

## 4. Vecteurs énergétiques

### 4.1 – L'électricité

#### *Partie 3 - Problématiques liées à l'intégration des EnRI*

Daniel R. Rousse, Ph.D., Ing.

*Département de génie mécanique*

Antoine Brégaïnt, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- L'équilibre du réseau
- La qualité de l'énergie
- L'impact financier
- L'impact environnemental
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- L'équilibre du réseau
- La qualité de l'énergie
- L'impact financier
- L'impact environnemental
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- La croissance significative des capacités installées des EnR augmente la part de ces dernières dans le mix électrique, ce qui n'est pas sans conséquence pour la sécurité et l'équilibre du réseau.
- Cette présentation s'intéresse aux principales problématiques liées à l'intégration des énergies renouvelables intermittentes (EnRI) dans le mix électrique.

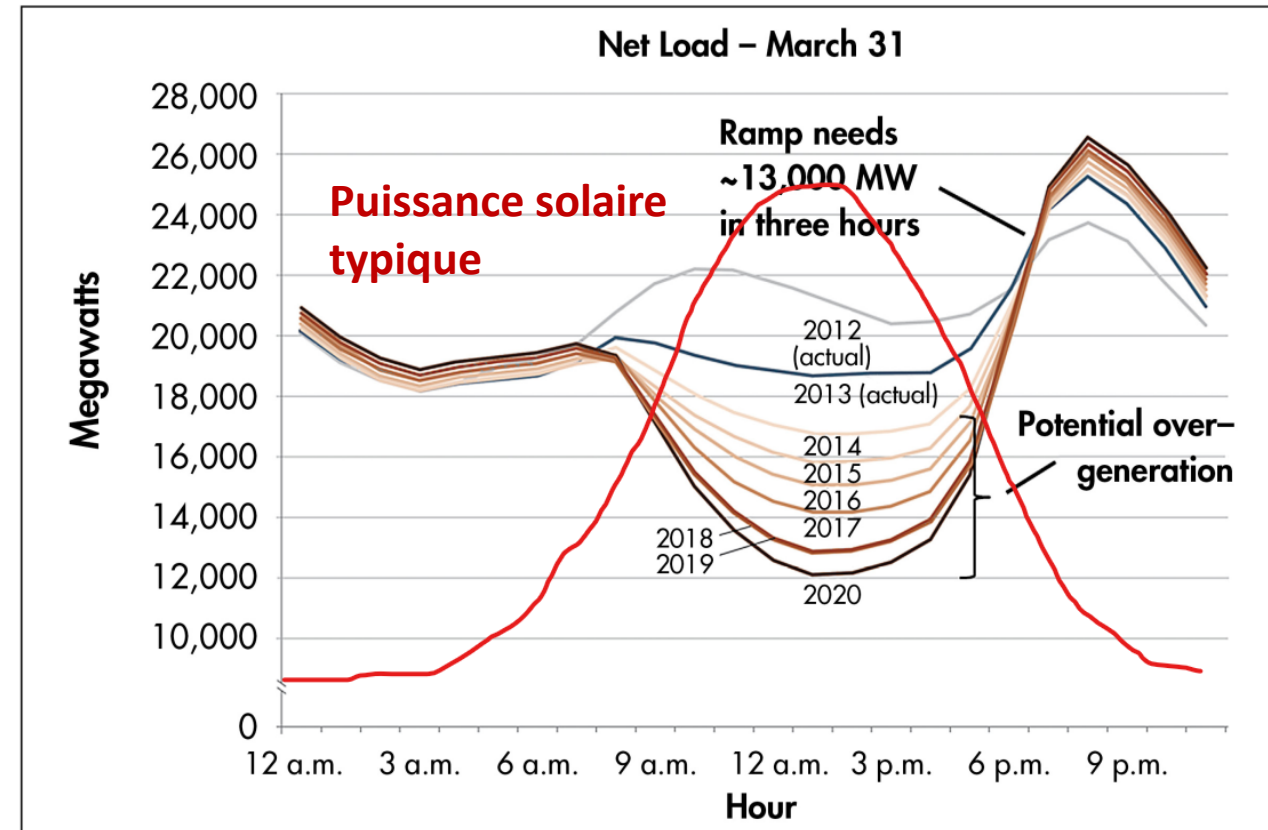
# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***L'équilibre du réseau***
- La qualité de l'énergie
- L'impact financier
- L'impact environnemental
- Conclusion

# L'équilibre du réseau

L'intégration massive d'EnRI peut créer des déséquilibres importants du réseau : exemple de la « duck curve » en Californie. La charge perçue par l'opérateur californien chute brutalement lors des fortes productions solaires, ce qui peut créer :

- **Une génération trop élevée** : certaines unités de production ne peuvent pas descendre en dessous d'un certain seuil sans être éteintes complètement
- **Une pente trop sévère** qui ne peut être satisfaite ⇒ la Californie investit massivement en stockage d'énergie pour répondre à cette pente



Source: CAISO

Vidéo explicative à regarder : [ici](#)

# Question

- Parmi ces propositions, lesquelles permettent d'assurer la sécurité d'approvisionnement et l'équilibre du réseau ?
  - A. Le maintien du plan de tension
  - B. La régulation de la fréquence
  - C. Les phénomènes de papillotement
  - D. Le bon dimensionnement du parc de production
  - E. Les creux de tension



ENR2020

# L'équilibre du réseau

- La sécurité d'approvisionnement, permettant l'équilibre du réseau, est assurée par :
  - Le bon dimensionnement du parc de production et d'effacement
  - La régulation en temps réel de la fréquence
  - La maîtrise du plan de tension



# L'équilibre du réseau : dimensionnement des parcs de production et d'effacement

- Le parc de production doit être dimensionné pour assurer l'équilibre entre offre et demande quelle que soit la situation (hiver, vent faibles...).
- Bien souvent, les parcs sont surdimensionnés grâce aux centrales thermiques fossiles (comme en France).
- La fermeture de ces dernières au profit des EnRI diminue donc les marges de sécurité du système électrique en raison des faibles crédits de capacité des EnRI.

