

## 4. Vecteurs énergétiques

### 4.1 – L'électricité

#### *Partie 4 - Méthodes d'intégration des EnRI*

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

*Département de génie mécanique*

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- L'intégration des EnRI au réseau pose de nombreux problèmes techniques présentés dans la présentation 4.1.3.
- Dans le but d'augmenter leur taux de pénétration, plusieurs méthodes existent et sont répertoriées dans cette présentation.
- Cette dernière n'est pas exhaustive et s'intéresse à celles les plus utilisées à l'heure actuelle.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Prévisions météorologiques***
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Question

- Que permet une bonne maîtrise des prévisions météorologiques pour les EnRI ?
  - A. De choisir l'emplacement idéal de la centrale
  - B. De prévoir la production à court terme pour limiter les écarts entre consommation et production
  - C. D'anticiper le blocage des éoliennes
  - D. De permettre au gestionnaire du réseau de mobiliser les moyens de production nécessaires à moyen terme



ENR2020

# Prévisions météorologiques

- Les EnRI sont dépendantes des conditions météorologiques. Leur meilleure prévision permet de :
  - Choisir l'emplacement du projet afin de prévoir la production et les revenus potentiels.
  - Prévoir la production à court terme pour limiter les écarts avec la réalité et les pénalités financières.
  - Permettre au gestionnaire du réseau de mobiliser les moyens de production sur des périodes plus longues (jusqu'à trois jours);
- Plusieurs recherches s'intéressent aux différents moyens de prévisions (méthodes numériques, approches statistiques linéaires, réseau de neurones...);
- Les erreurs sont encore assez importantes (jusqu'à 10 %) et sont plus fiables à des horizons de temps proches et pendant la nuit.

# Plan de cette présentation

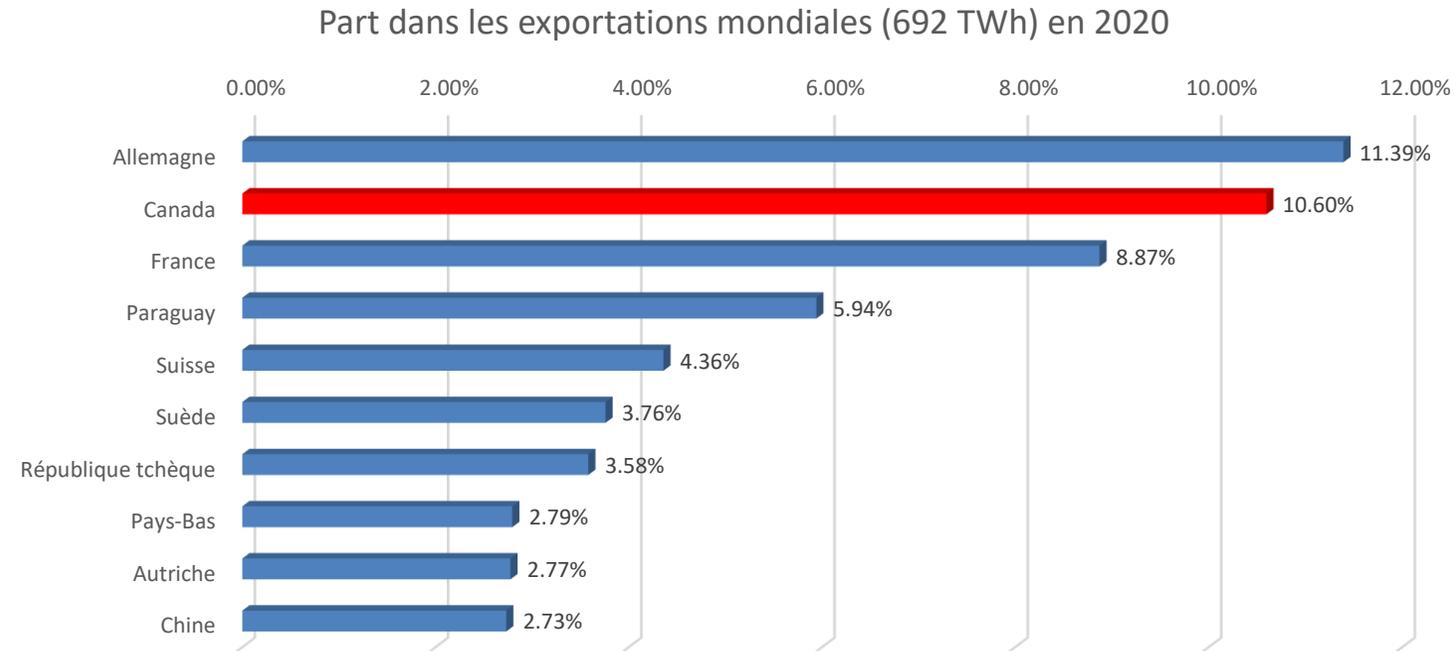
- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- ***Interconnexion***
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Interconnexion : généralités

