

## 10. Les énergies renouvelables

### *10.2 - Les technologies de captation et de conversion*

#### *Partie 2 – Énergie éolienne*

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

*Département de génie mécanique*

Pierre-Luc Paradis, ing. Ph.D.

Tanguy Lunel, ing., M. Sc. A.

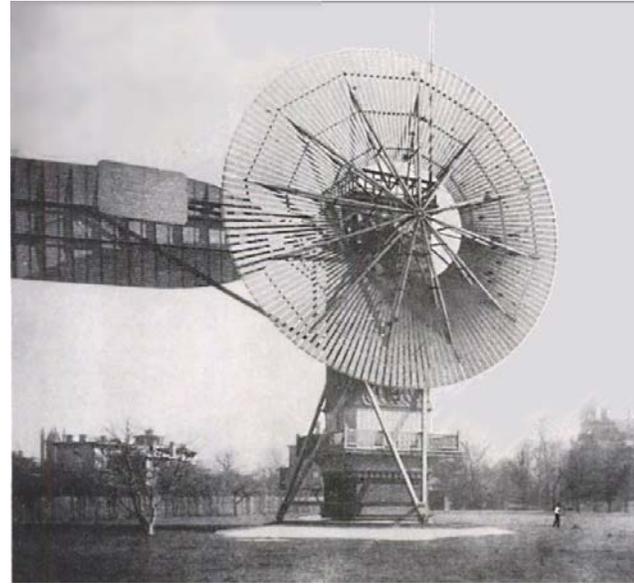
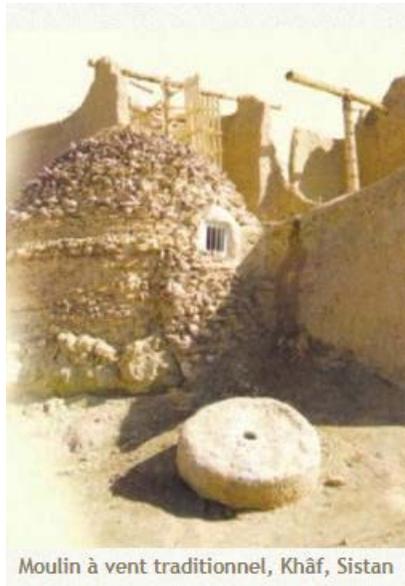
# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Les technologies de captation et de conversion***
  - L'énergie éolienne
    - Histoire
    - Types, taille, durée de vie
    - Mécanique, puissance et aérodynamique
    - Impact et ressource éoliens
    - Le Canada et le Québec éoliens
- Conclusion

# L'énergie éolienne

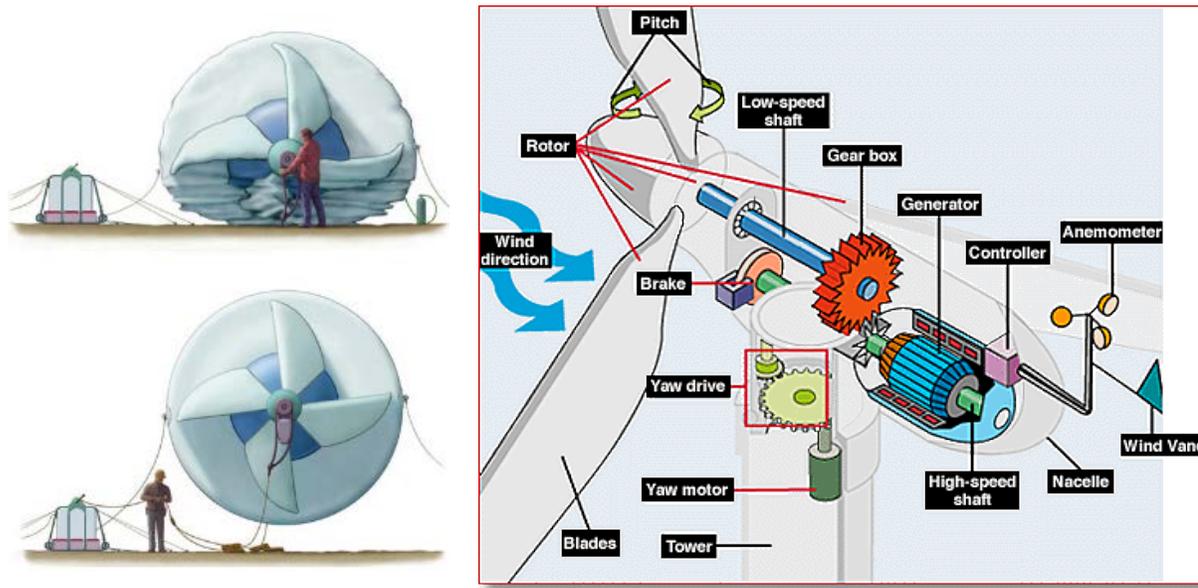
- Histoire

- Une capsule est disponible pour présenter brièvement les principaux jalons de l'histoire du développement de l'énergie éolienne

