

## 12. L'énergie éolienne

### 12.2 – *Les types d'éoliennes*

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

*Groupe t3e, Département de génie mécanique*

Adrian Ilinca, Ph.D., ing., Professeur

*LREE, Université du Québec à Rimouski*

Thomas Lamalle

*Département de génie électrique*

Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Question



ENR2020

- Quels sont les avantages de l'éolienne à axe horizontal ?
  - A. Meilleur rendement
  - B. Plus solide
  - C. Moins chère
  - D. Plus silencieuse
  - E. Mécanique plus simple



# Plan de la présentation

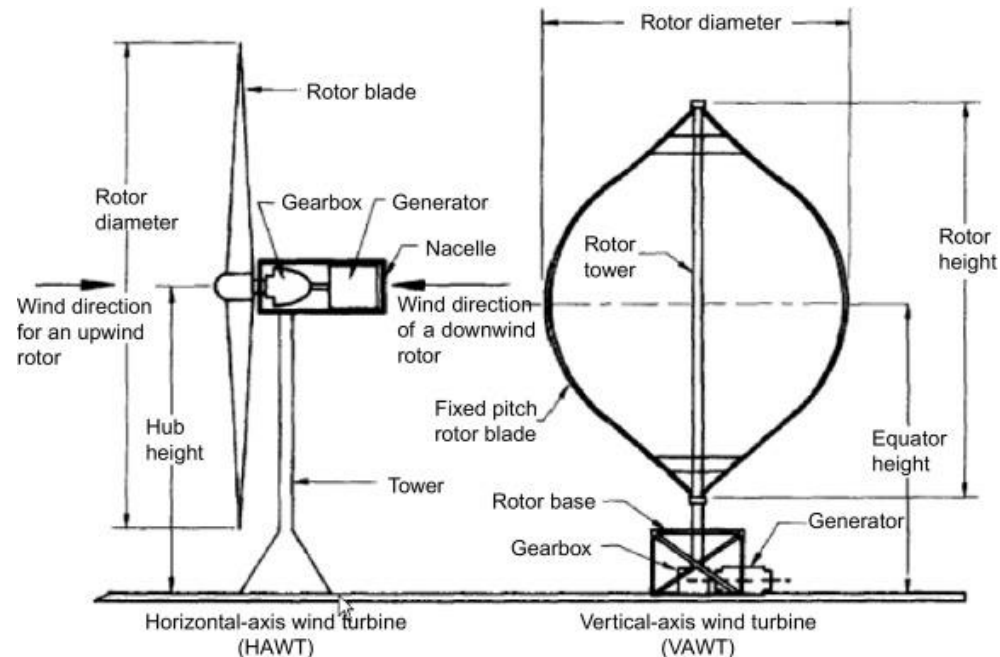
- Introduction et objectifs
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- Les éoliennes aéroportées
- Les variantes et les tendances
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- Les éoliennes aéroportées
- Les variantes et les tendances
- Conclusion

# Introduction et objectifs

Le type le plus connu d'éoliennes est la machine à axe horizontal comportant 3 pales. Mais plusieurs variantes existent :



**Éolienne à axe horizontal**

**Éolienne à axe vertical**



**Éolienne aéroportée**

# Introduction et objectifs

- Quel est le diamètre de l'éolienne horizontale la plus grande ?

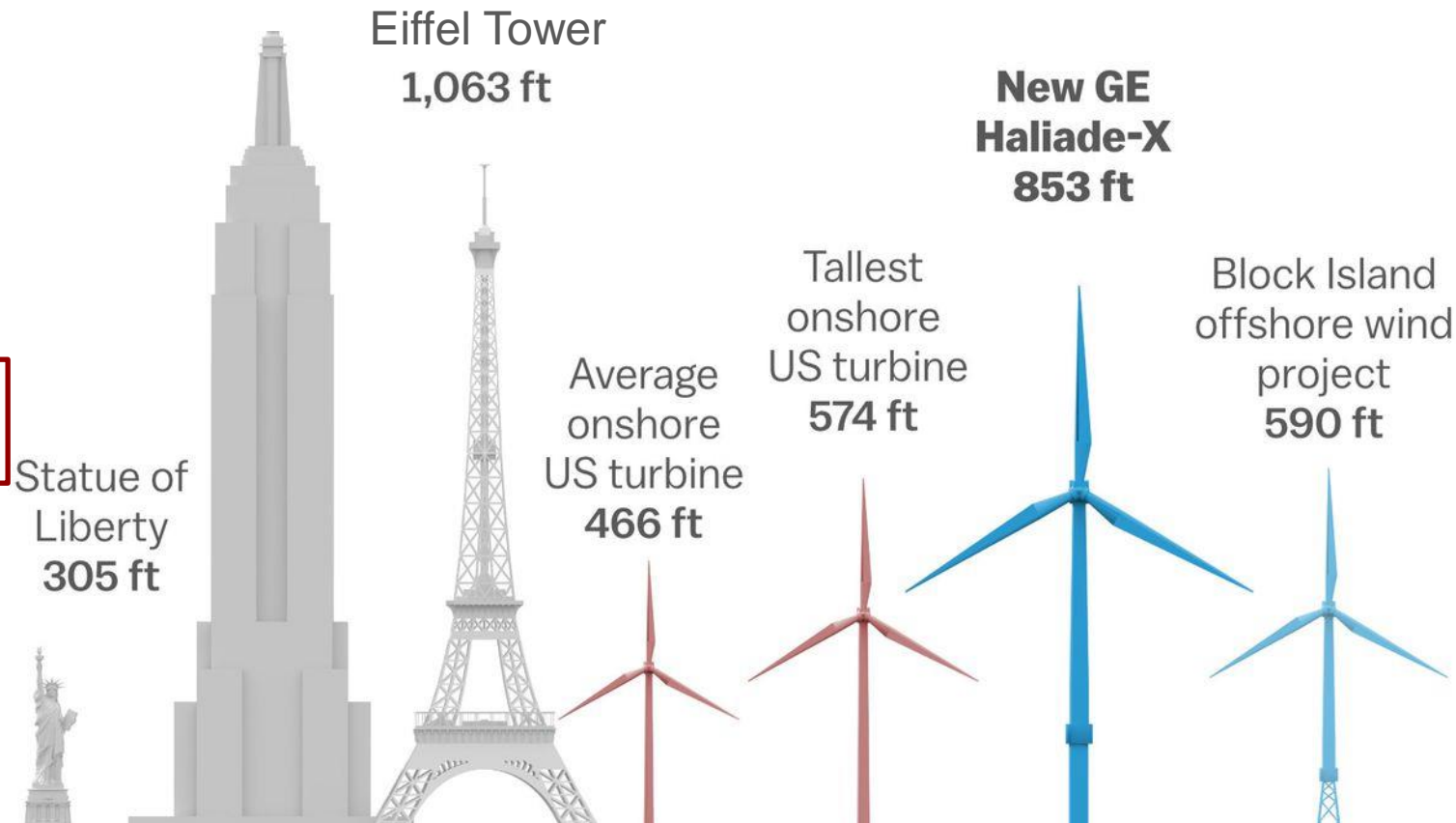
– 40 m?