# L'équilibre du réseau : régulation de la fréquence

- Les variations permanentes de production d'EnRI rendent l'équilibre du réseau plus difficile à maintenir.
- La fréquence est donc impactée par ces écarts et est rétablie par l'appel aux réserves d'ajustement (*cf.* 4.1.1).
- L'intégration massive d'EnRI est donc néfaste au maintien de cet équilibre. Les réserves, qui ne sont pas illimitées, seront plus souvent sollicités au risque de ne pas pouvoir intervenir lors de déséquilibres futurs.

# L'équilibre du réseau : maintien du plan de tension

- La plupart des grands parcs d'EnRI sont raccordés au réseau de transport dans lesquels les lignes aériennes ont une impédance fortement réactive.
- Dans ce type de réseau, le contrôle de la puissance réactive permet le maintien du plan de tension.

# L'équilibre du réseau : maintien du plan de tension

- Pour les lignes de transport de Très Haute Tension (THT), la variation de tension entre les extrémités d'une ligne peut être approximée par<sup>1</sup> :

$$\Delta V = \frac{XQ}{V}$$

Où X est la réactance de la ligne, Q la puissance réactive traversant la ligne et V la tension simple du nœud récepteur.

<sup>1</sup> Marin, D. H. (2009). *Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires* (Rapport de thèse, Ecole Centrale de Lille, Lille).

# L'équilibre du réseau : maintien du plan de tension

- Il est donc demandé aux parcs d'EnRI raccordés au réseau de transport, de réguler leur puissance réactive pour participer à la régulation de la tension.
- Cependant, certaines EnRI présentent des variations régulières de tension appelées flicker, notamment en raison des limites mécaniques des éoliennes mais aussi à cause des fluctuations du vent.
- Il est nécessaire de dissocier la turbine et le réseau à l'aide d'électronique de puissance pour limiter l'impact sur le réseau.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- L'équilibre du réseau
- ***La qualité de l'énergie***
- L'impact financier
- L'impact environnemental
- Conclusion

# Question

- Quels sont les dangers des creux de tension ?
  - A. Ils sont responsables de microcoupures
  - B. La fréquence du réseau augmente fortement
  - C. Ils altèrent le bon fonctionnement d'appareils électriques
  - D. Des incidents majeurs peuvent en découler par effet boule de neige
  - E. Les éoliennes peuvent se déconnecter du réseau



ENR2020

# La qualité de l'énergie

- L'intégration importante des EnRI est également préjudiciable pour la qualité de l'énergie transportée par le réseau.
- Il est nécessaire de conserver des performances proches de celles des centrales conventionnelles.
- L'évaluation des **harmoniques**, des **creux de tension** et des **fluctuations de tension** permet de juger de la qualité de puissance des centrales EnRI connectées au réseau.



# La qualité de l'énergie : les harmoniques

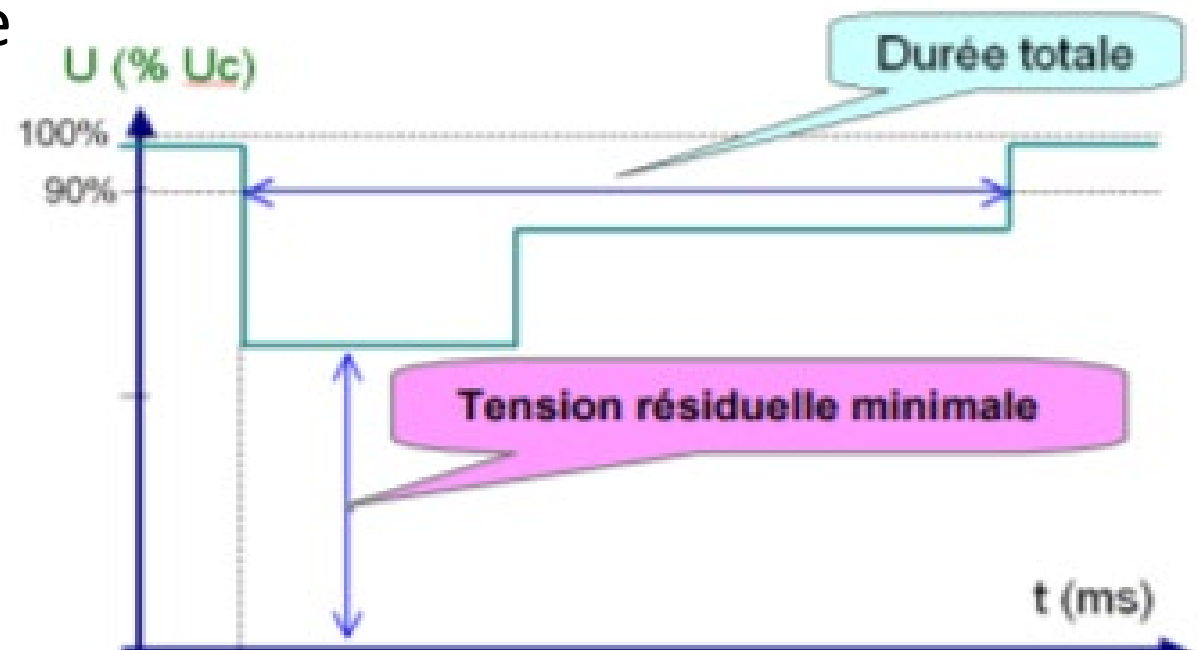
- Définition : perturbations de la qualité d'une onde due à des charges non linéaires .
- Elles proviennent des systèmes d'électronique de puissance présents dans les parcs d'EnRI. La forme de l'onde de tension générée par ces parcs est donc polluée.
- L'intensité de ces harmoniques est variable et dépend des technologies et des algorithmes de commande des convertisseurs de puissance utilisés.