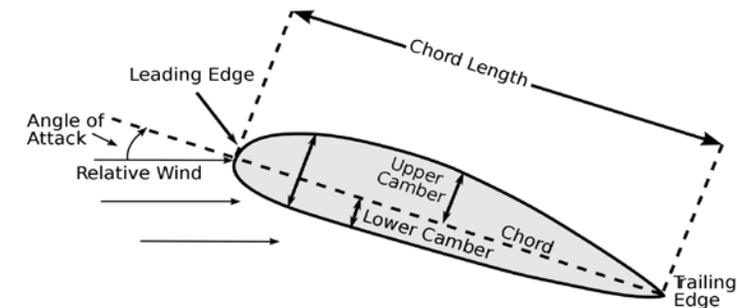


# L'énergie éolienne

- Types, mécanique, puissance et aérodynamique
  - Des capsules sont disponibles pour présenter brièvement les principaux éléments qui permettent ensuite d'approfondir cette présentation

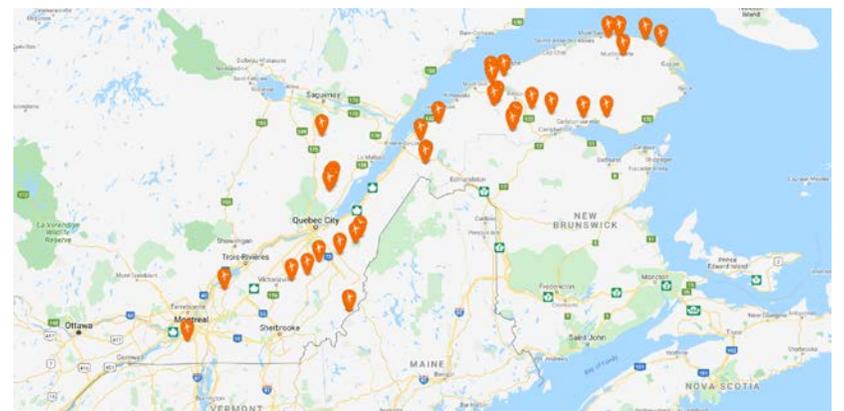
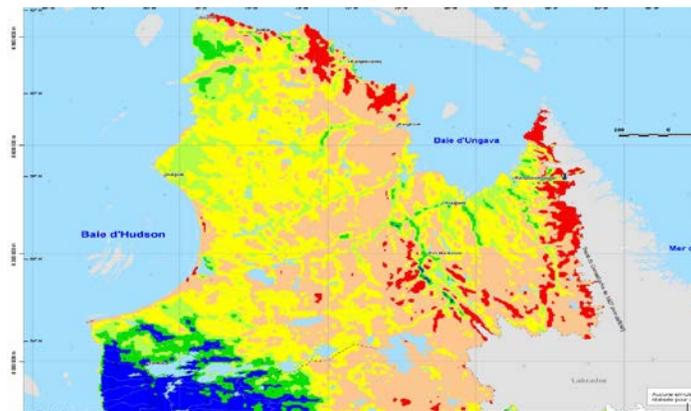


$$\eta_{\max} = 4 \left( \frac{2}{3} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{2}{3} \right) \right] = \frac{16}{27} = 59,3\%$$



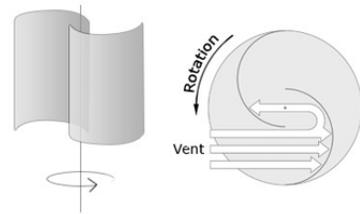
# L'énergie éolienne

- Impact, ressource et le Québec éolien
  - D'autres capsules ont été élaborées, pour compléter une introduction à l'énergie éolienne