- Il doit toujours exister un équilibre entre la puissance générée et la puissance consommée => l'exportation et l'importation des pays voisins permet d'assurer cet équilibre. C'est le rôle des **ISO** (Independent System Operator) et **RTO** (Regional Transmission Organizations) ou de **la société d'État** de faire respecter cet équilibre.
- L'interconnexion nationale permet de faire face aux épisodes de fortes consommations. Le Texas, énergétiquement indépendant et non relié au réseau électrique national, n'a pas pu en profiter lors des pics de consommation de février 2021.
- Le stockage n'est pas encore viable économiquement et la demande ne peut être repoussée.

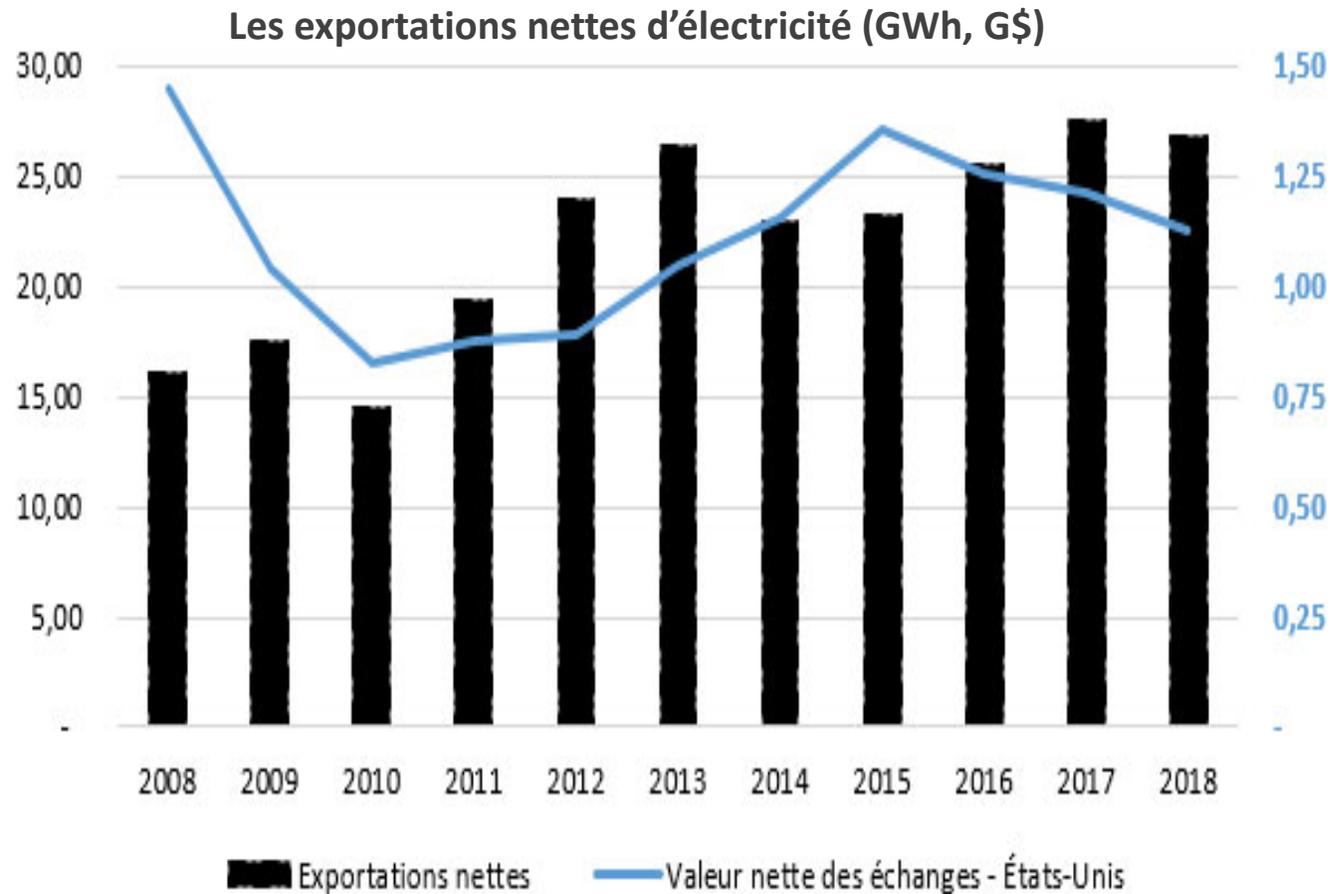
# Interconnexions : le cas du Canada

- Au début des années 1990, les frontières pour l'électricité ont ouvert en Amérique du Nord.
- L'industrie canadienne a dû se plier aux règles de la Federal Energy Regulatory Commission pour continuer à exporter son électricité, le marché étant plus lucratif aux US (=> segmentation d'Hydro-Québec).



- C'est notamment pour cette raison que le Canada exporte massivement son électricité aux États-Unis, ce qui le place au deuxième rang des exportateurs dans le monde.