– 60 m?

– 100 m?

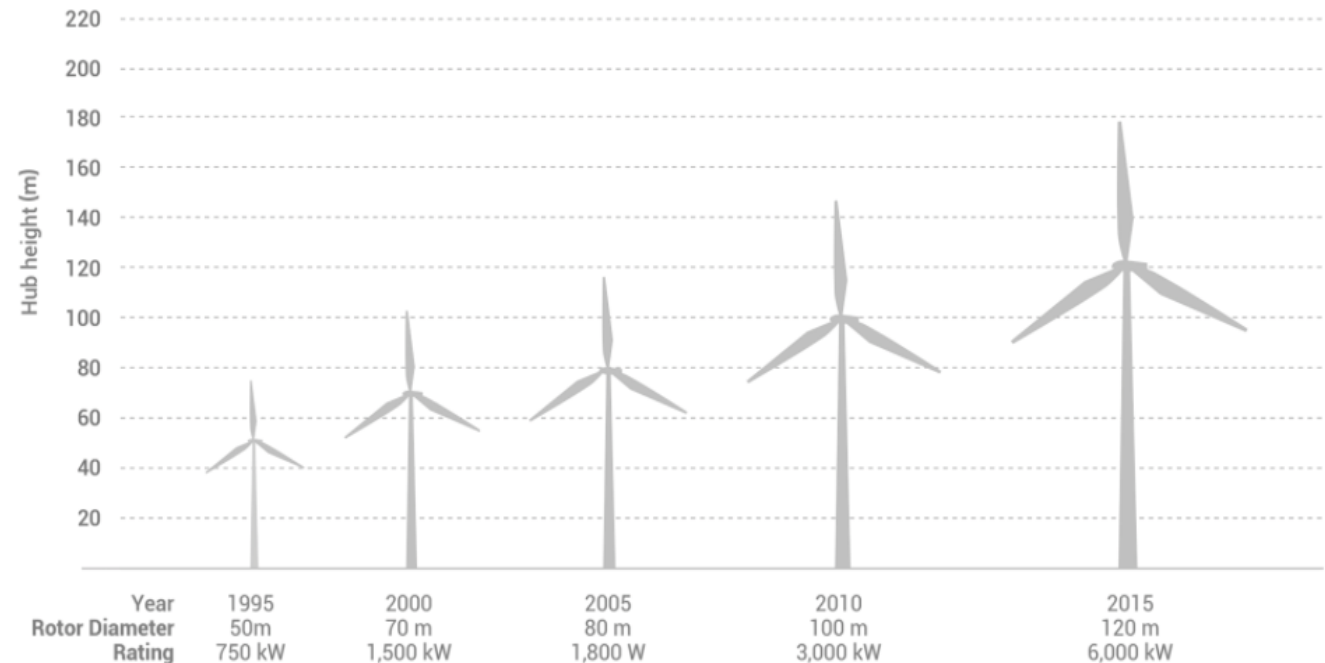
– 150 m?

– 200 m + ?