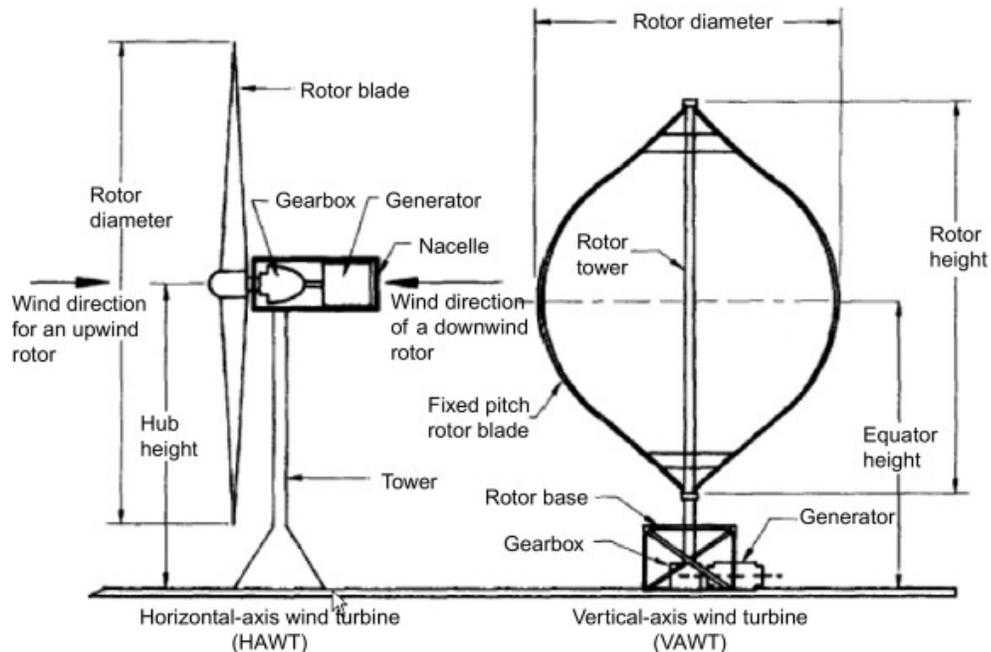


# L'énergie éolienne

- Les différents types

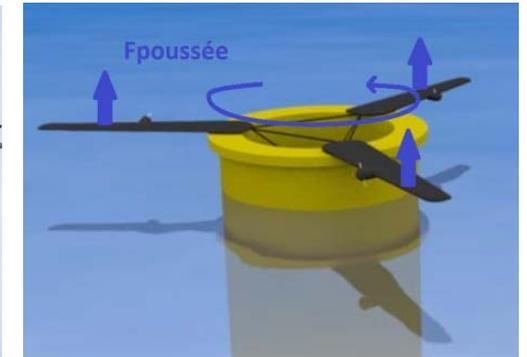
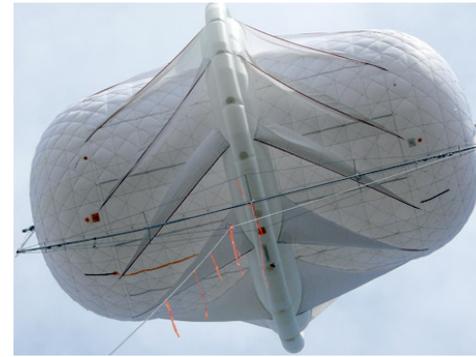


1 pale  
2 pales  
3 pales  
x pales



Éolienne à axe horizontal

Éolienne à axe vertical



Éoliennes aéroportées

# L'énergie éolienne

- Les autres éoliennes
  - Les cerfs-volants de traction



Source: The Economist, 2011-04-30

<http://www.skysails.info/english/>

# L'énergie éolienne

- Les autres éoliennes
  - Les [cargos](#) éoliens

Source: Révolution énergétique, 2020-10-16



La compagnie maritime suédoise Wallenius Marine propose une solution innovante pour réduire la pollution générée par les cargos transatlantiques : le transporteur Oceanbird, propulsé uniquement (?) par le vent.