# La qualité de l'énergie : les creux de tension

- Définition<sup>1</sup> : « diminution brusque et temporaire de la tension de fourniture à une valeur inférieure à 90% de la tension d'alimentation déclarée »

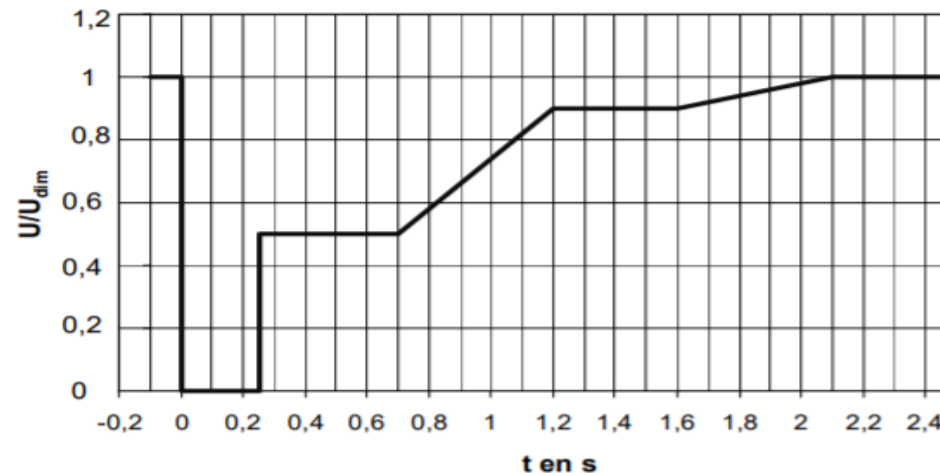
<sup>1</sup> Réseau de transport d'électricité (RTE). (2009). *Rapport annuel sur la qualité de l'électricité, Résultats 2009.*

- Ils sont caractérisés par leur durée totale et leur tension résiduelle minimale. Ils sont mesurés en ms.
- Ils peuvent provoquer des microcoupures et altérer le bon fonctionnement d'appareils électriques.



# La qualité de l'énergie : les creux de tension

- La production d'EnRI peut se déconnecter lorsque ces phénomènes se produisent, ce qui aggrave le déséquilibre du réseau. Des incidents majeurs peuvent en découler.
- Il existe des gabarits afin d'éviter la déconnexion des centrales éoliennes lors des creux de tension. Tant que ces derniers sont supérieurs à ce gabarit, les centrales doivent rester connectées.
- Exemple de gabarit :



Robyns et al. (2006). *Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie* présentée à Journée du Club EEA "Ouverture des marchés de l'électricité", Supélec, Gif-sur-Yvette.

# La qualité de l'énergie : les fluctuations de tension

- Aussi connues sous le nom de papillotement, ce sont des fluctuations faibles et rapides de la valeur efficace de la tension.
- Ces phénomènes entraînent des variations d'intensité d'éclairage et se produisent principalement dans les réseaux ruraux.
- Les parcs éoliens sont notamment responsables de ces papillotements en générant des oscillations de puissance de fréquence triple de celle liée à la vitesse de rotation des pâles de l'éolienne.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- L'équilibre du réseau
- La qualité de l'énergie
- ***L'impact financier***
- L'impact environnemental
- Conclusion

# L'impact financier

- Les fluctuations de production des EnRI entraînent des coûts supplémentaires de réglages.
- Le marché de l'électricité est également fortement impacté par l'intégration d'EnRI dans le réseau.

# L'impact financier : les coûts de réglage

- Ces coûts sont nécessaires pour appeler les réserves lors de faible production en raison de mauvaises conditions météorologiques.
- Ces coûts comprennent ceux du renforcement du réseau, ceux d'équilibrage des écarts de production et les coûts supplémentaires des capacités de production.
- Il est souvent estimé que ces externalités sont négligeables en dessous d'un certain taux de pénétration seuil (rapport de l'énergie électrique produite en renouvelable intermittent sur l'électricité toutes sources confondues). Ce taux est généralement considéré autour de 20 % et est aujourd'hui atteint par peu de pays.