# Interconnexions : le cas du Canada

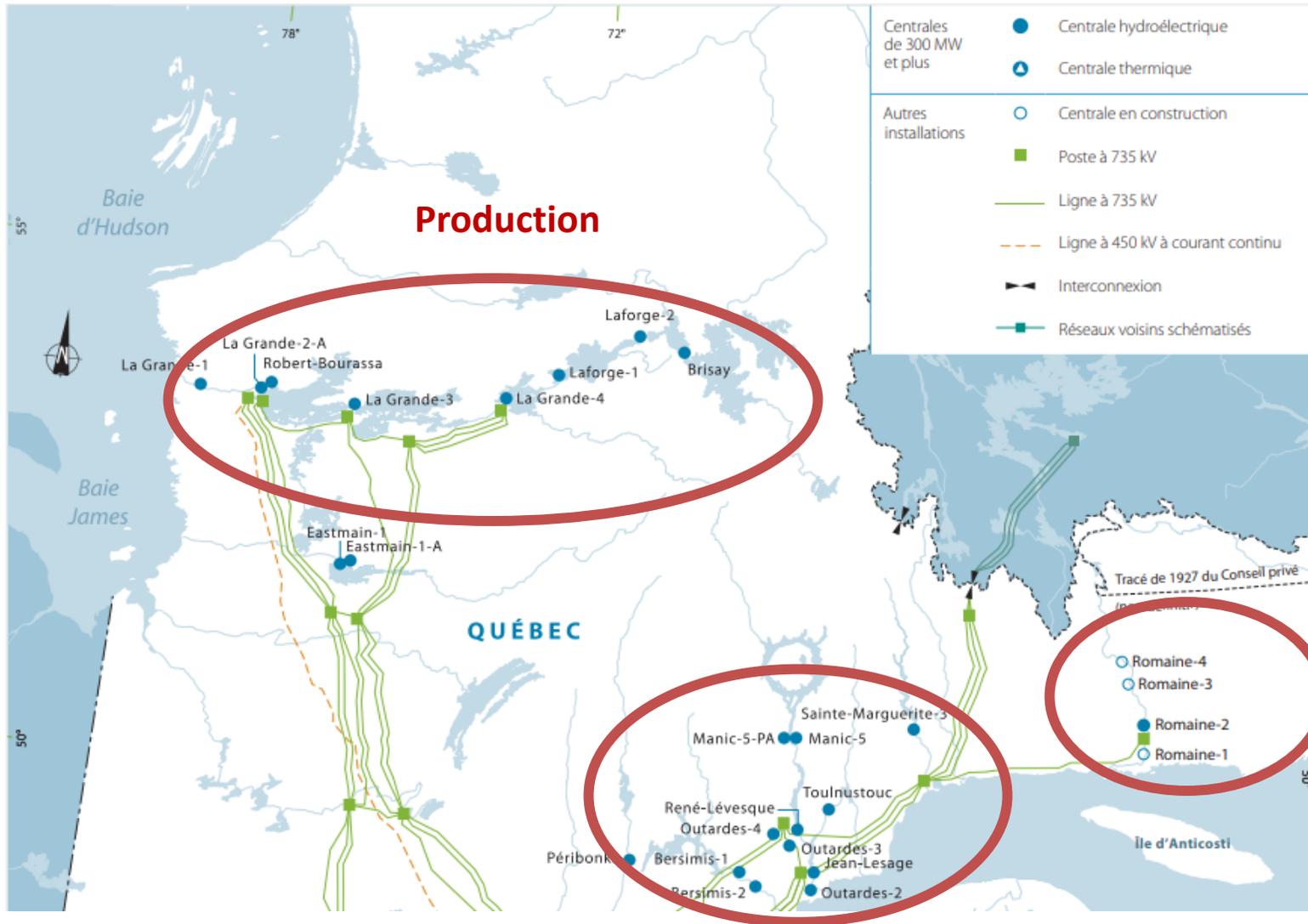


Note : La valeur nette des échanges correspond à la différence entre la valeur des exportations et des importations.

Source : Statistique Canada, Données sur le commerce en direct

- Les exportations entre 2008 et 2018 sont passées d'un peu plus de 16 GWh à un peu moins de 27 GWh.
- Les faibles prix des sources énergétiques (gaz) ont poussé le prix de l'électricité vers le bas sur les marchés. Malgré une augmentation des exportations nettes, l'impact sur la valeur nette des échanges avec les États-Unis reste similaire..
- Le prix moyen des importations est passé de près de 6 ¢/kWh en 2008 à 13 ¢/kWh en 2018.

# Interconnexions : le cas du Québec



- Réseau 735 kV AC
  - La plupart des lignes en triphasé, certaines en monophasé
- 1 ligne 450 kV DC qui relie la production à la Nouvelle-Angleterre :
  - Le DC est utile pour les très longues distances

# Interconnexions : le cas du Québec



# Interconnexions : le cas du Québec

- Les différentes connexions du Québec avec ses voisins

Réseaux voisins	Quantité	Mode importation (MW)	Mode exportation (MW)
Nouveau-Brunswick	3	785	1 200
Ontario	8	1920	2 705
New York	2	1100	1 999
Nouvelle-Angleterre	3	2170	2 342
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>5975</b>	<b>8 212</b>