# L'énergie éolienne

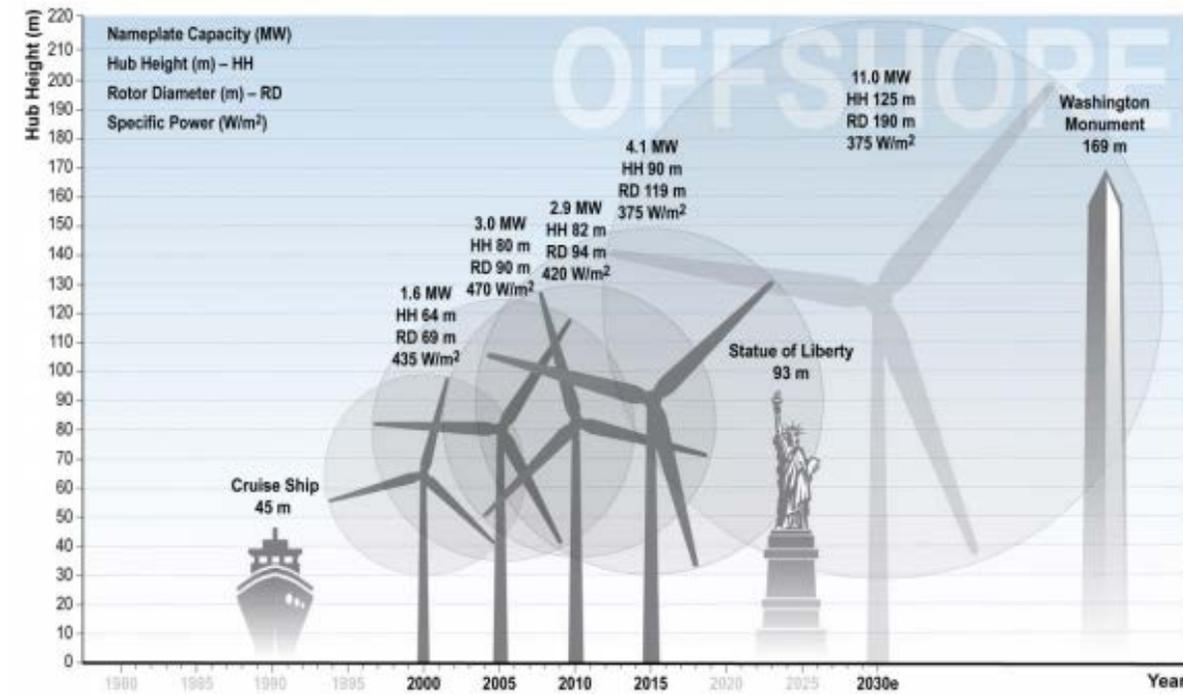
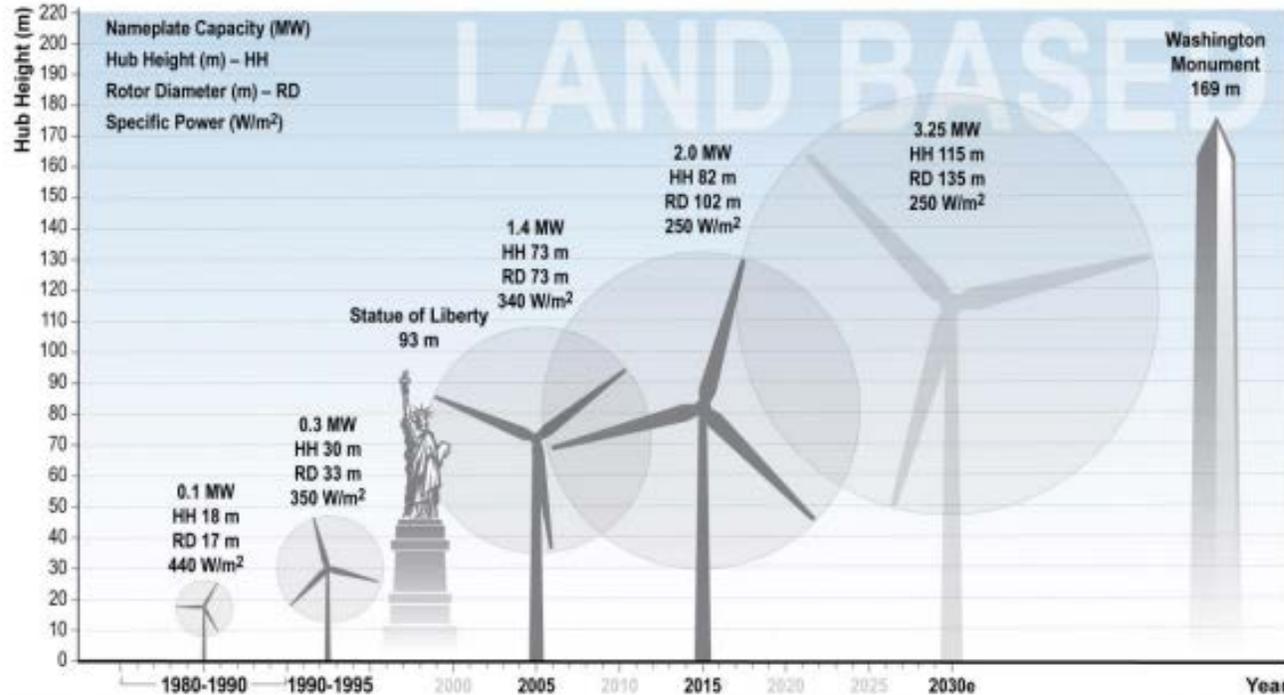
- La taille