# L'impact financier : les coûts de réglage

- Coûts croissants :
  - Augmentation du coût d'équilibrage avec le taux de pénétration;
  - 4€/MWh représente environ 10% du coût de l'électricité éolienne;
  - Valeurs absolues très variables selon les pays car dépendant du mix énergétique en place et des méthodologies.

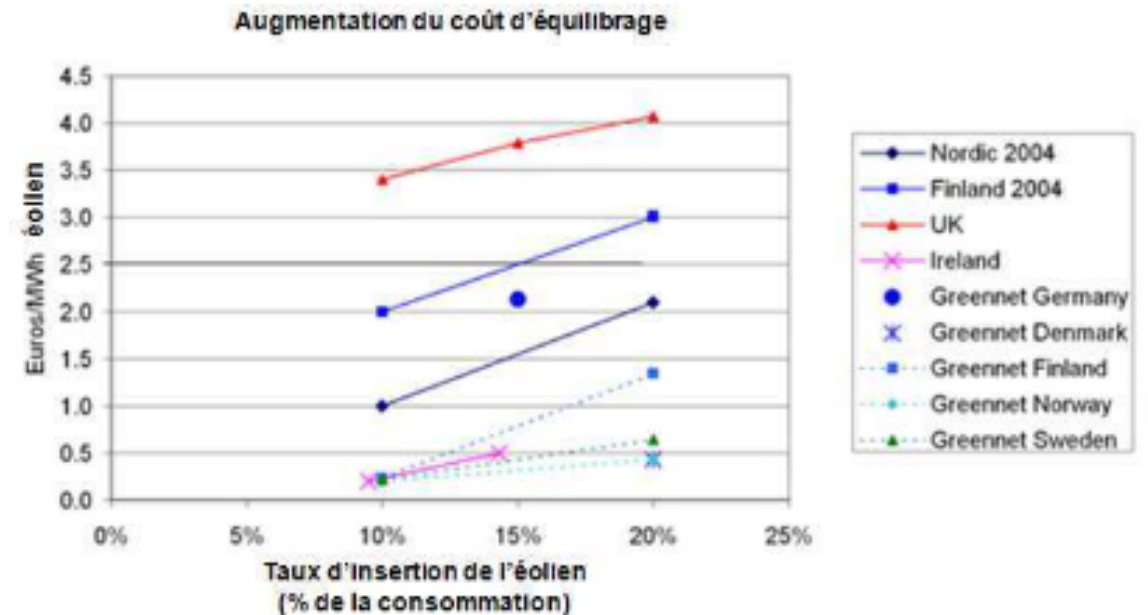


Figure 3-23 Coûts de l'intermittence selon diverses études réalisées par pays  
Source [GRE-07]

Tiré de : L.M.R. Gomez, 2012, Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques



# L'impact financier : les coûts de réglage

- Les externalités devraient commencer à être prises en compte dans les analyses de cycle de vie au fur et à mesure que les taux de pénétration augmentent.
  - Faut-il inclure les capacités pilotables à conserver, les capacités de stockage, d'adaptation des réseaux dans les calculs de l'empreinte environnementale, du coût de l'éolien et du PV ?
- N.B.: On ne parle ici que des externalités de l'intégration sur le réseau électrique, chaque source d'énergie produit aussi des déchets dont le traitement est internalisé ***ou pas*** dans les coûts.

# L'impact financier : le marché de l'électricité

- On peut différencier 2 types de marchés :
  - Le marché de gros : il s'agit de la vente d'électricité à des services ou des négociants avant qu'il soit vendu aux consommateurs
  - Le marché de détail : il s'agit de la vente aux consommateurs
- Chacun de ces marchés peut être :
  - Régulé : les services publics sont responsables du flux entier de la génération à la distribution (Hydro-Québec)
  - Libéralisé : le flux d'électricité est géré par des opérateurs indépendants (ISO & RTO)