# Introduction et objectifs

- Dans le cas d'un axe horizontal, les puissances varient avec les dimensions :
  - Micro éoliennes : diamètre de rotor de 0,5 à 2 m : de 100 W à 1 kW.
  - Petites éoliennes : diamètre de rotor de 2 à 12 m : de 1 kW à 36 kW.
  - Moyennes éoliennes : diamètre de 12 à 35 m entre 36 et 350 kW.
  - Grandes éoliennes : diamètre de rotor de 35 à 125 m : 350 kW à 5 MW.
  - Très grandes éoliennes : diamètre de rotor de 220 m et puissance de 12MW (Haliade X de GE, record 2019)



Source: National Renewable Energy Laboratory

# Introduction et objectifs

- Éoliennes de moins de 10 kW :
  - Attaque directe (sans multiplicateur)
  - Rotation rapide (100 à 400 tours par minute)
  - Stockage par batteries
  - Bruyantes et peu esthétiques
- Éoliennes entre 10 kW et jusqu'à 250 kW :
  - Avec boîte de vitesses, génératrice asynchrone à cage
  - Souvent sans stockage
  - Très peu de fabricants font du « hors réseau »
  - Sert au couplage diesel et solaire à haute pénétration





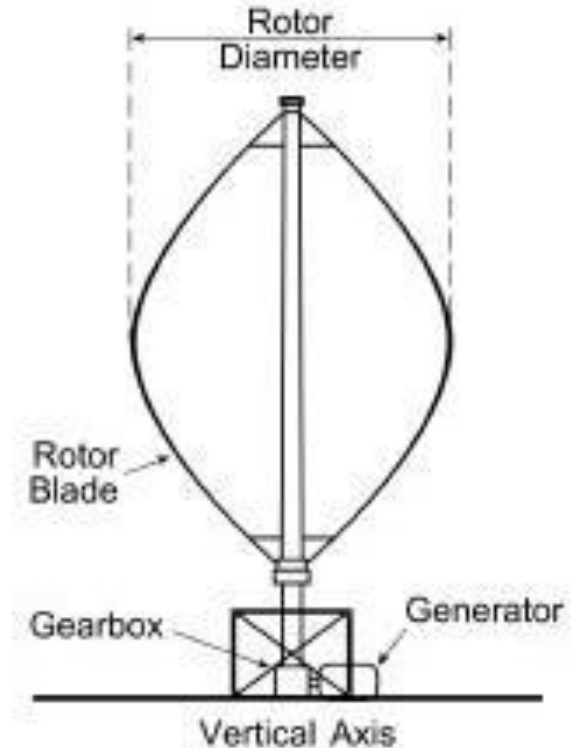
# Introduction et objectifs

- Réseau isolé :
  - Couplage éolien-diesel basse pénétration (moyennes éoliennes - puissance installée entre 50kW et 1MW)
- Réseau central :
  - Grandes éoliennes (généralement 500kW et plus) installées généralement en parc;
  - Aujourd'hui, rarement en deçà.



# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe vertical
  - Avantages :
    - Facilité d'accès au système de conversion (générateur, transmission, etc.);
    - Pas besoin de système d'orientation;
    - Meilleur rendement théorique.
  - Inconvénients :
    - Empreinte au sol (présence de haubans);
    - Toute la charge repose sur le roulement à la base;
    - Nécessite une assistance pour le démarrage;
    - Moins bon rendement global (faible vent à la base du rotor).



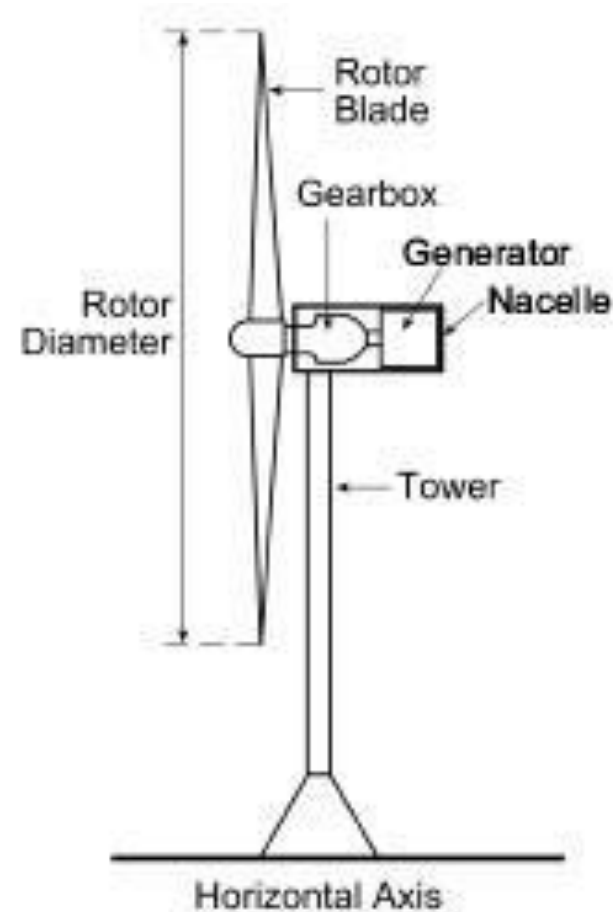
# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe vertical (VAWT)



# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal
  - Avantages :
    - Meilleur rendement;
    - Plus solide;
    - Moins chère.
  - Inconvénients :
    - Mécanique plus complexe;
    - Nécessite un système d'orientation;
    - Plus bruyante.



