Et sous quelle forme la stocker ?

Les thèmes suivants répondent par la suite à la question :

Comment stocker l'énergie ?

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Pourquoi le stockage?***
- Stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- Conclusion



Pourquoi le stockage?

- On stocke de l'énergie parce que...
- Pourquoi est-ce si important d'en discuter dans un cours d'énergies renouvelables?
 - Parce que ...
- Nommez des énergies renouvelables de stock
 - Énergies renouvelables de stock : ...
- Nommez des énergies renouvelables de flux
 - Énergies renouvelables de flux :

Pourquoi le stockage?

- Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure (même à petite échelle de temps). Par extension, l'expression désigne également le **stockage de matière** contenant l'énergie. Des exemples?
- Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la **production** et la **consommation** d'énergie en limitant les pertes de surproduction.
- Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

Pourquoi le stockage?

- S'il y a stockage, il y a consommation ou perte d'énergie nette. Aucun système de stockage ne possède un rendement de 100%.
- La quasi-totalité des systèmes de stockage existants ne dégage pas de GES lors de leur utilisation. Il faut toutefois considérer la totalité des impacts environnementaux (GES à la conception, empreinte au sol, des exemples?).
- Tout système de stockage n'est qu'un intermédiaire entre une source de production énergétique (production d'électricité ou de chaleur) et une consommation.
- Les impacts environnementaux du stockage dépendent du moyen de production en amont.

Pourquoi le stockage?

- Il existe deux types de systèmes :
 - Ceux qui privilégient la **quantité** au débit : priorité à la restitution d'énergie. Il s'agit de maximiser la durée pendant laquelle le stockage peut fournir de la puissance
 - Applications mobiles : téléphones, ordinateurs et autres.
 - Applications de mobilités alternatives
 - Satisfaction des besoins lors de périodes où la production instantanée sur le réseau est trop basse
 - Adaptation de l'offre à la demande
 - Décalage de la production dans le temps

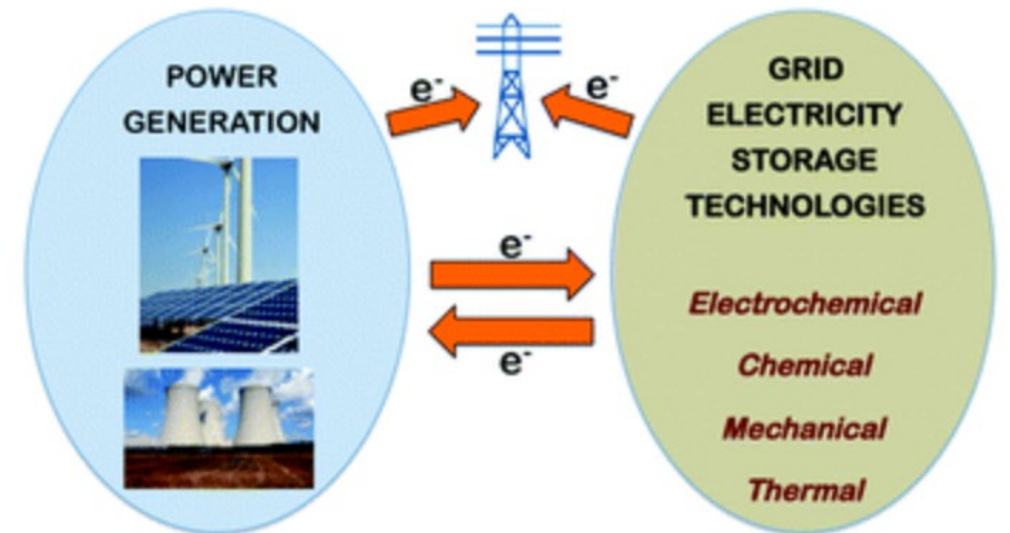
Pourquoi le stockage?

- Il existe deux types de systèmes :
 - Ceux qui privilégient le **débit** : priorité à la puissance. Il s'agit de systèmes très réactifs et fiables pouvant délivrer de fortes puissances sur un temps court (**ordre de la minute maximum**).
 - Applications de stabilisation du réseau électrique (stabilisation du réglage en fréquence et en tension);
 - Compensation des fluctuations rapides des énergies renouvelables variables.



