

## 9. Rentabilité de l'énergie éolienne

### 9.2 Coûts et revenus d'un projet éolien



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Coûts d'un projet éolien
  - Investissement (CAPEX)
  - Opération (OPEX) et maintenance
- Revenus d'un projet éolien
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans le parc
  - Marché local de l'énergie
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- **Coûts d'un projet éolien**
  - Investissement (CAPEX)
  - Opération (OPEX) et maintenance
- **Revenus d'un projet éolien**
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans le parc
  - Marché local de l'énergie
- **Conclusion**

# Introduction et objectifs

- La rentabilité économique d'un projet éolien compare les coûts du projet dans sa globalité aux revenus auquel il est possible de prétendre.
- Les coûts sont divers et peuvent être d'installation, d'opération ou de maintenance. S'il est possible de les anticiper, ce n'est pas toujours le cas.
- Les revenus peuvent être ponctuels (subventions...) ou régulier (vente de la production...).
- Cette présentation fait un état des lieux non exhaustif des différents types de revenus et de coûts rencontrés dans un projet éolien.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Coûts d'un projet éolien***
  - Investissement (CAPEX)
  - Opération (OPEX) et maintenance
- Revenus d'un projet éolien
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans le parc
  - Marché local de l'énergie
- Conclusion