November 2016

## Reducing Wind Energy Costs through Increased Turbine Size: Is the Sky the Limit?

Berkeley Lab study shows significant potential for further turbine scaling

*Ryan Wiser, Maureen Hand, Joachim Seel, Bentham Paulos*



# L'énergie éolienne

- La taille

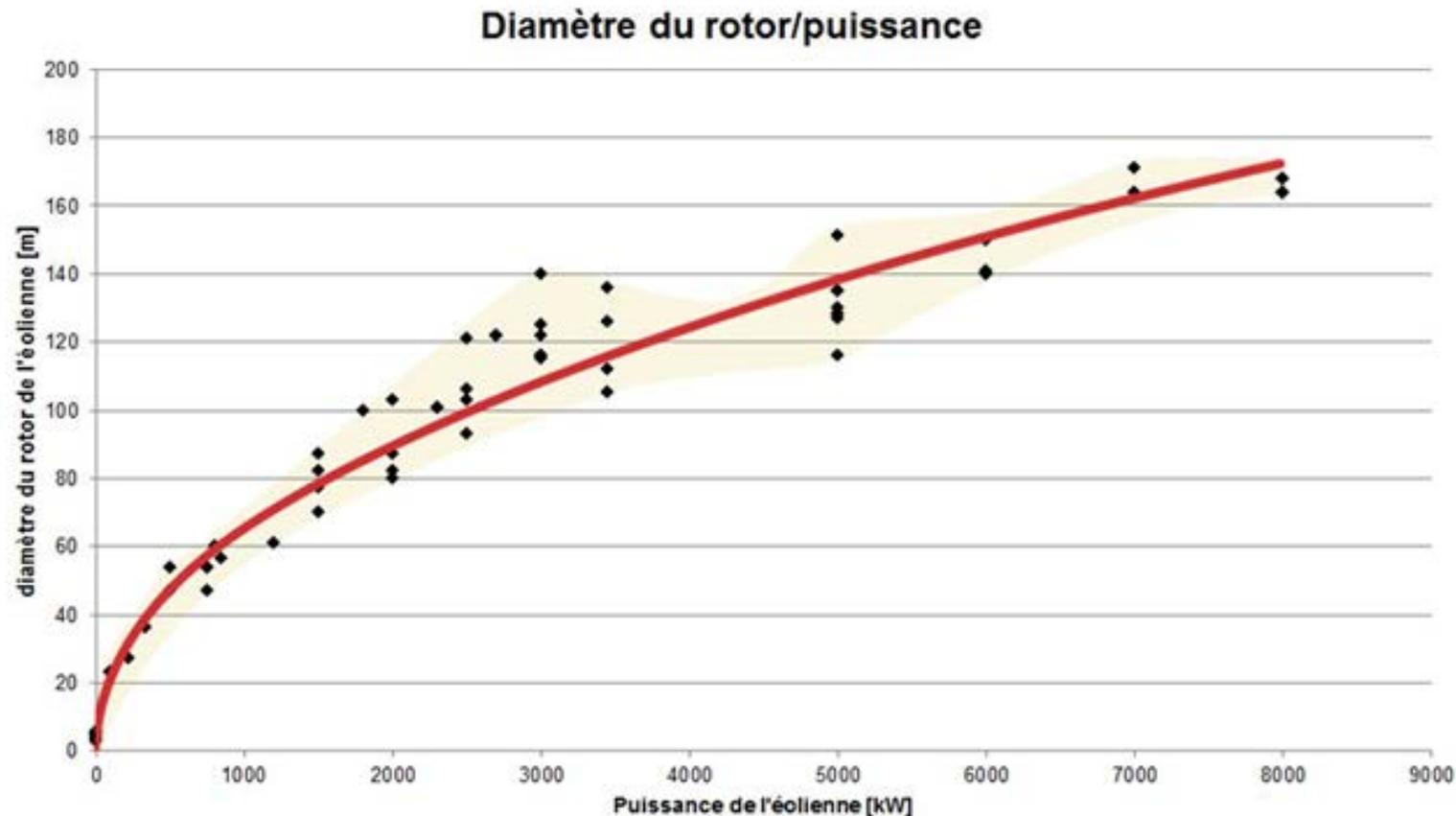


Diagramme illustrant le rapport entre le diamètre du rotor et la puissance maximale de l'éolienne :  
Réalisé à partir des fiches techniques de 62 modèles d'éoliennes récentes

<https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>

# L'énergie éolienne

- Les grandes éoliennes
  - La plus grande croissance pendant plus de 10 ans, mais la croissance solaire la surpasse depuis peu.



# L'énergie éolienne

- La durée de vie
  - Ce qui détermine la durée de vie pourrait être le moteur mais c'est plutôt, la structure (bien que l'électronique puisse flancher aussi).
  - En fatigue on a un nombre total de cycles déterminé par :

$$N_L = 60kn_{rotor}H_{op}Y$$

Avec :

$k$  : nombre de cycles par révolution du rotor

$n_{rotor}$  : vitesse de rotation du rotor [rpm]

$H_{op}$  : heures d'opérations par an

$Y$  : nombre d'années d'opérations

- Pour un cycle par RPM, 20 RPM, 5000h/an et une durée de vie estimée de 30 ans, quel serait le nombre de cycles correspondant?