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- ***Stockage de l'électricité***
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- Conclusion





Stockage de l'électricité

- Les énergies primaires fossiles se stockent facilement : un baril de pétrole, une bouteille de gaz, une brouette de charbon ou un tas de bois. Au passage le rendement de ce stockage est de 100% si l'on n'en perd aucune goutte! (et que l'on ne prend pas en compte le transport). L'avantage est surtout qu'il n'y a pas de décharge du système lors d'un tel stockage (sauf si fuites);
- Il est très difficile de stocker l'électricité en grande quantité sous sa forme propre et sur un temps relativement long (quelques heures);
- Cependant, on peut la convertir en d'autres formes d'énergies intermédiaires et stockables (potentielle, cinétique, chimique, thermique...);
- Jusque dans les années 1980 les moyens de conversion permettant le stockage du courant alternatif étaient excessivement coûteux, voire très peu fiables ou inexistantes;
- Cela a évolué avec l'arrivée de l'électronique de puissance plus performante et dont les puissances traitées sont maintenant quasiment illimitées.

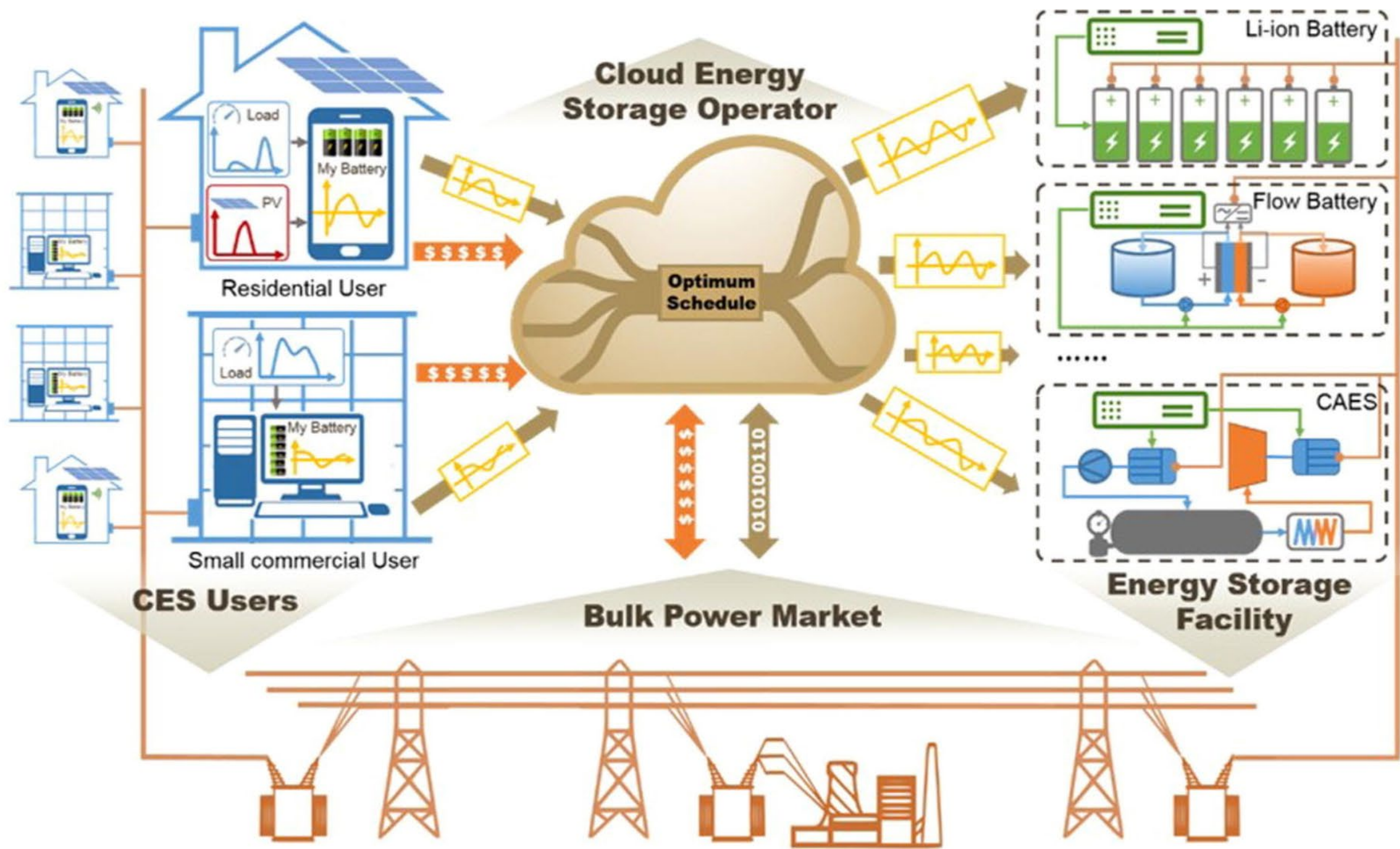
Stockage de l'électricité

- **Seules deux technologies permettent le stockage direct de l'énergie électrique sous sa forme propre**
 - Les grands condensateurs
 - Le stockage électromagnétique avec des supraconducteurs (SMES)