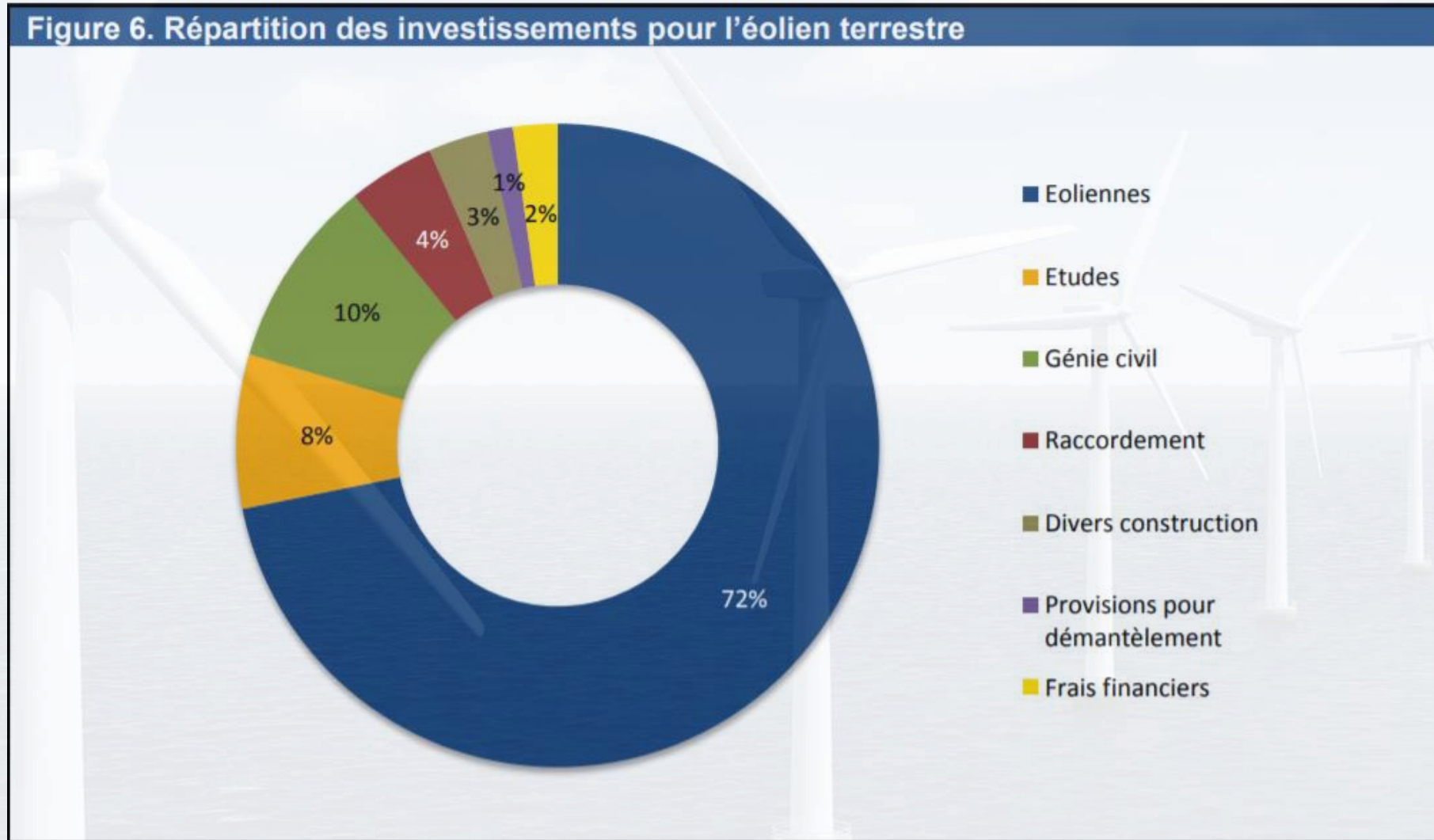
# Question

- Quels facteurs influencent le coût d'investissement d'un projet éolien ?
  - A. Le choix des turbines
  - B. La maintenance prédictive
  - C. La masse salariale d'exploitation
  - D. L'infrastructure routière du site
  - E. L'installation des éoliennes

# Coût d'un projet éolien : Investissement (CAPEX)

- Plusieurs éléments influencent les coûts d'investissement d'une centrale :
  - Les éoliennes
  - L'installation des éoliennes
  - L'infrastructure électrique
  - L'infrastructure routière
  - L'infrastructure de contrôle
- Ces coûts sont très variables selon les éoliennes et leur puissance.

# Coût d'un projet éolien : Investissement (CAPEX)



Cas des centrales éoliennes françaises.

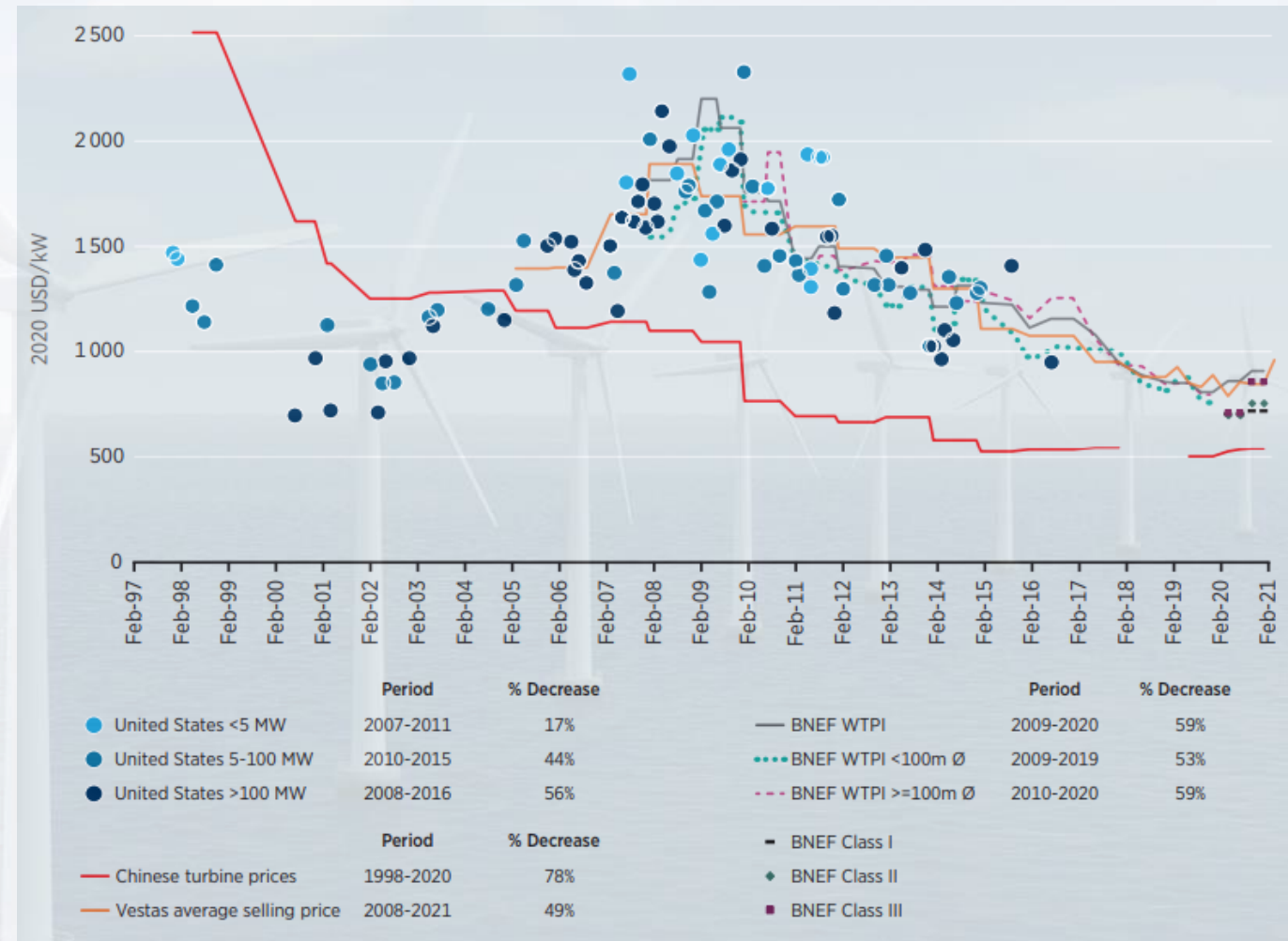
Source : Commission de régulation de l'énergie (CRE), Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine, 2014.