# L'énergie éolienne

- Rentabilité

- Combien d'heures une éolienne doit-elle fonctionner par an afin d'être rentable?

- Aujourd'hui, il faut un facteur de charge ou d'utilisation de 30% minimum.

$$FU = \frac{E}{E_{\max}}$$

Avec  $E$  = énergie annuelle produite et  $E_{\max}$  = Puissance max \* 8760h

- Le FU ne correspond pas au rapport des heures de fonctionnement sur 8760 heures. Car il y a par exemple des heures où il FAUT arrêter l'éolienne. Mais un bon estimé consiste à employer un taux de charge à puissance nominale qui oscille entre 1500-3500 heures/an alors que l'éolienne doit fonctionner près 6000 heures (certainement pas toutes à puissance nominale) pour être rentable.

# L'énergie éolienne

- Rentabilité

- La puissance cinétique de l'air qui impacte l'éolienne est proportionnelle à sa vitesse au cube. Comparons trois journées où la moyenne de vitesse est de 6 m/s sur une surface unitaire.



$$\text{Jour1 : } \frac{1}{2} 24 \text{ [h]} \times 6 \text{ [m/s]}^3 \times 1 \text{ [m}^2\text{]} \times 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 3\,110 \text{ Wh} \approx 3 \text{ kWh}$$



$$P_{\text{max,cinétique}} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \text{Jour2 : } \frac{1}{2} 12 \text{ [h]} \times 12 \text{ [m/s]}^3 \times 1 \text{ [m}^2\text{]} \times 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 12\,441 \text{ Wh} \approx 12 \text{ kWh}$$



$$\text{Jour3 : } \frac{1}{2} 6 \text{ [h]} \times 24 \text{ [m/s]}^3 \times 1 \text{ [m}^2\text{]} \times 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 49\,766 \text{ Wh} \approx 50 \text{ kWh}$$

Lorsque la vitesse double avec autres paramètres invariables, la puissance est multipliée par 8.

# L'énergie éolienne

- Des limites théoriques

- Puissance cinétique de la veine d'air

$$P_{\max, \text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

- Puissance maximale pouvant être extraite (limite de Betz)

$$P_{\max, \text{extraite}} = \frac{16}{27} P_{\max, \text{cinétique}}$$

- Puissance réelle maximale disponible

$$P_{\max, \text{disponible}} = \frac{16}{27} \eta_{\text{ele}} \eta_{\text{mec}} P_{\max, \text{cinétique}}$$

- Puissance réelle (le facteur 16/27 est un maximum)

$$P_{\text{disponible}} = C_P \eta_{\text{ele}} \eta_{\text{mec}} P_{\max, \text{cinétique}}$$

# L'énergie éolienne

- Des limites théoriques (Betz)
  - Quelle peut être la puissance maximale développée par une éolienne de 1,2m de diamètre lorsqu'elle est exposée à un vent de 18 km/h (on supposera que la densité est de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ )?
  - Quelle doit être la vitesse du vent pour produire 1400 W?
  - Que faut-il spécifier en plus comme information pour être en mesure de déterminer la puissance réelle de l'éolienne?

# L'énergie éolienne

- Impacts

- Économiques

- Structure de coûts (production, support de puissance et équilibrage, pertes en transport et en distribution)
    - GES, développement régional et emplois, coût des risques, R&D
    - Politiques énergétiques
    - Facturation

- Environnementaux

- Bilan énergétique
    - Faune (oiseaux et chauve-souris, surtout)
    - Flore (on doit dégager les aires d'implantation tant au sol que dans les fonds marins)
    - Bruit

# L'énergie éolienne

- Impacts
  - Sociaux
    - Visuel
    - Ombre ondulante (cyclique lorsqu'à proximité les jours de soleil)
    - Inégalités coût-bénéfice.
  - Autres impacts
    - Faible densité de puissance par km<sup>2</sup>
    - Interférences électromagnétiques
    - Aviation militaire
    - Projection de glace.