# L'impact financier : le marché de l'électricité

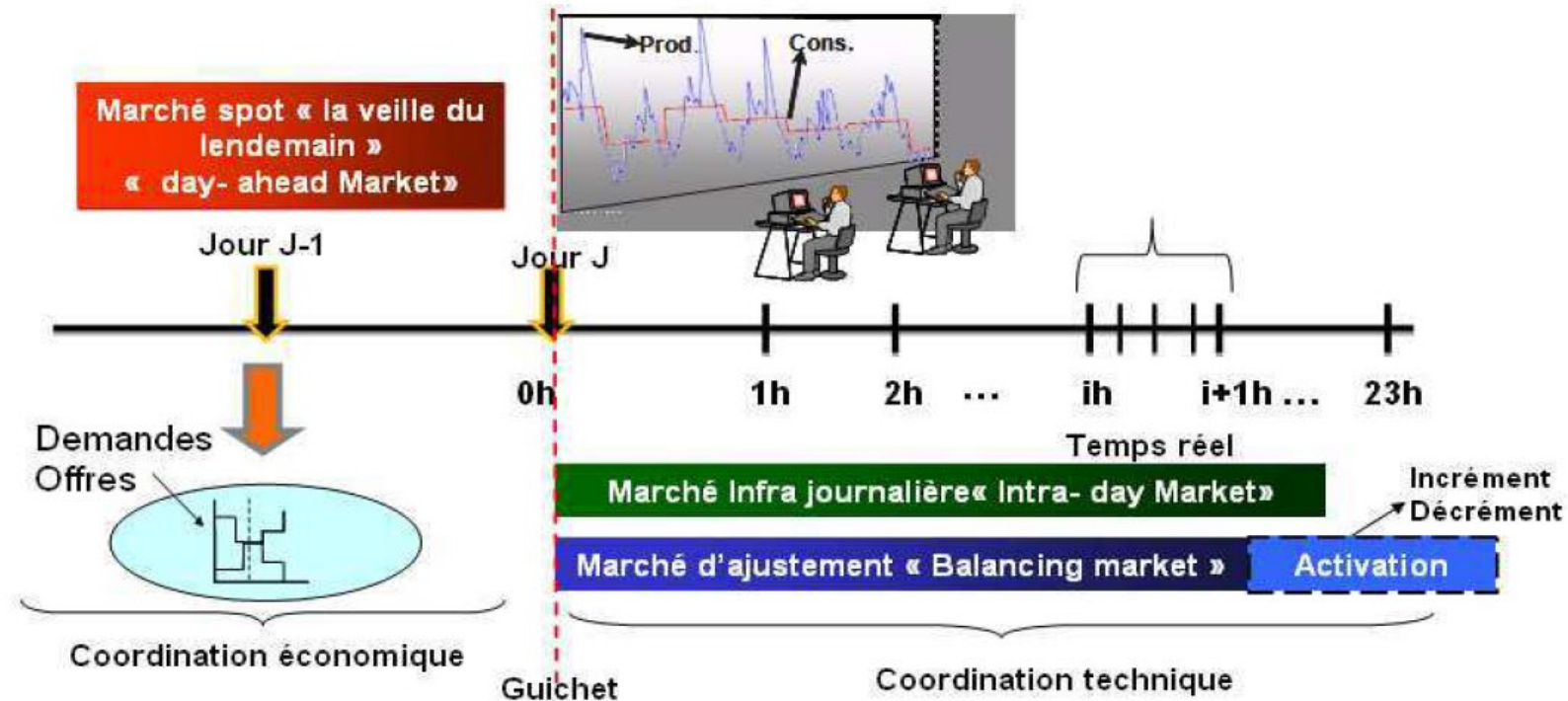
- Pour les marchés où les tarifications de l'électricité sont variables comme en Alberta, la bourse de l'électricité permet de fixer les prix de vente de l'électricité. Au Québec, ce type de bourse n'existe pas car les prix sont réglementés par la société d'État (comme Hydro-Québec).
- Cette bourse est composée de plusieurs phases :
  - Le marché spot « la veille du lendemain » (*day-ahead*) a lieu au jour J-1. C'est à ce moment que sont faites les offres de production et de consommation selon les conditions météorologiques, les capacités de production des centrales électriques ... C'est lors de cette phase que les prix de vente de l'électricité par tranche horaire du lendemain sont définis.

# L'impact financier : le marché de l'électricité

- Les marchés « infra-journaliers » (*Intra-day market*) permettent de rectifier les productions des centrales en raison des éventuels écarts entre prévisions et consommations réelles. Ils ont lieu jusqu'à une heure avant la livraison.
- Les mécanismes de réglage (primaire, secondaire...) rectifient les écarts en temps réel.
- Le marché d'équilibrage intervient lorsque ce n'est pas suffisant. L'effacement de production a lieu lors d'une trop forte production et les réserves sont appelées dans le cas contraire.