# Interconnexions : projets dans le monde

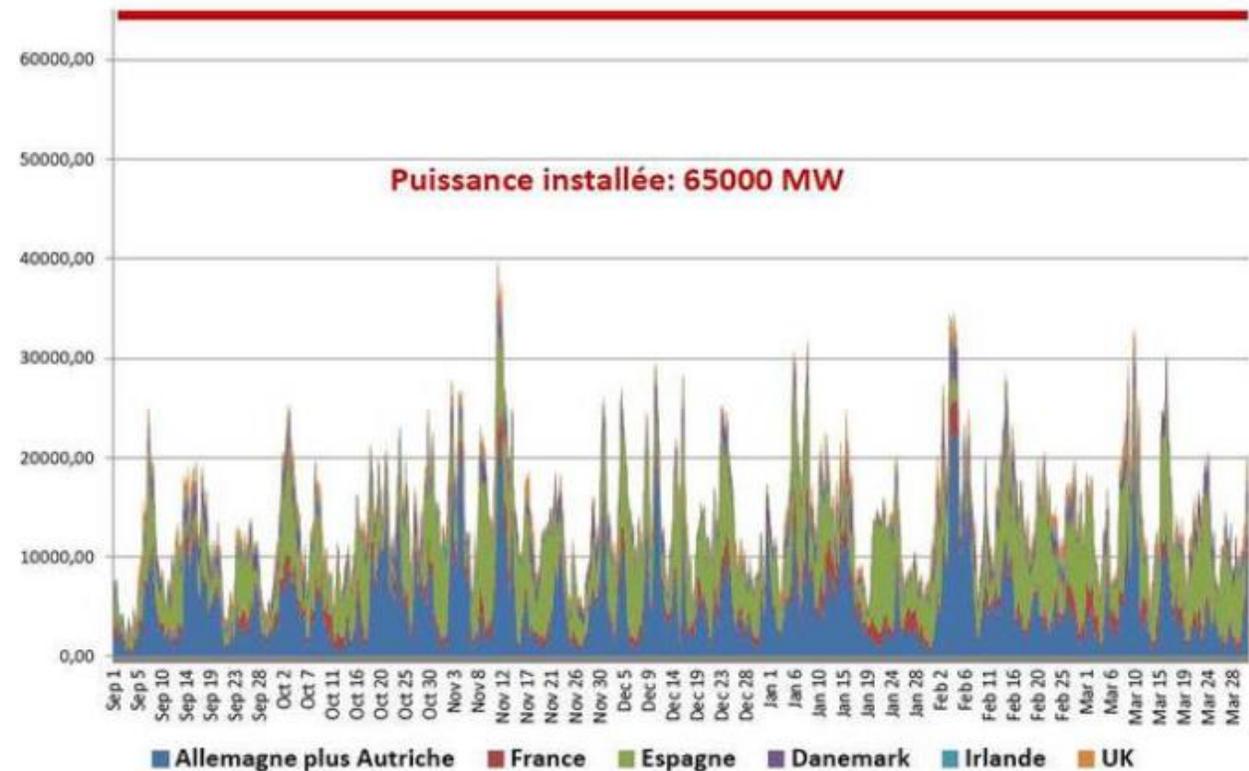
- Le réseau européen est l'un des plus vastes du monde avec plus de 300 000 km de lignes. Cette interconnexion devrait croître avec la volonté d'atteindre une interconnexion minimale de 15 % de la capacité installée de production dans chaque État membre d'ici 2030.
- Projet Celtic entre la France et l'Irlande (575 km de lignes) afin de mettre fin à l'isolement électrique de l'Irlande avec l'Europe continentale.
- Projet d'interconnexion mondiale d'ici 2070 imaginé par le président chinois Xi Jinping. Ce projet semble pour le moment utopique au regard des contraintes techniques, économiques et géopolitiques. Le coût du projet est évalué à 38 000 milliards de dollars.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- ***Foisonnement***
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Foisonnement spatial

- Il existe deux types de foisonnement. Le foisonnement spatial consiste à réduire les fluctuations temporelles de la production électrique intermittente par la dispersion géographique des sites de production.
- Ce type de foisonnement est notamment permis par l'interconnexion entre pays frontaliers.
- Il est toutefois nécessaire de disposer de ressources permettant une production constante sur une longue période et c'est sur ce point que les avis divergent dans la communauté scientifique.