Ces deux technologies sont discutées plus loin dans les thèmes 17.4 et 17.8

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- Stockage de l'électricité
- ***Les technologies de stockage***
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- Conclusion

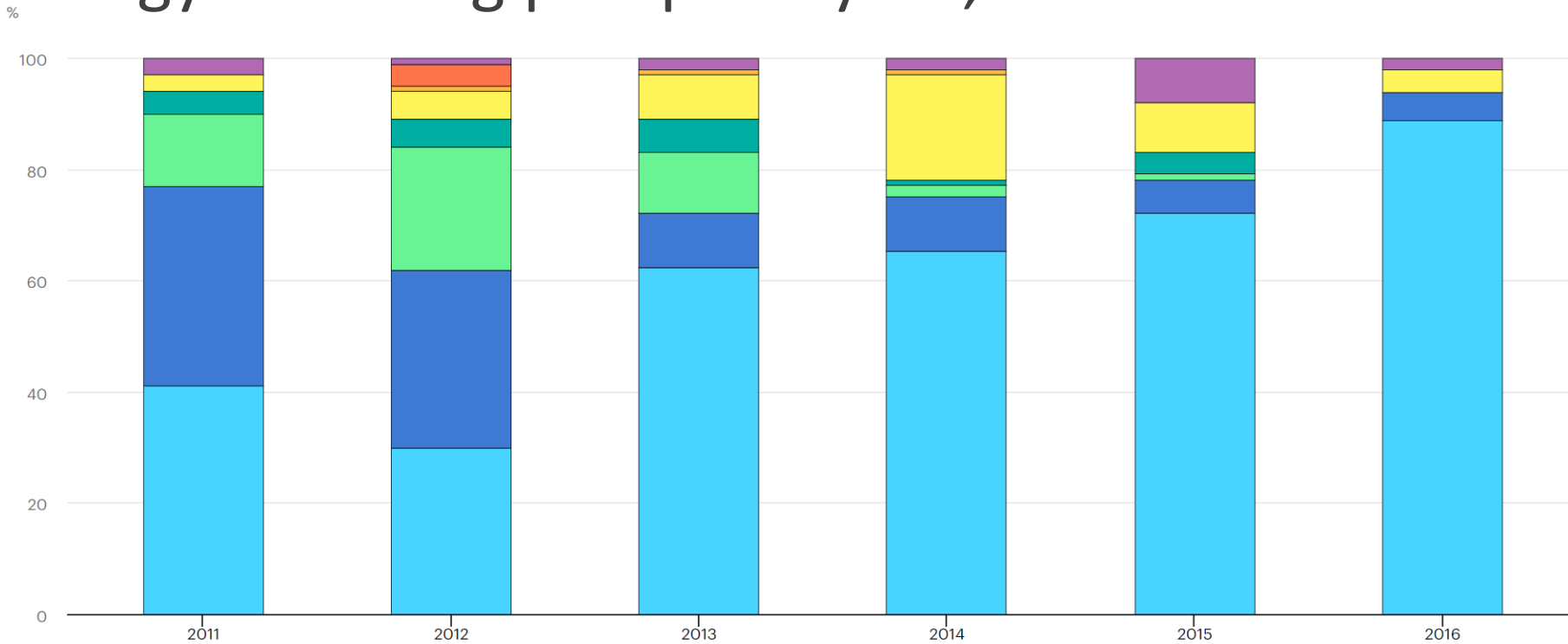


Les technologies de stockage

- Stockage mécanique gravitaire : STEP et masses lourdes;
- Stockage thermodynamique : CAES, air liquide et autres systèmes pneumatiques;
- Stockage électrochimique et électrostatique : accumulateurs et supercondensateurs;
- Stockage thermique (sensible et latent) et thermochimique : incluant le stockage de froid;
- Stockage électromagnétique : SMES;
- Stockage mécanique inertiel : volants d'inerties;
- Stockage chimique : hydrocarbure, biomasse et le plus intéressant l'hydrogène pour du « Power-to-gas ».