# L'impact financier : le marché de l'électricité

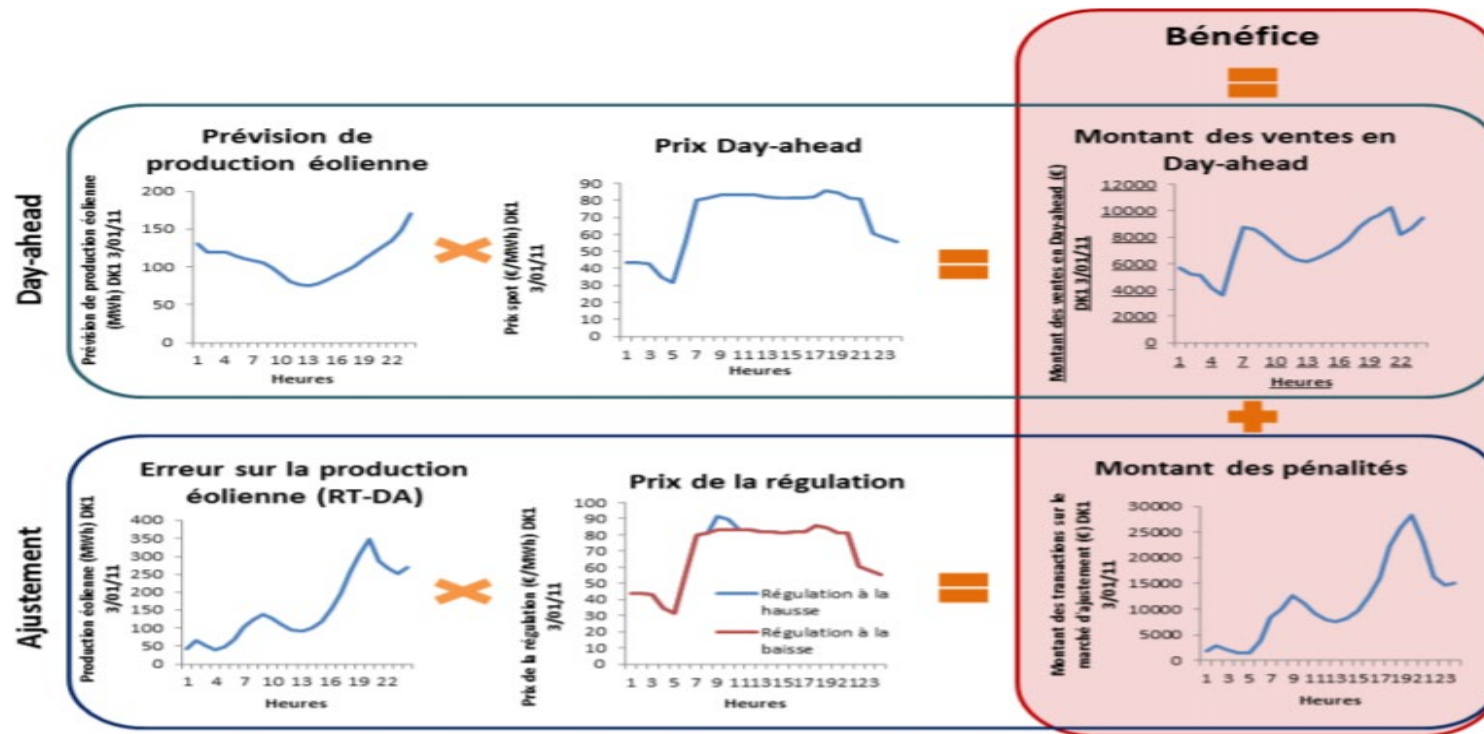
- C'est lors de ce marché d'équilibrage que les impacts financiers de l'intégration des EnRI se font le plus sentir.



Gomez, L. M. R. (2012). *Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques* (Rapport de thèse, Université de Grenoble, Grenoble).

# L'impact financier : le marché de l'électricité

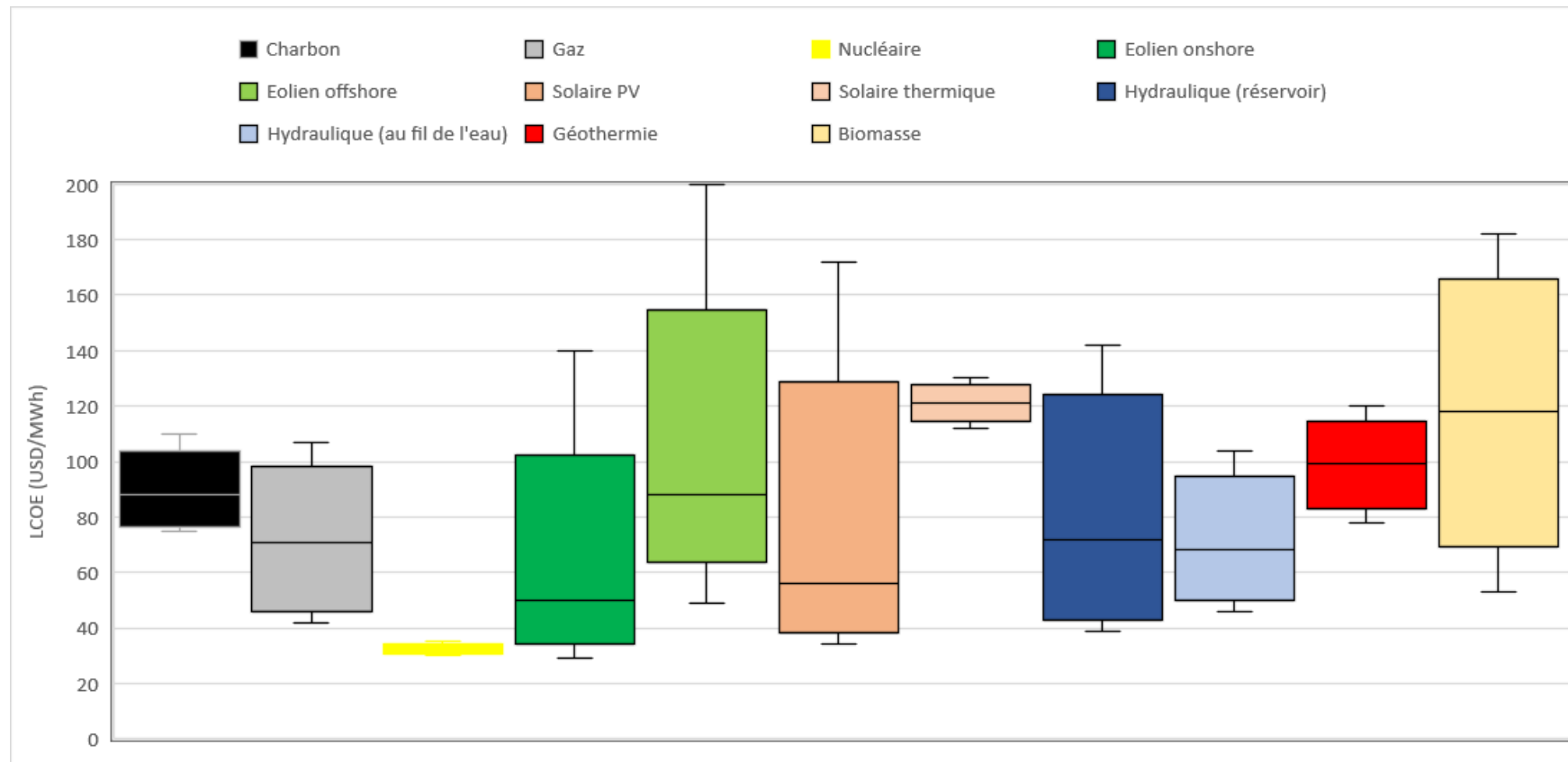
- Les producteurs d'EnRI sont davantage soumis aux erreurs de prévision et risquent de recevoir des pénalités. Ils ne sont donc pas assurés d'être rémunérés à hauteur de leurs ventes sur le marché *Day ahead*.