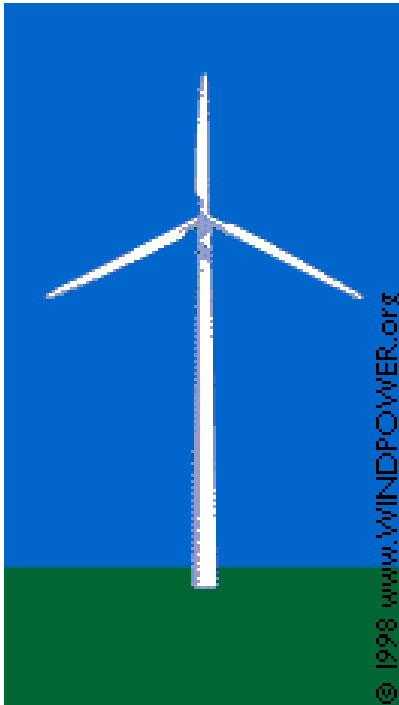
# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal (la taille):



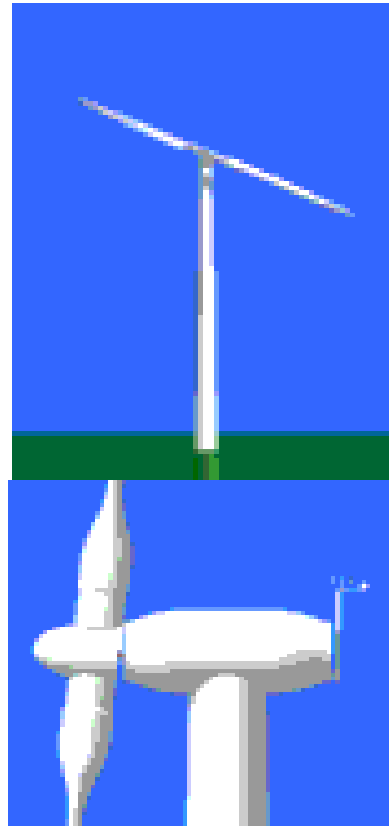
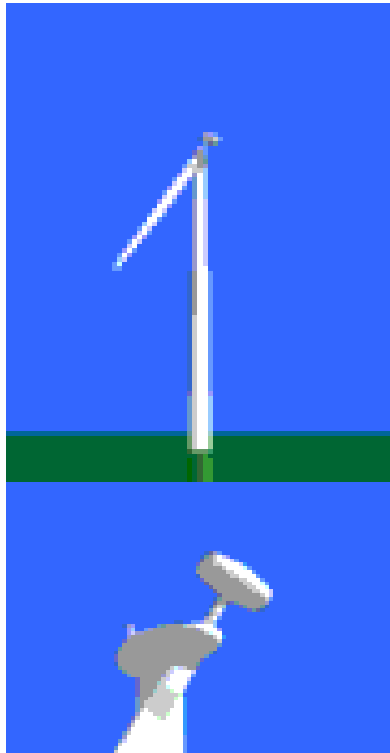
# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal (face au vent ou sous le vent):



# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal (le nombre de pales):



# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal (le nombre de pales):

Effet de battement visuel

B (nombres de pales) :	1	2	3	4	5
Equilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Rigidité à la flexion	+	+	=	-	-
Bruit - fatigue	-	-	+	+	+

Charge trop importante par pale  
 $\lambda$  plus élevé => plus de bruit

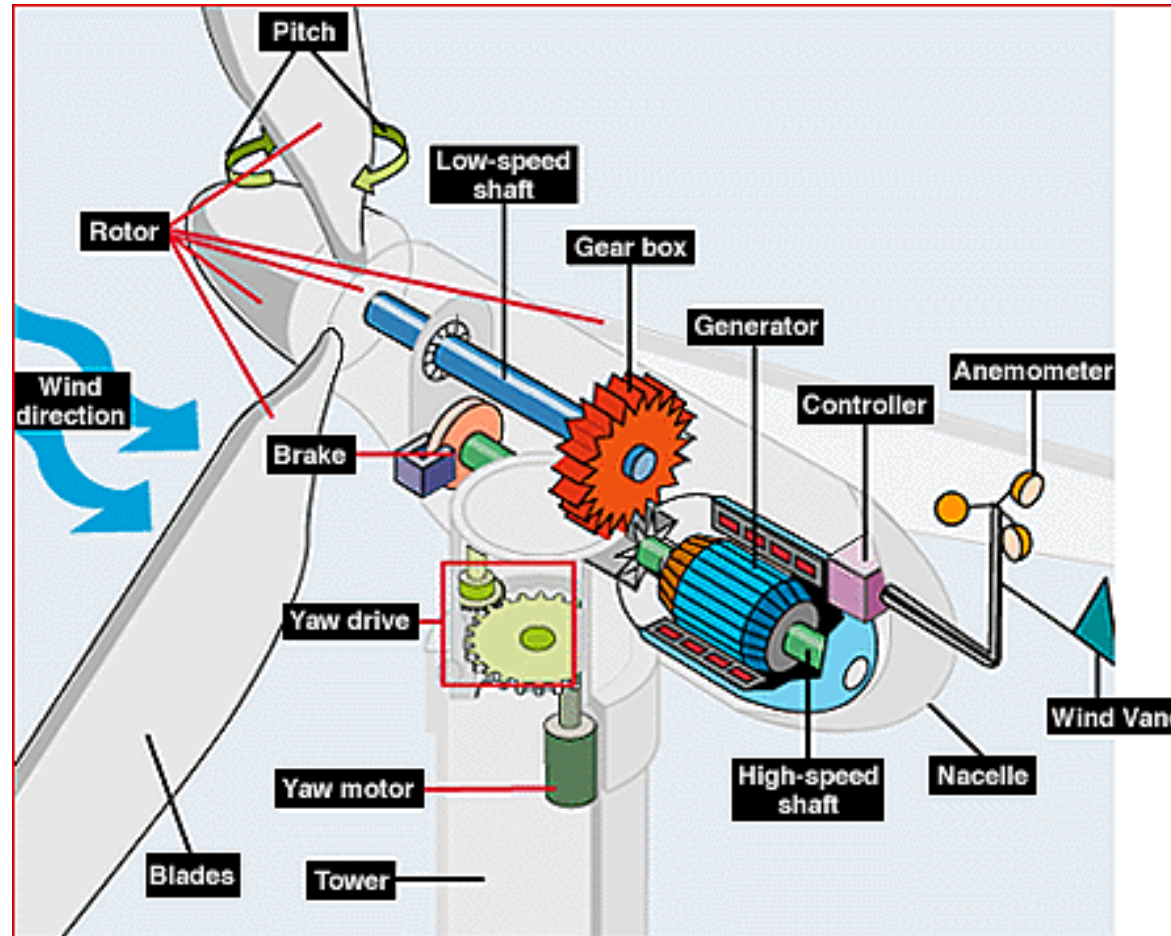
Corde trop petite,  
trop de flexion  
(sauf petites tailles)