# Coût d'un projet éolien : Investissement (CAPEX)

## ❖ Coûts des éoliennes

- Le coût d'une turbine est généralement normalisé et s'exprime par kW de puissance nominale de la turbine.

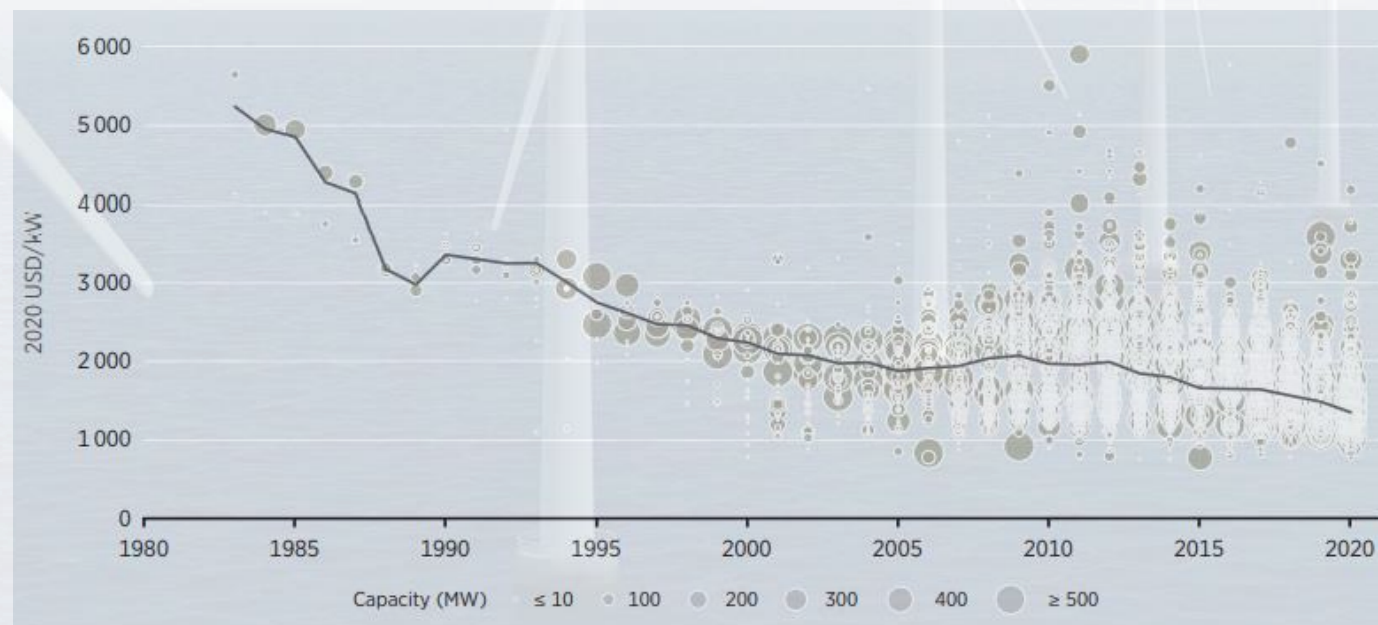
Source : IRENA, renewable power generation costs in 2020