Foucalt, F. (2016). *Optimisation de l'implantation de centrales éoliennes dans l'environnement d'un marché à prix locaux* (Rapport de thèse, Université Paris sciences et lettres, Paris).

# L'impact financier : Le prix de vente de l'électricité

- Les coûts actualisés (LCOE) de certaines EnRI sont beaucoup plus faibles que ceux des centrales thermiques conventionnelles (cas de la France).







# L'impact financier : Le prix de vente de l'électricité

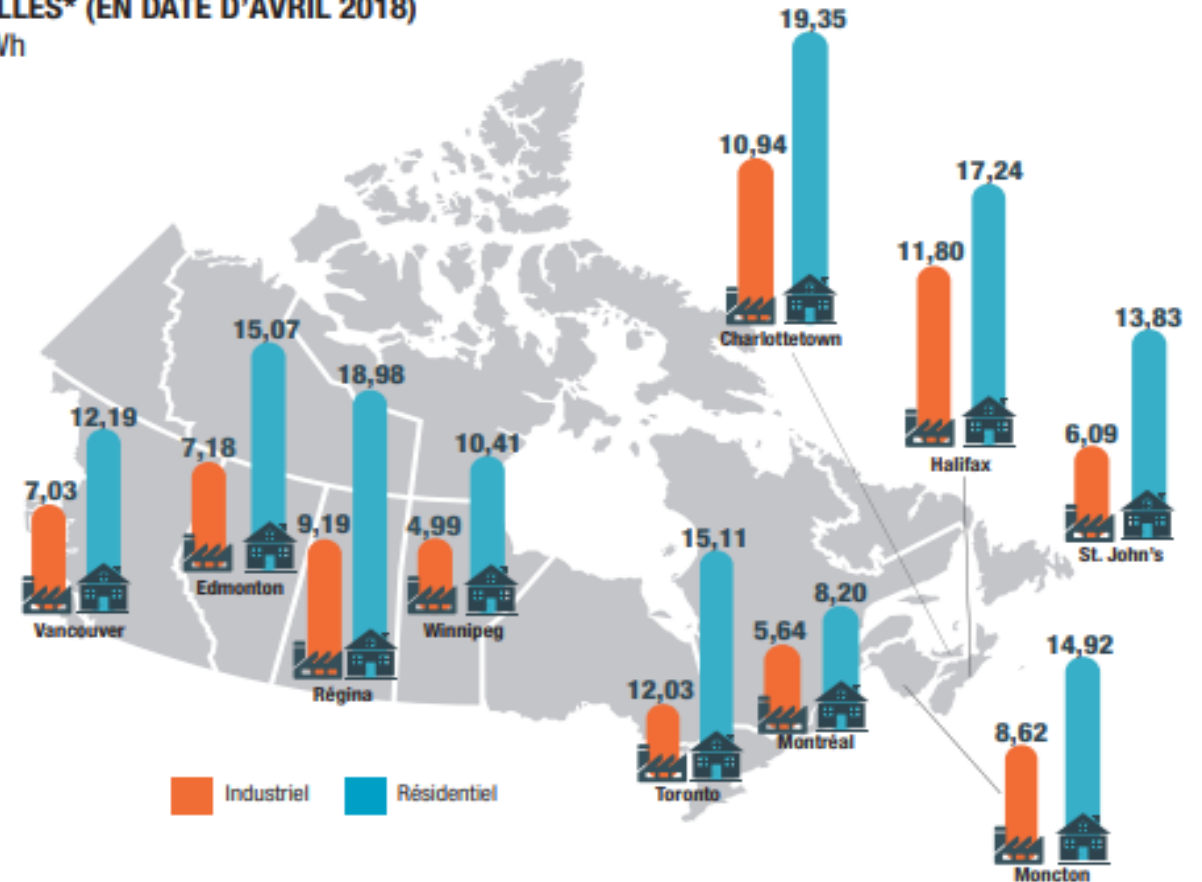
- Les moyens de production les plus coûteux (centrales à fioul...) sont donc appelés uniquement lorsque la demande est importante (courbe D2 de la figure précédente).
- La composition initiale du mix électrique a une influence sur la répercussion de l'intégration des EnRI. La chute des prix de l'électricité est ainsi moindre pour les mix basés sur l'hydro (Québec) et le nucléaire (France) que ceux sur le charbon (Chine).