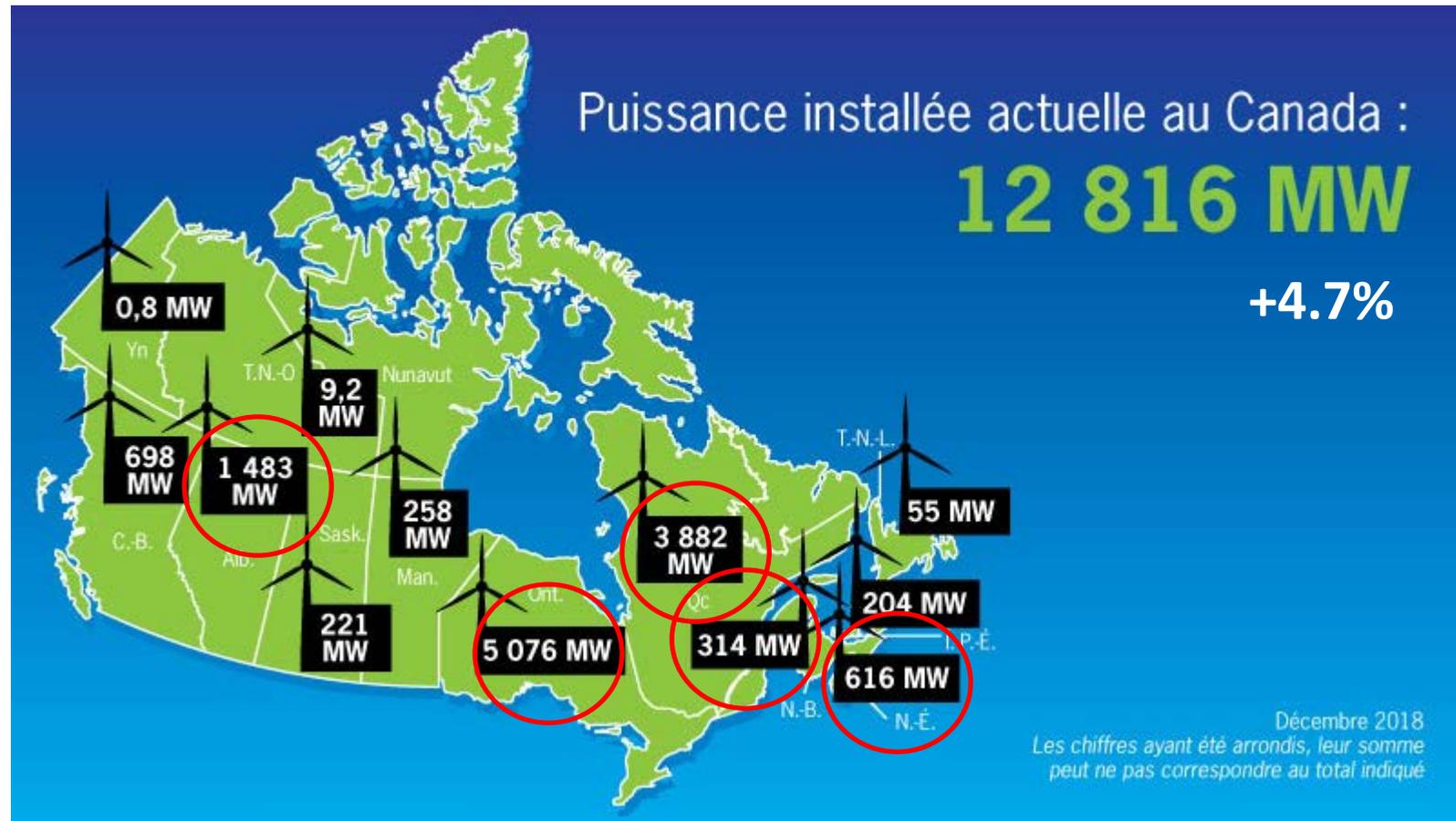
# L'énergie éolienne

- Puissance éolienne au Canada
  - En 2000, lorsque CanWEA s'est fixé comme objectif d'atteindre 10 000 MW de puissance éolienne au pays, nous n'en étions qu'à 137 MW de puissance installée.
  - En mai 2015, le Canada est devenu l'un des sept pays au monde à franchir le cap des 10 000 MW.