# Introduction et objectifs

- Éolienne à axe horizontal (les composants classiques):



# Introduction et objectifs

- Objectifs :
  - Présenter les principales catégories d'éoliennes et leur fonctionnement;
  - Présenter les principaux types de générateurs;
  - Savoir distinguer les différentes technologies;
  - Estimer un ordre de grandeur des puissances typiques de chaque type d'éolienne.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes***
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- Les éoliennes aéroportées
- Les variantes et les tendances
- Conclusion

# Les éoliennes basse puissance

- Les micro éoliennes et petites éoliennes sont de basse puissance;
- Les éoliennes basse-puissance désignent les puissances inférieures à 20kW, donc en-deçà de la limite des petites éoliennes de 36 kW;
- Au départ utilisées dans des sites isolés, elles se répandent aujourd'hui en milieu urbain;
- Pour de faibles puissances, elles ont le plus souvent un axe vertical qui permet d'utiliser le vent venant de toutes les directions.



# Les éoliennes basse puissance

- Le coût d'achat d'une micro/petite éolienne se situe entre 7 000\$ et 40 000 \$ pour des puissances allant de 600W à 6 kW.



Ampair 600-230[9]



Swift 1.5kW[10]



Skystream 3.7[11]

Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2012). Domestic application of micro wind turbines in Ireland: Investigation of their economic viability. *Renewable Energy*, 41, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.001>

# Les éoliennes basse puissance

- Les fabricants promettent souvent des périodes de retour sur investissement (PRI) très courtes (3 ans pour la Swift 1.5k);
- En réalité, il faut plus compter entre 20 et 30 ans pour des scénarios de vitesses de vent réalistes, soit (souvent) plus que la durée de vie de l'éolienne. Cela vient du fait que le vent souffle très rarement à la vitesse nominale de l'éolienne;
- Les micros éoliennes connectées au réseau sont, pour l'instant, peu rentables, la vitesse moyenne du vent est trop faible pour que le coût du kWh produit soit compétitif avec des sources alternatives.
- Sauf en Allemagne et ailleurs : <http://enbreeze.com/>

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- ***Les éoliennes moyenne et haute puissance***
- Les éoliennes aéroportées
- Les variantes et les tendances
- Conclusion

# Les éoliennes moyenne et haute puissance

- Les petites/moyennes éoliennes (de moyenne puissance) désignent les puissances comprises entre 20kW et 100kW.
- Le coût unitaire (\$/kW) d'une petite éolienne est nettement inférieur à la micro éolienne de basse puissance nominale

Coût d'achat et d'installation d'éoliennes  
de diverses puissances nominales (source : CANWEA, 2010)

	Puissance nominale			
	0,4 kW	1 kW	10 kW	50 kW
	(\$) <sup>1</sup>			
<b>Achat</b>	1 300	3 300	38 600	130 800
<b>Installation</b>	1 100	4 300	29 800	65 400
<b>TOTAL</b>	<b>2 400</b>	<b>7 600</b>	<b>68 400</b>	<b>196 200</b>
<b>TOTAL (\$/kW)</b>	<b>6 000</b>	<b>7 600</b>	<b>6 840</b>	<b>3 924</b>

<sup>1</sup> Données de 2003 majorées avec un taux d'inflation de 2,5 % par année.



# Les éoliennes moyenne et haute puissance

Pour les éoliennes installées au lac St-Jean, le coût du kWh est de 0,17\$ pour une éolienne de 50kW et de 0,80\$ pour une éolienne de 10kW.

Vitesse moyenne du vent à une altitude de 30 m, production d'énergie et valeur de l'énergie par diverses éoliennes installées dans le secteur d'Alma (Environnement Canada, 2009)

Période	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Production énergétique par éolienne			
		10 kW <sup>1</sup>	20 kW <sup>1</sup>	30 kW <sup>1</sup>	50 kW <sup>1</sup>
		(MWh)			
Hiver (DJF)	5,49	6,8	12,1	14,5	19,9
Printemps (MAM)	4,78	5,1	8,9	10,6	14,5
Été (JJA)	4,08	3,3	5,8	6,8	9,2
Automne (SON)	5,06	5,7	10,0	5,4	16,3
<b>Année</b>	<b>4,78</b>	<b>20,4</b>	<b>35,8</b>	<b>42,5</b>	<b>58,1</b>
<b>Valeur de l'énergie produite (\$/an)<sup>2</sup></b>	n.a.	<b>1 622</b>	<b>2 846</b>	<b>3 379</b>	<b>4 619</b>

<sup>1</sup> Puissance nominale de chaque éolienne.