# L'impact financier : Cas du Québec

- Au Québec les prix sont fixes et faibles.
- La réglementation des principaux marchés de l'énergie au Québec est faite par la Régie de l'énergie.
- Mais les nouveaux projets hydroélectriques ont un coût marginal plus élevé que le tarif d'Hydro-Québec et un coût unitaire plus élevé que les anciens projets.

## PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ

PRIX MOYENS DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LE SECTEUR RÉSIDENTIEL ET POUR LES GRANDES ENTREPRISES INDUSTRIELLES\* (EN DATE D'AVRIL 2018)  
en cents/kWh



\*taxes comprises

Industriel Résidentiel

88 Cahier d'information sur l'énergie

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- L'équilibre du réseau
- La qualité de l'énergie
- L'impact financier
- ***L'impact environnemental***
- Conclusion

# L'impact environnemental

- Variation des empreintes environnementales :

- Ce graphe montre l'effet du stockage.

- Si le rendement de la technologie est de 75%, alors l'empreinte carbone de l'électricité sortant du stockage sera au minimum multipliée par 1,33.
- Exemple de lecture : une électricité PV à  $50\text{gCO}_{2\text{éq}}/\text{kWh}$ , puis stockée, verra son empreinte augmenter à :
  - $75\text{gCO}_{2\text{éq}}/\text{kWh}$  si stockée en PHS (Pumped Hydro) ;
  - $100\text{gCO}_{2\text{éq}}/\text{kWh}$  si stockée en VRB (Vanadium redox) ;
  - $300\text{gCO}_{2\text{éq}}/\text{kWh}$  si stockée en CAES (Compressed Air),

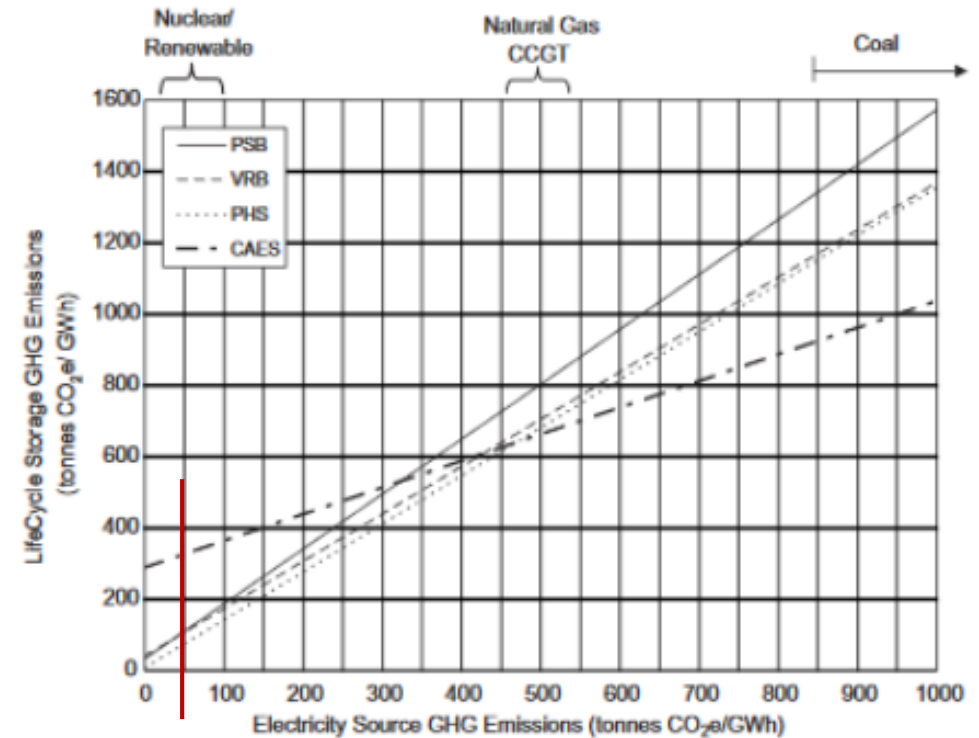


Fig. 4. Life cycle GHG emissions from electricity storage systems.

Tiré de : Denholm & Kulcinski, 2004, Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems

# L'impact environnemental

- Néanmoins, même en internalisant tous les coûts de l'intermittence, l'empreinte environnementale des énergies renouvelables intermittentes reste **bien en-dessous** de celle des énergies fossiles.
- Le coût deviendrait davantage en-dessous de celui des énergies fossiles si on internalisait les immenses dégâts du réchauffement climatique liés aux énergies fossiles:
  - Taxe, taxe carbone, bourse carbone, lois, règlements

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- L'équilibre du réseau
- La qualité de l'énergie
- L'impact financier
- L'impact environnemental
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Les limites à l'intégration des EnRI sont nombreuses. Elles sont techniques, économiques mais aussi sociales (pas discuté dans cette présentation).
- Les sources intermittentes seules ne peuvent pas assurer un réseau électrique fiable. Il faut nécessairement une grande part de capacité pilotable (de production ou de stockage).
- Ces limites s'accroissent à mesure que le taux de pénétration des EnRI dans le réseau augmente.
- Toutefois, il faut relativiser, de nombreuses solutions techniques existent aujourd'hui afin de favoriser cette intégration. Ces dernières font l'objet de la présentation 4.1.4.



**Merci de votre attention !**



Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit sur le forum et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