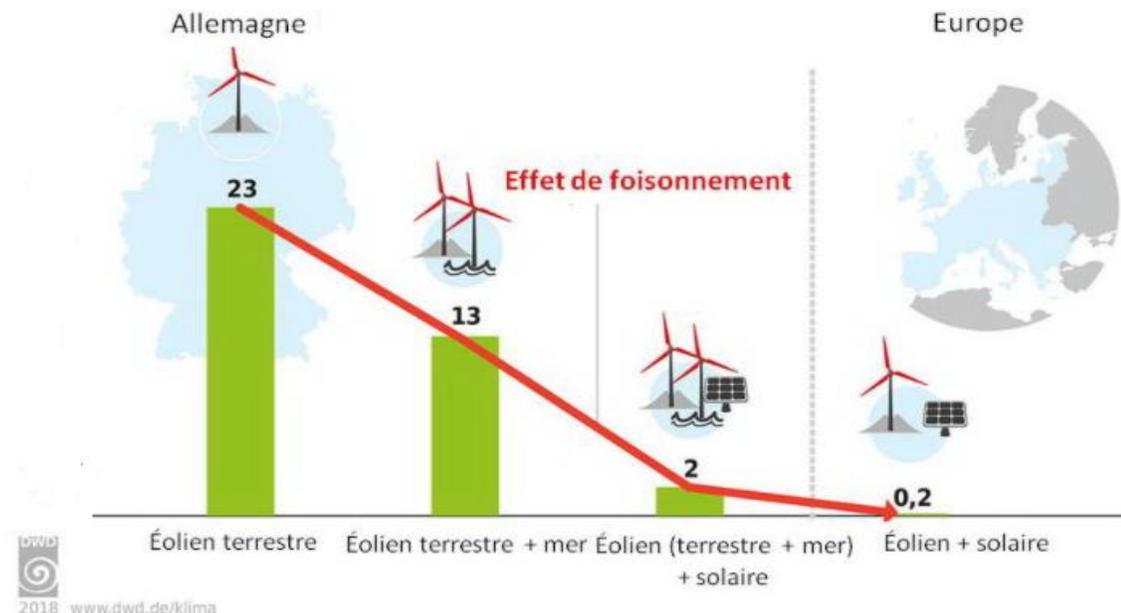


Jancovici, J. M. (2017). Pourrait-on alimenter la France en électricité uniquement avec de l'éolien ? <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/pourrait-on-alimenter-la-france-en-electricite-uniquement-avec-de-leolien/>

La vision de Jancovici toujours aussi cinglante sur le foisonnement : <https://www.youtube.com/watch?v=Hr9VIAM71O0#t=31m05s>

# Foisonnement technologique

- Le foisonnement technologique consiste à coupler les productions de différentes EnRI dans le but de compenser leur intermittence.
- La production issue du solaire PV (majoritaire le jour) et celle de l'éolien (majoritaire la nuit) en est un exemple.
- L'ajout de l'éolien maritime favorise ce type de foisonnement avec son facteur de charge plus important.
- Nombre de cas annuels où la production moyenne est passée sous la barre des 10 % de la capacité installée pendant 48h entre 1995 et 2005 en Allemagne et en fonction du foisonnement technologique :