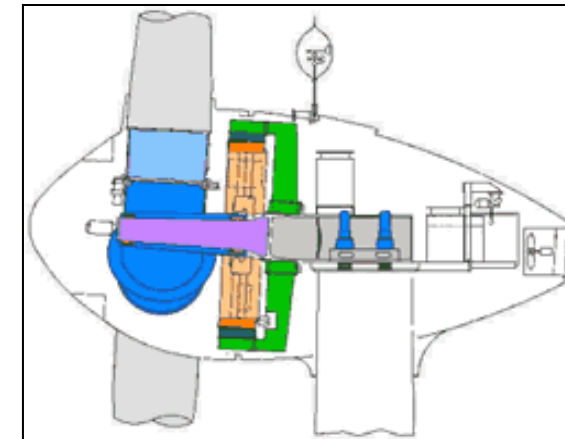
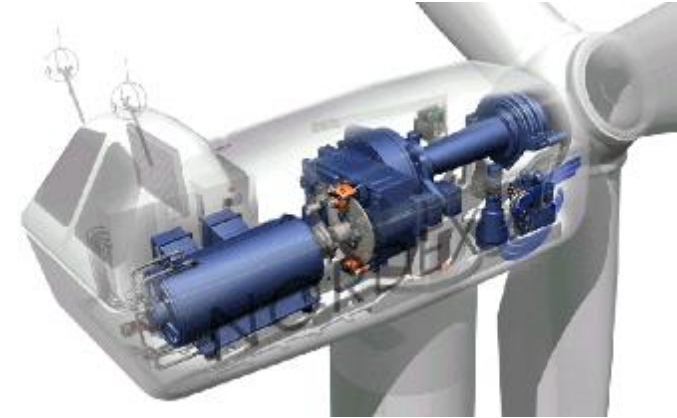
<sup>2</sup> En dollars courants de l'année 2009 avec des tarifs d'électricité évalués à 7,95 ¢/kWh (MRNF, 2008).

# Les éoliennes moyenne et haute puissance

- Pour les éoliennes de moyenne puissance, la période de retour sur investissement est longue si l'éolienne doit être connectée au réseau
  - coût de production de 0,33 \$/kWh.
- En revanche, cela devient rentable si l'objectif est de remplacer une génératrice diesel qui offre un coût de production sur la vie utile similaire.

# Les éoliennes moyenne et haute puissance

- Technologie classique : rotor, engrenage (**boîte de vitesses**) et générateur (moteur asynchrone - 4/6 pôles à grande vitesse de rotation)
- Technologie à attaque directe : **pas de boîte de vitesses**, générateur synchrone de grande dimension (faible vitesse de rotation) électronique AC/DC/AC



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- ***Les éoliennes aéroportées***
- Les variantes et les tendances
- Conclusion

# Les éoliennes aéroportées

Intérêt des éoliennes aéroportées :

- Monter en altitude afin de profiter d'un vent plus fort et plus constant (jet stream) présent jusqu'à 12 km au-dessus du sol.
- Plus légère (20 tonnes contre 1300 tonnes pour une éolienne traditionnelle de 3MW) et donc moins chères.
- Puisque l'éolienne se déplace, la surface balayée et donc l'énergie potentiellement récupérée serait plus grande.
- Les sites d'installation où les critères de vents sont respectés sont aussi plus nombreux.
- Il existe deux modes de fonctionnement : aérostat et cerf-volant.

<http://euanmearns.com/high-altitude-wind-power-reviewed/>

# Les éoliennes aéroportées

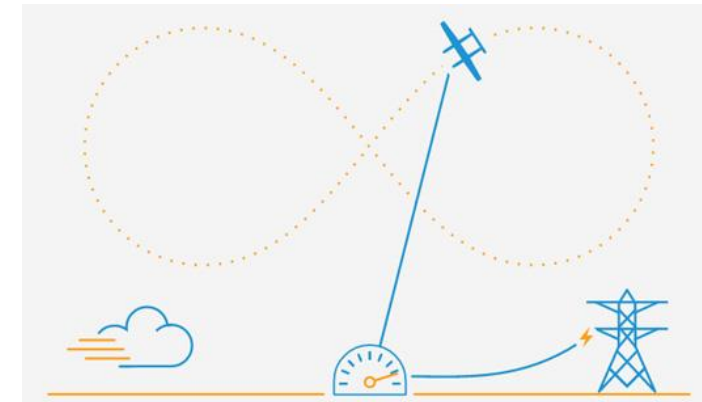
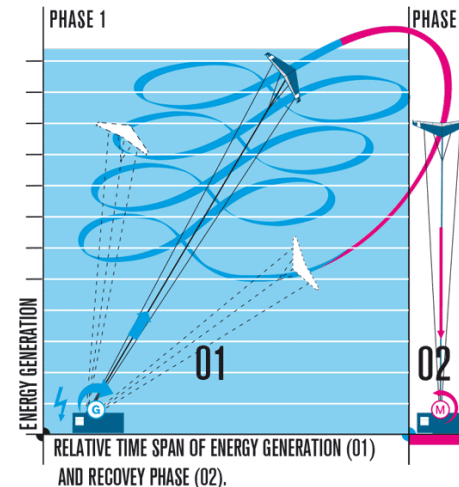
**Aérostat** : le générateur est en vol, élevé à l'aide d'hélium.

Fonctionnement classique d'une hélice qui fait tourner un alternateur.