# Coût d'un projet éolien : Investissement (CAPEX)

## ❖ Coûts d'installation

- Les coûts d'installation de la turbine s'expriment eux aussi par kW de puissance nominale de la turbine. Ces derniers décroît rapidement lors de la dernière décennie.



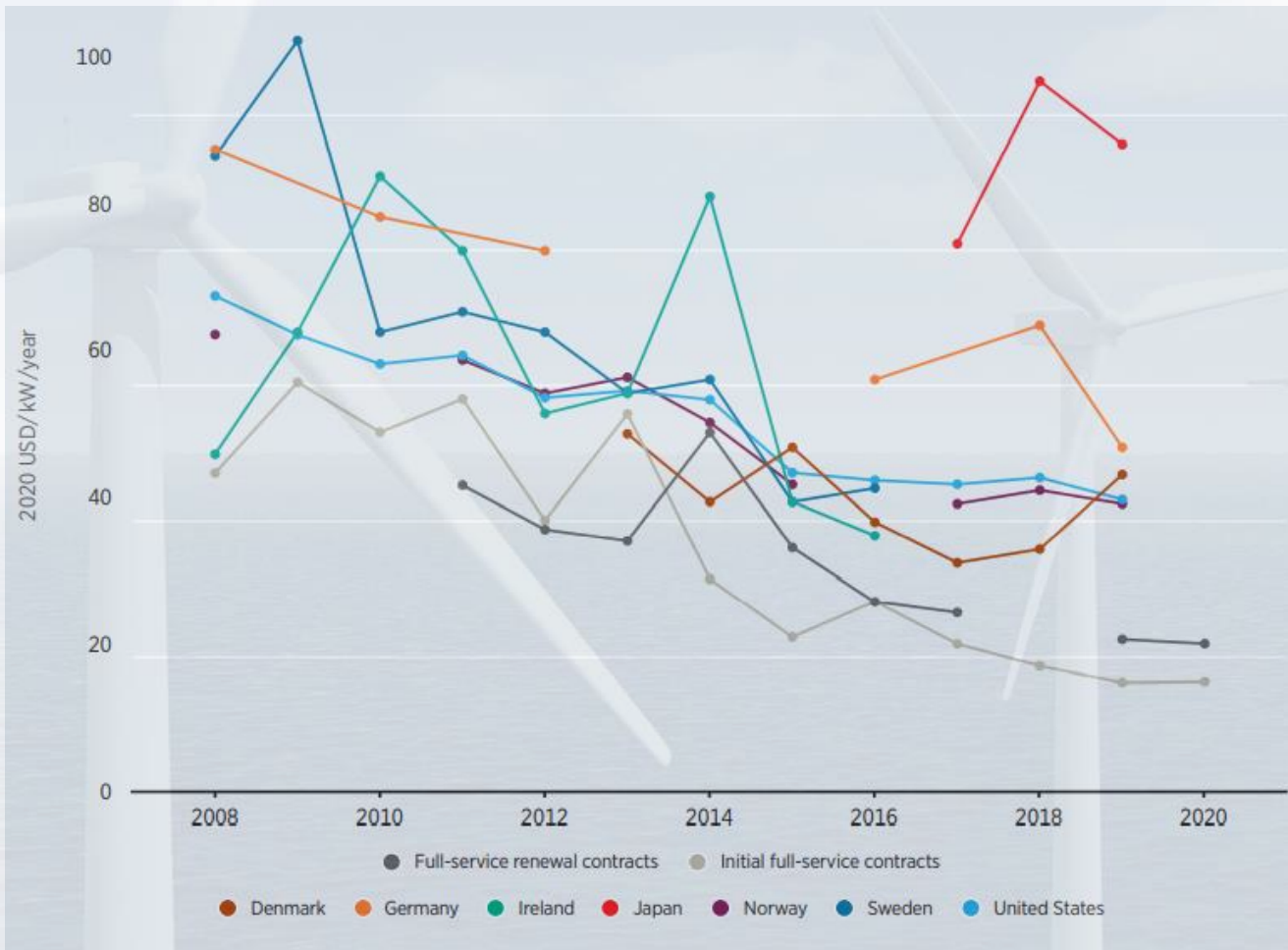
Source : IRENA, renewable power generation costs in 2020