Deutscher Wetterdienst. (2018). Réduction des risques (liés à la météo) concernant la production d'électricité grâce à l'utilisation combinée de l'éolien et du photovoltaïque.

# Plan de cette présentation

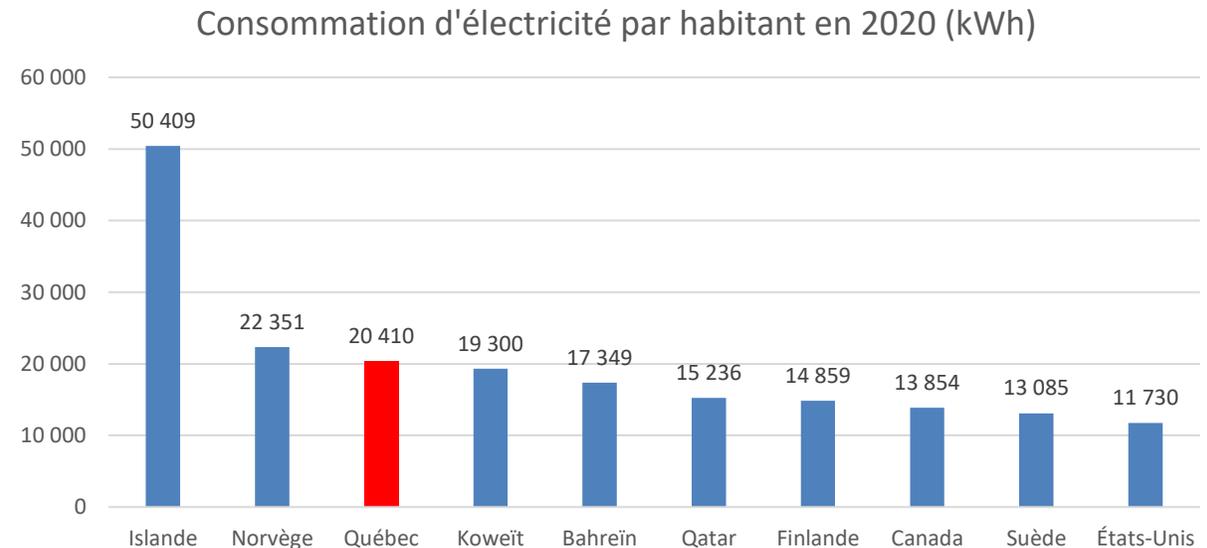
- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- ***Effacement de consommation***
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Effacement de consommation

- Il peut être demandé aux grands groupes industriels de diminuer leur consommation lors de heures de forte demande.
- Possibilité de le faire avec les consommateurs.
- La consommation peut être annulée (baisse du chauffage) ou reportée (utilisation d'appareils électroménagers lors des heures creuses).
- Changement majeur de philosophie du consommateur qui aujourd'hui consomme quand il veut : qu'en est-il de l'acceptabilité sociale d'une telle mesure.
- Évolution du réseau vers les Smart-grid : nécessite des compteurs communicants avancés, c'est-à-dire pouvant arrêter ou lancer la consommation de certains appareils selon la production électrique du moment.