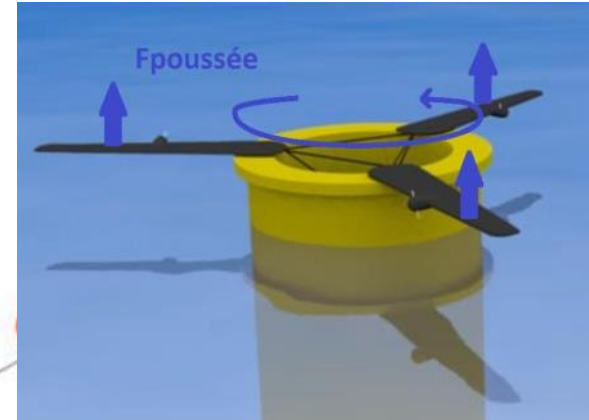
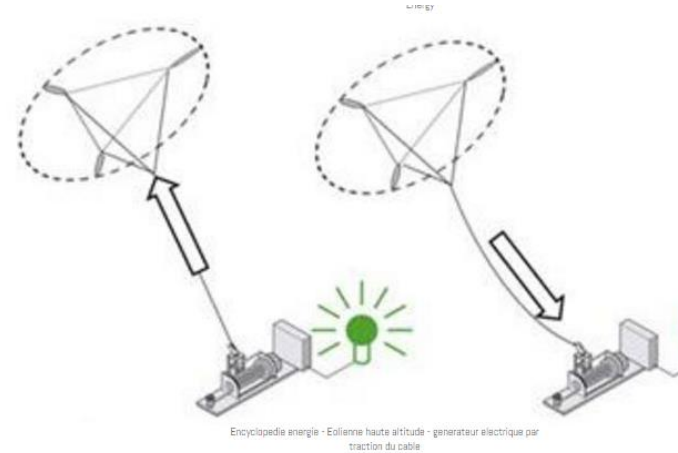
**Cerf-volant** : un « cerf-volant » est rattaché par un câble à une bobine, qui est reliée à un générateur.

Les mouvements du cerf volant font tourner la bobine et donc le générateur.



# Les éoliennes aéroportées

**Drône:** Le mouvement exploité ici n'est plus celui de la rotation des pales mais le va et vient de l'ensemble de la structure qui tracte le générateur. Blade Tips.



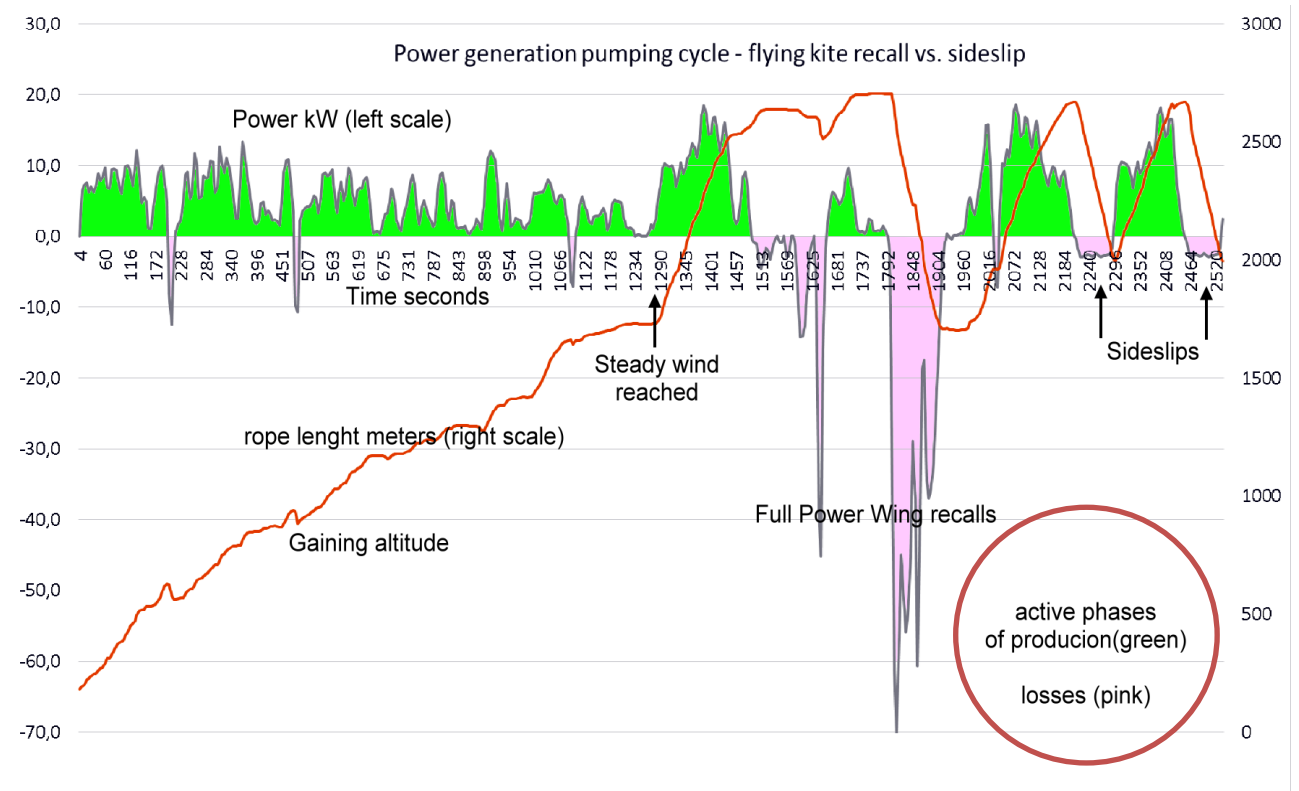
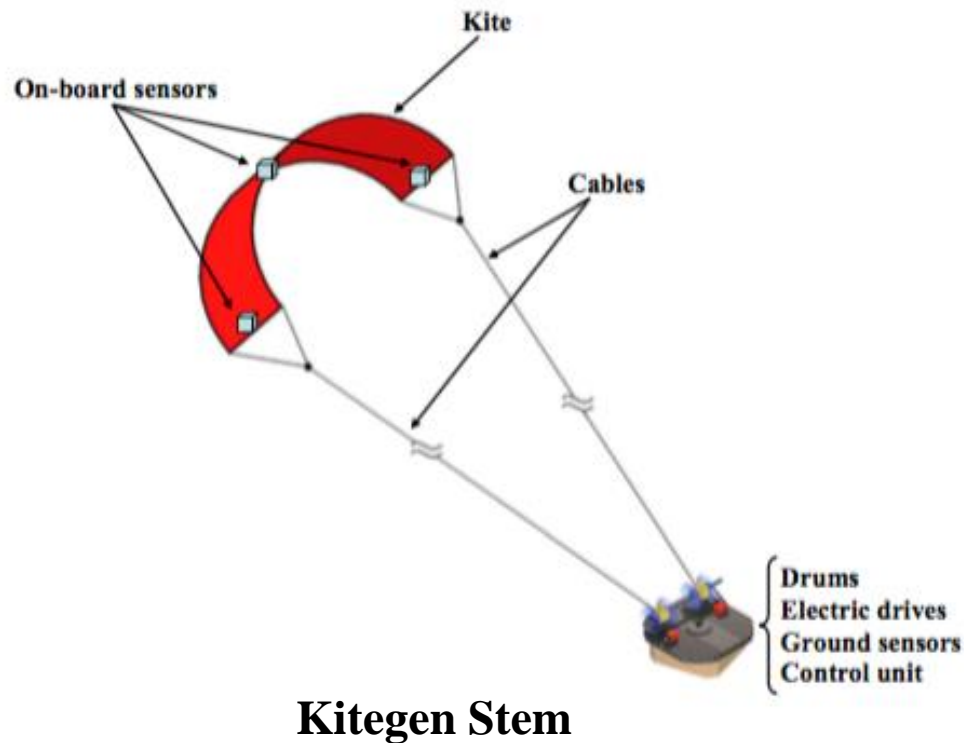
**Deltaplane** : une technologie motorisée volante et réversible.