# L'énergie éolienne

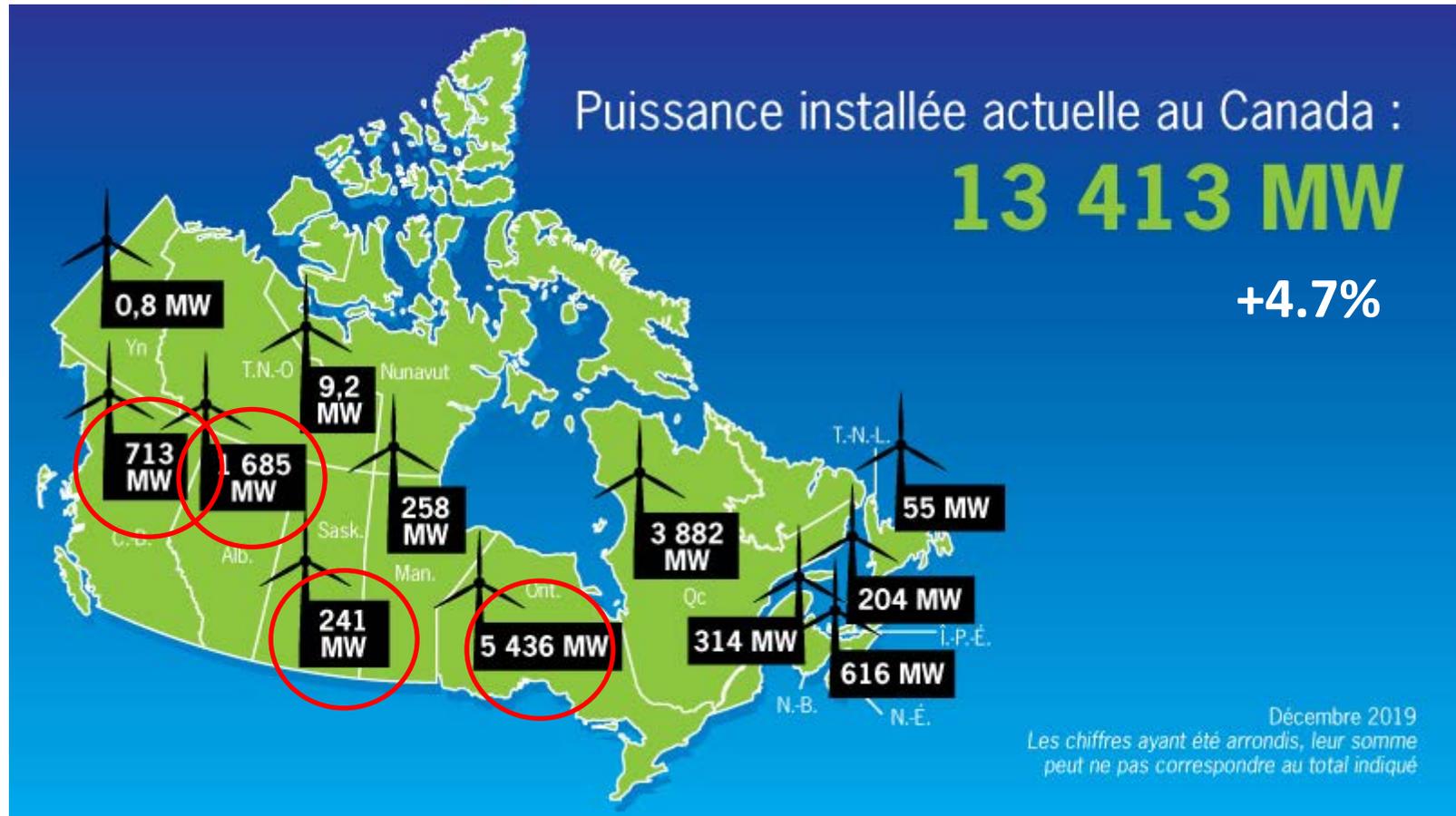
- Puissance éolienne au Canada
  - La puissance éolienne canadienne a d'ailleurs connu une hausse annuelle moyenne de 24 pour cent de 2011 à 2016, l'éolien représentant la principale source de nouvelle électricité au pays à cette époque.
  - La croissance est toujours là. Mais elle est moins forte.

# L'énergie éolienne



Consultez <http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/>

# L'énergie éolienne



Consultez <http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/>

# L'énergie éolienne

## L'éolien au Québec



Consultez <http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/>

# La technologie éolienne-solaire du futur



# La technologie éolienne-solaire du futur

- Avantages
- Inconvénients
- Rentabilité



ENR2020

# La technologie éolienne-solaire du futur

- Rentabilité
  - OPEX (sèche-linge):  $6000W \times 4 \text{ heures/sem} \times 0,1\$/kWh = 2,4\$/sem$
  - OPEX (corde à linge) : 0\$
  - Différence : 2,4\$/sem
  - CAPEX (corde à linge) : 48\$ (incluant deux poulies, une tendeur et une corde, modèle de luxe)
  - PRI :  $48/2,4 = 20 \text{ sem}$

# L'énergie éolienne

- Les défis de l'heure grandes éoliennes
  - L'opinion publique
  - Les oiseaux et les chauve-souris
  - L'impact visuel
  - Le bruit
  - Le gel

# L'énergie éolienne

- Les défis de l'heure petites éoliennes
  - L'acceptation
  - Le stockage
  - La fiabilité
- La rentabilité
  - Seuil de 10-100kW



# L'énergie éolienne

- Les défis de l'heure autres éoliennes
  - Le développement
  - L'efficacité
  - La fiabilité



Recherchez: The fascination of Kite power sur You Tube, 6:33

# L'énergie éolienne

- Les autres capsules de formation en énergie éolienne
  - Histoire de l'énergie éolienne
  - Types d'éoliennes
  - Mécanique éolienne
  - Puissance et aérodynamique
  - Impact des éoliennes
  - Ressource éolienne
  - Québec éolien





**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 et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