# Coût d'un projet éolien : Investissement (CAPEX)

## ❖ Conditions de financement

- Coûts en capital important à verser au début du projet (à hauteur de 10 à 20%).
- Besoin de financement pour 80 à 90% du capital nécessaire.
- Sources de financement :
  - Banques (intérêts)
  - Investisseurs (retour sur l'investissement)

# Coût d'un projet éolien : Opération (OPEX) et maintenance



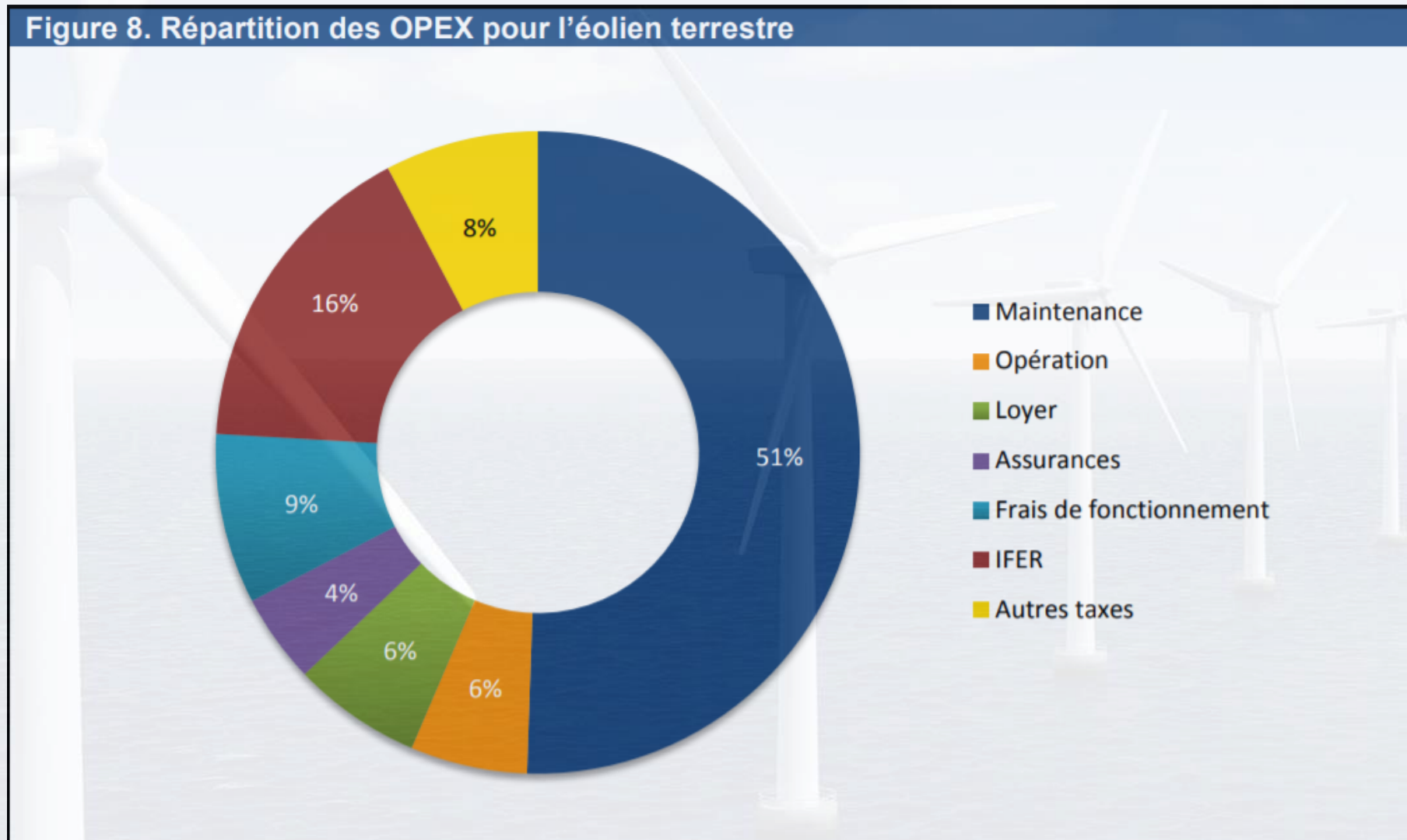
- Les coûts associés à l'opération du parc et à sa maintenance sont souvent exprimés en \$/kWh.
- Ils représentent entre 1,5 et 3% du coût des éoliennes par année.