# Effacement de consommation

- Le Québec est l'un des plus gros consommateurs d'électricité par habitant au monde. Un québécois consomme en moyenne 3 fois plus d'électricité qu'un français et près de 2 fois plus qu'un américain. Cela peut s'expliquer par :
  - Le climat
  - Le chauffage électrique est très répandu
  - Beaucoup d'industries consommatrices d'électricité (alumineries et les papetières)
  - Des tarifs faibles
- Toutefois l'effacement de consommation pour des territoires dont l'électricité est majoritairement issue de centrales géothermiques ou hydroélectriques (Islande, Norvège, Québec...) n'a pas réellement d'intérêt environnemental, car les mix électriques sont d'ores et déjà proches du 100 % renouvelable. Cela peut cependant permettre d'éviter des black-out.



# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- ***Surproduction***
- Flexibilité des moyens de production
- Conclusion

# Surproduction

- À l'heure actuelle, les parcs de production d'électricité sont légèrement surdimensionnés pour faire face aux fortes demandes (notamment l'hiver).
- Cette solution permet de diminuer la capacité de stockage nécessaire pour assurer l'équilibre du réseau.
- Dans son rapport sur la possibilité d'un mix français 100 % renouvelable, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) évoque une surproduction inévitable de 14 % due aux moyens de production principalement non pilotables de la filière renouvelable.
- La surproduction induit toutefois une augmentation significative des coûts de production issue des EnRI. Cette augmentation est plus rapide que la baisse des coûts liés au stockage. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre capacité de surproduction et capacité de stockage.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- ***Flexibilité des moyens de production***
- Conclusion

# Question

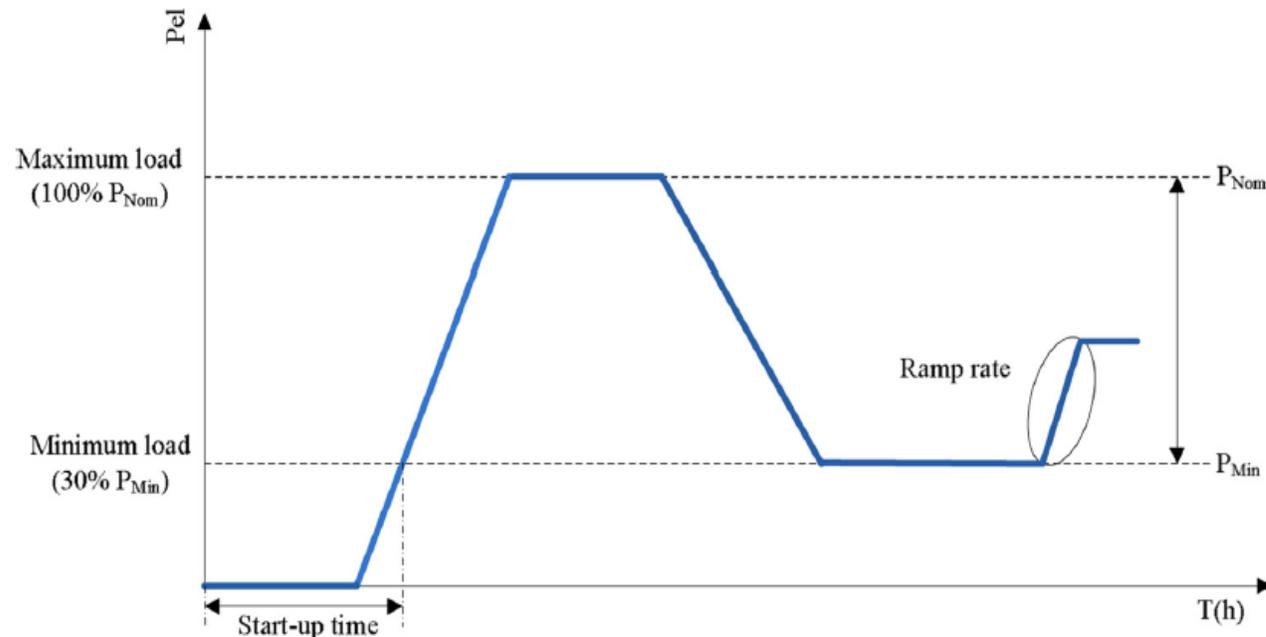
- Lesquelles de ces technologies pilotables sont les plus flexibles ?
  - A. Les centrales nucléaires
  - B. Les centrales hydroélectriques avec réservoirs
  - C. Les centrales à charbon
  - D. Les centrales à gaz
  - E. Les centrales à fioul