Les technologies de stockage

- Technology excluding pumped hydro, 2011-2016



<https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/energy-storage>

IEA. All Rights Reserved

● Lithium-ion batteries ● Lead-based batteries ● Flywheels ● Flow batteries ● Sodium sulphur batteries ● Compressed air ● Supercapacitors ● Zinc air ● Other

Les technologies de stockage

- L'énergie totale de stockage peut se décomposer en :
 - Une composante énergie cinétique : liée au mouvement d'une masse;
 - Une composante énergie potentielle : reliée à la gravité;
 - Une composante d'énergie dite interne, notée U en thermodynamique.
- Les deux premières sont utilisées pour le stockage mécanique tandis que la dernière se réfère au stockage thermique et au stockage chimique.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- Stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- ***Une cause énergétique mondiale***
- Les coûts du stockage
- Conclusion

Une cause énergétique mondiale

- Le développement technologique et commercial des différentes méthodes de stockage est-il un enjeu aussi important que le développement des technologies de production des EnR?
- Oui? Pourquoi?

Une cause énergétique mondiale

- Stockage longue durée
 - Les énergies renouvelables de flux sont des énergies intermittentes;
 - Pour garder un approvisionnement même en cas de conditions production défavorables, il faut des capacités de stockage;
 - à moyen terme,
 - voire même à long terme pour pallier les carences de la ressource (éolien, solaire, océanique, hydraulique) selon les heures, les jours, les saisons.

Dans ce cours, longue durée fait référence à une période d'une heure ou plus.

Une cause énergétique mondiale

- Stockage courte durée
 - De plus, sur des échelles de temps plus courtes, de l'ordre de la minute et de la seconde, les énergies renouvelables ne fournissent pas un courant de bonne qualité (stabilité au niveau de la fréquence et de l'intensité);
 - Il faut donc des moyens de stockage pour l'intégration des parcs marins, solaires ou éoliens;
 - Pour un taux de pénétration des EnR **au-dessus de 30%** la stabilité du réseau n'est plus assurée sans moyen de stockage.

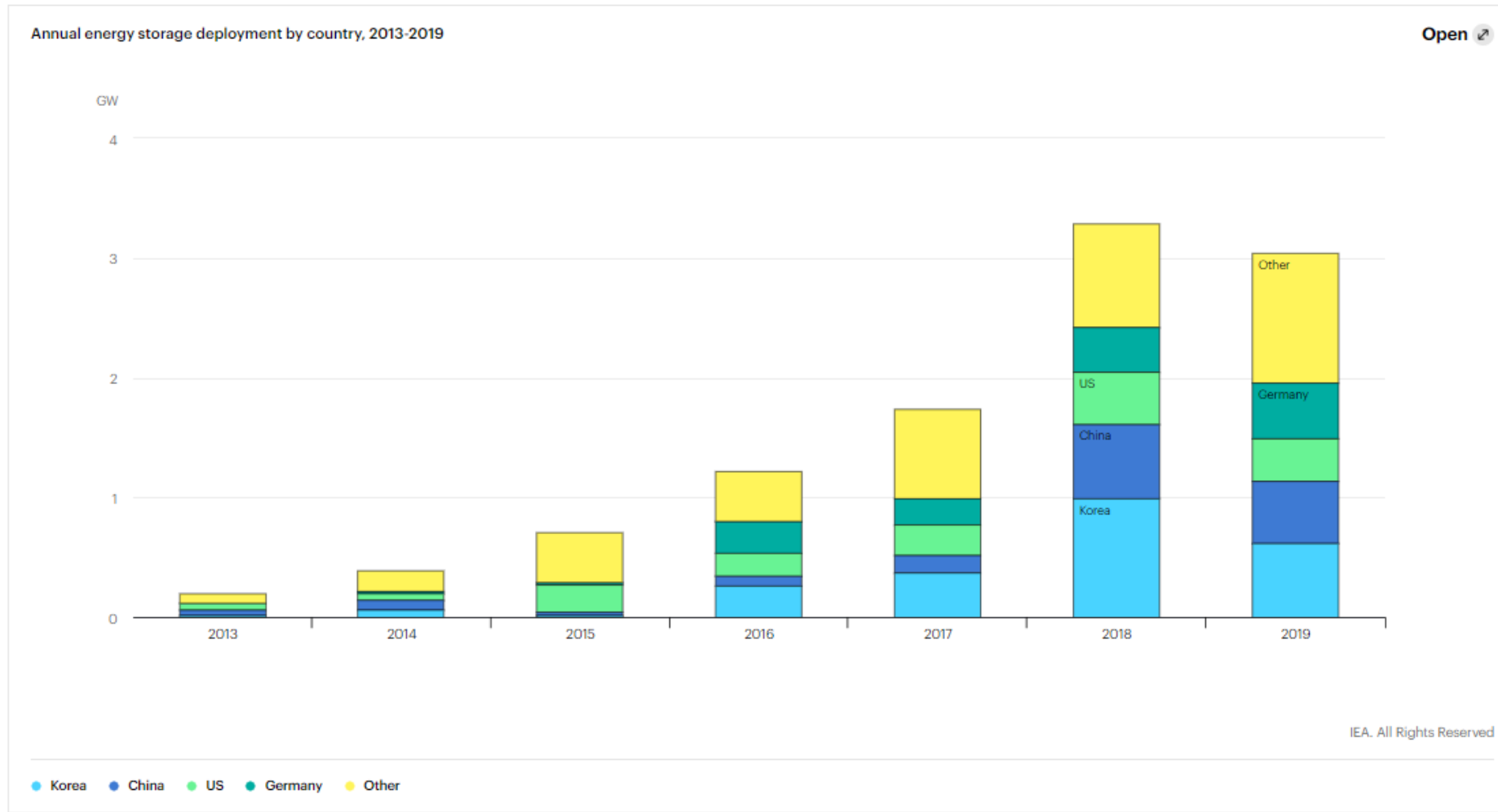
Dans ce cours, courte durée fait référence à une période de 15 minutes ou moins.