Source : IRENA, renewable power generation costs in 2020

# Question

- Quelle est la part des coûts liés à la maintenance dans les coûts d'OPEX totaux ? (à 5 % près)
- A. 10 %
- B. 25 %
- C. 50 %
- D. 75 %
- E. 95 %

# Coût d'un projet éolien : Opération (OPEX) et maintenance



Cas des centrales éoliennes françaises.

Source : Commission de régulation de l'énergie (CRE), Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine, 2014.

# Plan de cette présentation

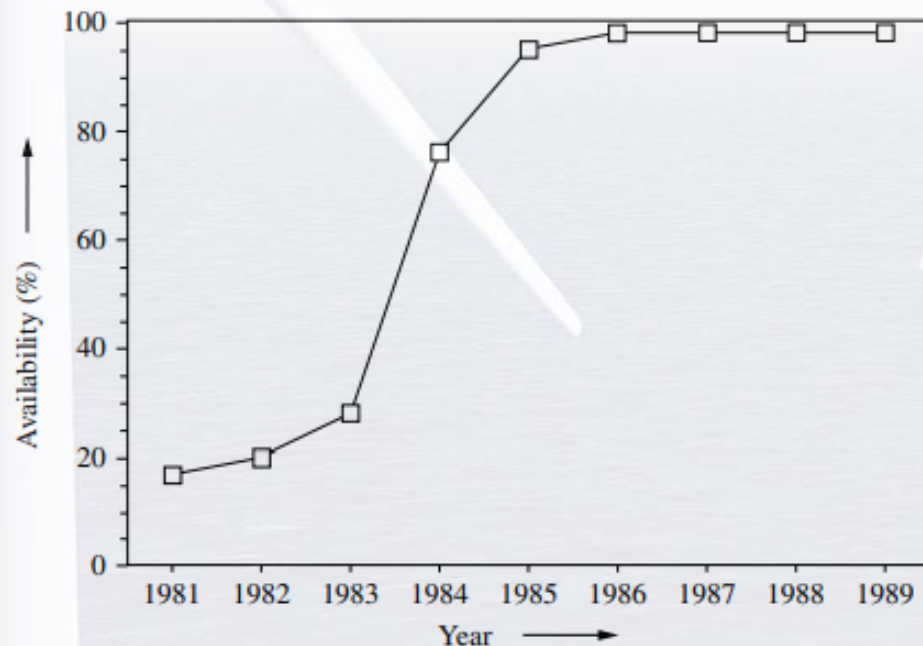
- Introduction et objectifs
- Coûts d'un projet éolien
  - Investissement (CAPEX)
  - Opération (OPEX) et maintenance
- ***Revenus d'un projet éolien***
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans le parc
  - Marché local de l'énergie
- Conclusion

# Revenus d'un projet éolien

- Facteurs déterminant les revenus potentiels :
  - Potentiel éolien du site (déjà abordé)
  - Rendement des machines (déjà abordé)
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans un parc
  - Marché local de l'énergie (prix de vente, coûts évités, crédit de capacité)
  - Crédits et subventions

# Revenus d'un projet éolien : Disponibilité des machines

- La disponibilité est la fraction de temps pendant laquelle l'éolienne est susceptible de produire de l'électricité.
- Cette fraction n'est presque jamais égale à 1 en raison des maintenances périodiques et des éventuels temps d'arrêt pour réparation.