ENR2020

# Flexibilité des moyens de production

- Les différents moyens de production pilotables sont aujourd'hui principalement utilisés en base des mix électriques (hydroélectricité au Québec, nucléaire en France, charbon en Chine...) et vont devoir s'adapter à l'intégration des EnRI au réseau.
- Les paramètres de flexibilité diffèrent selon les moyens de production pilotables, ce qui rend donc plus ou moins aisée l'intégration des EnRI.



Dong, Y., Jiang, X., Liang, Z., & Yuan, J. (2018). Coal power flexibility, energy efficiency and pollutant emissions implications in China : A plant-level analysis based on case units. *Resources, Conservation & Recycling*, 134, 184-195.

# Flexibilité des moyens de production

- **Le taux de montée en charge** (*Ramp rate*) caractérise la vitesse moyenne à laquelle la puissance de sortie du moyen de production peut varier (augmentation ou diminution).

$$\text{Rampe} = \frac{\Delta P_{\text{Net}}}{\Delta t}$$

$\Delta P_{\text{Net}}$  est l'augmentation de puissance à partir d'un niveau de puissance de référence à atteindre en un intervalle de temps  $\Delta t$ . Ce paramètre s'exprime en pourcentage de puissance nominale par heure (ou par minute).

- **Le temps de démarrage après arrêt** (*Start-up time*) est le temps mis par l'unité de production pour passer d'une puissance nulle à sa puissance minimale de fonctionnement. Cette durée dépend de l'état de l'unité au moment du redémarrage. Le démarrage peut se faire à chaud, à tiède ou à froid.

# Flexibilité des moyens de production

- **La charge minimale** (*Minimum load*) correspond à la puissance minimale permettant une production stable et s'exprime en pourcentage de la puissance nominale  $P_{Nom}$ .
- **Le facteur de disponibilité** doit être pris en compte dans l'étude de la flexibilité d'un moyen de production. Un faible taux de disponibilité (maintenance, coupures...) est préjudiciable pour le suivi de charge.

		Taux de montée en charge (%Pnom/hr)	Facteur de charge minimal (%Pnom)	Facteur de disponibilité (%)
Centrales nucléaires	Bases	2	50	70 en moyenne (dépend des mois)
	Flexibles	20	20	
Centrales hydroélectriques	Au fil de l'eau	Non pilotable		
	Avec réservoirs	100	0	90
Centrales à charbon	Conventionnelles	30	40	85
	Nouvelle génération	60	30	
Centrales à gaz	Cogénération	Non pilotable		
	Cycle combiné	60	0	90
Centrales à fioul	Bases	40	1	85

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Prévisions météorologiques
- Interconnexion
- Foisonnement
- Effacement de consommation
- Surproduction
- Flexibilité des moyens de production
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Comme évoqué dans l'introduction, cette présentation n'est pas exhaustive. Le cas du stockage n'est pas étudié car un module entier y est consacré (M17 : Stockage).
- D'autres alternatives, comme l'effacement des productions éoliennes et solaires, permettent de limiter les écarts entre production et consommation, mais ne sont pas suffisamment développées.
- Ces solutions permettent de favoriser l'intégration des EnRI dans les réseaux électriques basés sur des moyens de production pilotables non-renouvelables, mais ne permettent pas d'atteindre un mix 100 % renouvelable. Avec les méthodes actuelles d'intégration, les mix 100 % renouvelable sont atteignables seulement pour les mix basés sur des technologies pilotables renouvelables (géothermie, hydraulique).



**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