Une cause énergétique mondiale

- Le déploiement du stockage d'énergie a atteint un niveau record en 2018, presque doublé par rapport à 2017. L'expansion du stockage derrière le compteur a été particulièrement forte, près de **trois fois** celle de 2017;
- Le principal pays promoteur du stockage était **la Corée**, suivie de la Chine, des États-Unis et de l'Allemagne;
- De nouveaux marchés sont apparus rapidement partout où les gouvernements et les services publics ont créé des mécanismes de soutien, y compris en Asie du Sud-Est et en Afrique du Sud, indiquant que le stockage continue de nécessiter un soutien politique.

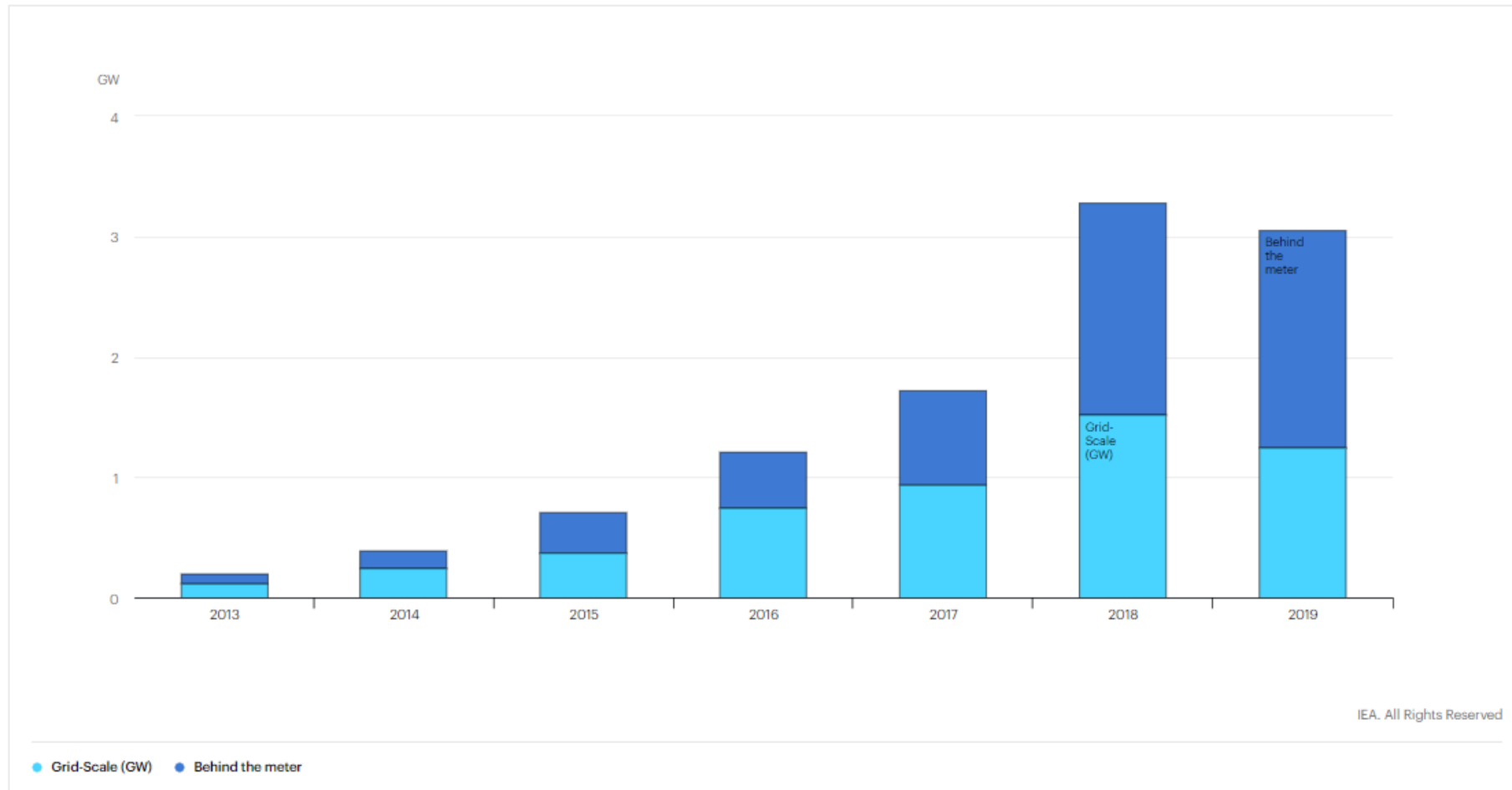
<https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/energy-storage>