- Pour obtenir des chiffres fiables, il est nécessaire de disposer de données pour un grand nombre de turbine sur une période de fonctionnement assez longue (cas des éoliennes en Californie dans les années 90).

# Revenus d'un projet éolien : Durée de vie des machines

- Il existe deux notions de durée de vie, celle économique et celle de conception. Pour les calculs de rentabilité, les deux sont considérées comme identiques.
- En Europe, la durée de vie pour un scénario conservateur est de 20 ans (fixée par l'Association danoise de l'industrie éolienne). C'est cette durée de vie que doivent prendre en compte les ingénieurs lors de la conception de l'éolienne.
- La durée de vie est estimée à 30 ans pour les études économiques américaines. Cette hypothèse nécessite des maintenances annuelles ainsi que des révisions majeures tous les dix ans en remplaçant les pièces importantes.

# Revenus d'un projet éolien : Pertes dans le parc

- Les pertes rencontrées dans une centrale éolienne sont nombreuses et peuvent diminuer considérablement les revenus espérés :
  - Pertes de sillage (jusqu'à 20%)
  - Encrassement des pales (jusqu'à 10%)
  - Arrêts (jusqu'à 7%)
  - Autres pertes (transport, chauffage des équipements, jusqu'à 6%)

# Revenus d'un projet éolien : Marché local de l'énergie

- Prix de vente contractuel de l'électricité :
  - Énergie (¢/kWh) et/ou puissance (\$/kW) : généralement du facteur de capacité à environ 10% de la puissance installée (distribution, capacité installée)
  - Appel d'offre
  - Tarif fixé par réglementation gouvernementale (ex. : Allemagne, Espagne)
  - Bourse de l'électricité (ex. : France)
  - Facturation inverse (ex. : plus de 37 états américains)

# Revenus d'un projet éolien : Marché local de l'énergie

- Coûts évités : économie de carburant consommé par une centrale conventionnelle :
  - 2 à 35-50 ¢/kWh (tout dépend du type de réseau considéré)
- Crédit de capacité : Part de la nouvelle capacité installée pouvant remplacer la capacité des moyens de production classiques (pilotable) sans mettre en danger la sûreté de fonctionnement du réseau. [en %]
  - Pour de faibles taux de pénétration, le crédit de capacité correspond environ au facteur de charge.
  - Tend ensuite vers la production éolienne minimale pour de forts taux de pénétration.

# Revenus d'un projet éolien : Crédits et subventions

- Crédits et subventions : externalités environnementales et sociales évitées
  - Crédit pour ENR fournie (i.e. énergie verte ou certificats d'énergies renouvelables; ex. : Alberta ou Danemark)
  - Crédit - réduction d'émission de GES
  - Encouragement/subvention en déduction du coûts d'investissement (subvention non remboursable)

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Coûts d'un projet éolien
  - Investissement (CAPEX)
  - Opération (OPEX) et maintenance
- Revenus d'un projet éolien
  - Disponibilité des machines
  - Durée de vie des machines
  - Pertes dans le parc
  - Marché local de l'énergie
- ***Conclusion***

# Conclusion

- De nombreux flux financiers sont à prendre en considération lors de l'étude économique d'un projet éolien.
- Une fois ces flux identifiés, différents outils et indicateurs économiques sont utilisés pour juger de la viabilité financière d'un projet.
- Ces différents indicateurs sont présentés dans la prochaine partie de ce module.

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION !**



# MERCI



## Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D  
Tél: 418-962-9848 # 340  
[cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca](mailto:cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca)  
[Hussein\\_ibrahim01@uqar.ca](mailto:Hussein_ibrahim01@uqar.ca)  
[Hussein.ibrahim@itmi.ca](mailto:Hussein.ibrahim@itmi.ca)