Une cause énergétique mondiale



<https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/energy-storage>

Une cause énergétique mondiale



<https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/energy-storage>

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- Stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- ***Les coûts du stockage***
- Conclusion

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - CAPEX : dépenses d'investissement (*sur la durée du projet, habituellement au début mais pas nécessairement*)
 - OPEX : dépenses d'exploitation (*opérations, maintenance et énergie requise. Elles peuvent être constantes chaque année mais peuvent varier*)
 - LCOE : Coût actualisé de l'énergie (*Levelized Cost of Energy*)
 - Dépend fortement de la durée de vie du système, de son rendement énergétique, du facteur d'utilisation de la technologie, des coûts de maintenance...C'est le rendement économique de la technologie de stockage : c'est cela qui en général, **en dehors de toute subvention**, motive le choix d'une technologie plutôt qu'une autre.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - Le coût de l'énergie nivelé (LCOE,) est l'un des paramètres les plus couramment utilisés pour évaluer la viabilité financière des projets énergétiques;
 - Il est utilisé particulièrement souvent pour comparer les coûts de durée de vie de différentes technologies pour la production d'énergie électrique;
 - Le LCOE peut cependant être appliqué à d'autres projets énergétiques (comme les puits de pétrole et de gaz ou les raffineries) et bien entendu au stockage.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - Le LCOE est défini comme le prix de l'énergie (\$ par unité de production/stockage d'énergie) pour lequel la valeur actuelle nette (VAN) de l'investissement est **nulle**. Donc, cela s'apparente au taux de rendement interne (TRI) (*Thème 1.2 Faisabilité technico-économique*);
 - Le LCOE est donc le revenu **moyen** par unité d'énergie (\$/MWh, \$/baril pour un puits de pétrole, par exemple) sur la durée de vie d'un projet, de sorte que l'usine atteindrait l'équilibre financier;
 - Le LCOE est parfois appelé le **coût technique unitaire** (UTC). Il représente le coût moyen à vie de l'énergie pour un projet spécifique.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - La formule LCOE la plus générique

$$\sum_{t=0}^T \frac{C_t + M_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{LCOE \times Q_t}{(1+r)^t} = LCOE \sum_{t=0}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}$$

- où C_t représente tous les coûts d'investissement engagés au cours de l'année t (ceux-ci peuvent être **nuls** sauf pendant les premières années du projet);
 M_t représente tous les coûts d'**exploitation** engagés au cours de l'année t et
 Q_t représente la **production totale du projet** au cours de l'année t .
Le terme $C_t + M_t$ représente les coûts annuels du projet (qui peuvent inclure les paiements sur le capital, le carburant, la main-d'œuvre, les baux fonciers, etc.).
Le terme Q_t représente donc la production annuelle d'énergie de la centrale.

<https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/560>

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - La formule LCOE la plus générique

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{C_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}}$$


- Ici le « discount rate, r » est la traduction du « taux d'actualisation, t » présenté dans 1.2 où N est le nombre d'années (ici T).

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage

- La formule LCOE simplifiée

- Notez que si tous les coûts en capital sont engagés au cours de l'année zéro, le terme C_t est exclu de l'équation LCOE.
- Dans ce cas, vous verrez parfois le terme de coût en capital appelé «coût total installé, en anglais total installed cost» (TIC) ou «coût de nuit ou instantané, en anglais overnight cost» (OC). Dans ce cas, l'équation LCOE peut s'écrire comme suit:


$$\sum_{t=0}^T \frac{M_t}{(1+r)^t} + TIC = \sum_{t=0}^T \frac{LCOE \times Q_t}{(1+r)^t} = LCOE \sum_{t=0}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}$$

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - La formule LCOE simplifiée
 - Souvent, lorsque des projets énergétiques potentiels sont évalués, deux hypothèses sont posées:
 - Premièrement, la production annuelle, Q , du projet est **constante** chaque année.
 - Deuxièmement, le coût de production variable par unité de production, M , est **constant** chaque année.
 - Dans ce cas, les termes Q et M de l'équation LCOE sont les mêmes chaque année. Il est possible d'écrire le LCOE comme la somme de deux termes:
 - Le coût fixe nivelé (LFC, Levelized Fixed Cost), qui calcule le paiement moyen requis pour «amortir» ou rembourser les **coûts en capital** sur T années.
 - Le coût variable nivelé (LVC, Levelized Variable Cost), qui calcule le paiement moyen requis pour couvrir les **coûts d'exploitation** unitaires.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - La formule LCOE simplifiée
 - Si le coût de production variable (y compris le carburant, la main-d'œuvre et tout coût d'exploitation / maintenance variable) ne change pas, le LVC est juste égal à ce coût variable total par unité de production. En faisant référence aux équations LCOE ci-dessus, LVC serait juste égal à $M \div Q$.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage

- La formule LCOE simplifiée

- Le calcul du LFC est un peu plus compliqué. Supposons que le projet implique un taux d'actualisation r ; la durée de vie du projet est de T ans; et les coûts en capital sont payés en une seule somme TIC au début du projet. LFC est obtenu par l'équation:

$$TIC = \sum_{t=0}^T \frac{LFC}{(1+r)^t} / Q$$

- Ou par:

$$LFC = \frac{TIC}{\sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+r)^t}} / Q \quad \rightarrow \quad LFC = \frac{TIC}{\frac{1-(1+r)^{-T}}{r}} / Q = \frac{TIC \times r}{1 - (1+r)^{-T}} / Q$$

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - La formule LCOE simplifiée

$$LCOE = LFC + LVC = \left(\frac{TIC \times r}{1 - (1 + r)^{-T}} / Q \right) + LVC$$

Dans ce cours, ce sera cette formule simplifiée qui est employée pour calculer le LCOE.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage (une centrale)
 - Supposons qu'une centrale électrique coûte 10 milliards de dollars à construire et ait une durée de vie prévue de 30 ans. Le coût variable de la production d'un MWh d'électricité est de 20 \$. Elle fonctionnera 24 heures sur 24, 360 jours par an avec une capacité de 1000 MW. (Remarque: pour obtenir un rendement, multiplier la capacité et les heures de fonctionnement pendant la durée de vie de l'usine). Quel est le coût nivelé de l'énergie si le taux d'intérêt est de 5%?

$$LCOE = LFC + LVC = \left(\frac{TIC \times r}{1 - (1 + r)^{-T}} / Q \right) + LVC$$

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage
 - D'abord $Q = (360 \text{ j/an}) \times (24 \text{ hrs/j}) \times 1000 \text{ MW} = 8.64 \text{ million MWh/an}$.
 - Note: on suppose la production Q constante, les coûts variables LVC constants et le capital dépensé à l'an 0 ($TIC = 10 \text{ milliards\$}$)
 - Le LCOE est alors donné par:

$$LCOE = \left(\frac{TIC \times r}{1 - (1 + r)^{-T}} / Q \right) + LVC$$

$$LCOE = \left(\frac{\$10bil \times 0.05}{1 - (1 + 0.05)^{-30}} / 8.64mil \right) + 20$$

$$= \$75.29/MWh + \$20/MWh = \$95.29/MWh$$

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage (exercice)
 - Calculez le LCOE pour une centrale au gaz naturel et une centrale éolienne.
 - Le parc éolien a un coût en capital de 1,2 million de dollars et un coût variable de 5 \$/MWh. La centrale au gaz naturel a un coût en capital de 600 000 \$ et un coût variable de 50 \$/MWh.
 - Chaque centrale produit 2 628 MWh par an.
 - Le taux d'actualisation annuel est de 10% et la durée de vie est de 20 ans pour chaque projet.

Les coûts du stockage

- Le coût monétaire du stockage (exercice)
 - Calculez le LCOE pour un système de stockage.
 - Le coût en capital de 1,5 million de dollars et le coût variable de 4 \$/MWh.
 - Le système permet de produire 3 200 MWh/an qui autrement seraient perdus.
 - Le taux d'actualisation annuel est de 10% et la durée de vie est de 25 ans.
 - Si le marché de l'énergie est à 60\$/MWh est-ce un bon projet?
 - Est-ce le seul bénéfice possible?
 - Non, parce que...

Les coûts du stockage

- Le coût environnemental du stockage
 - Tout comme le choix d'une technologie de production d'énergie, le choix de la technologie de stockage est très souvent motivé davantage économiquement qu'environnementalement.
 - L'impact environnemental n'est pas corrélé, dans l'immédiat, du moins avec le coût économique;
 - Certaines technologies, ayant des impacts environnementaux moindres que d'autres, ne sont pas développées à cause de leurs coûts trop élevés.

Les coûts du stockage

- Le coût environnemental du stockage
 - L'impact environnemental du stockage n'est pas nul, il est important d'en avoir conscience.
 - Puisque l'utilisation des EnR de flux ne peut se faire sans capacité de stockage, l'impact environnemental de l'ensemble du système n'est donc absolument pas négligeable!



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Pourquoi le stockage?
- Le stockage de l'électricité
- Les technologies de stockage
- Une cause énergétique mondiale
- Les coûts du stockage
- ***Conclusion***

Conclusion

- A priori, il est impossible de concevoir un système EnR de flux sans prévoir simultanément un système de stockage;
- Il est difficile de stocker de l'électricité;
- Le LCOE est une donnée d'importance lors du choix d'une technologie de stockage;
- Le paradoxe du stockage: trouver de la valeur dans la volatilité
 - Les technologies de stockage d'énergie arrivent à maturité, mais ce faisant, vont-elles supprimer la volatilité des prix dont elles dépendent pour faire gagner de l'argent aux promoteurs?

Pourquoi le stockage?

- On stocke de l'énergie parce qu'il arrive que l'offre d'énergie (soit la quantité disponible à un instant donné) soit supérieure à la demande (soit le besoin à combler au même moment)
 - Pour sauver de la pointe (puissance)
 - Pour sauver de l'argent (en consommant lorsque c'est moins cher en énergie)
 - Pour récupérer un excédent de production sur la demande.
- Pourquoi est-ce si important d'en discuter dans un cours d'énergies renouvelables?
 - Parce que contrairement l'énergie fossile qui elle-même est une énergie **stockée** dans de la matière (une énergie de **stock**), la plupart des ER sont des énergies de **flux**.
- Nommez des énergies renouvelables de stock
 - Énergies renouvelables de stock : Biomasse et géothermie
- Nommez des énergies renouvelables de flux
 - Énergies renouvelables de flux : Solaire, éolienne, hydraulique, océanique

Bibliographie/médiagraphie

Obligatoire: Aucune

Facultative :

- <http://energy-age.blogspot.com/2018/01/lcos-levelized-cost-of-storage.html>
 - <https://www.connaissancedesenergies.org/peut-on-stocker-l-electricite>
 - <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>
 - https://www.connaissancedesenergies.org/afp/corse-inauguration-dune-centrale-photovoltaique-avecstockage-191008?utm_source=newsletter&utm_medium=fil-infoenergies&utm_campaign=/newsletter/le-fil-info-energies-08-oct-2019
 - <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climatenvironnement/stockage-denergie-accompagner-deploiement-des-energies-renouvelables>
 - <https://les-smartgrids.fr/stockage-electricite-recherche-mondiale/>
 - <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/stockage-lenergie>
 - <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>
 - <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/journalistes/tous-les-communiques-de-presse/legroupe-edf-annonce-le-plan-stockage-electrique-avec-pour-objectif-de-devenir-le-leader-europeen-dusecteur-d-ici-a-2035>
 - <https://www.edf-renouvelables.com/project/mchenry/>
 - <https://znrblog.wordpress.com/2e-page-enfant/>
 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_l%27%C3%A9ner
- Pour consulter le site de l'AIE (IEA), ça devient plus compliqué depuis quelques années. En stockage, l'adresse donnée tout au long de la présentation ne fonctionne plus et fut changée pour : <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020/energy-storage#abstract> en 2020. On arrive du le site Tracking Ennergy Integration 2020. Mais, il m'a fallu me connecter sur mon compte (gratuit) pour y accéder.



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