La structure est ici conçue en fibre de carbone à l'image d'un avion propulsé.



# Les éoliennes aéroportées

- Mode cerf-volant
  - Une partie de l'énergie générée est utilisée pour rembobiner la bobine.

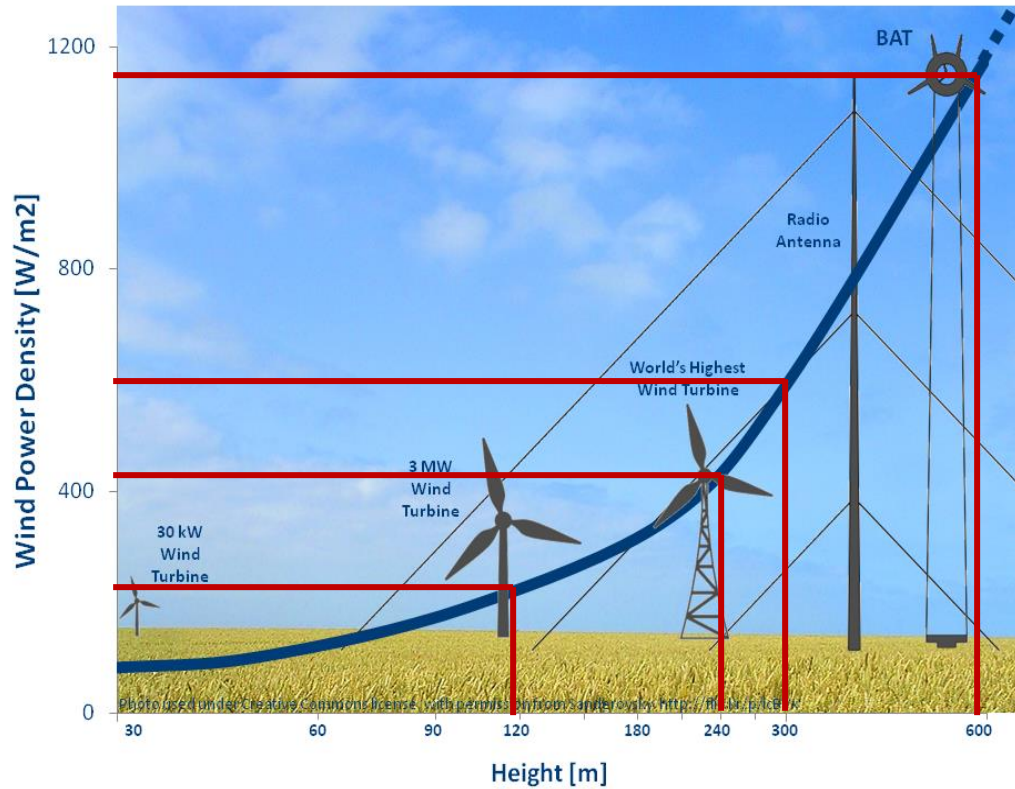


<http://www.kitegen.com/en/products/stem/>



# Les éoliennes aéroportées

- Les éoliennes en altitude



<http://www.altarosenergies.com/>

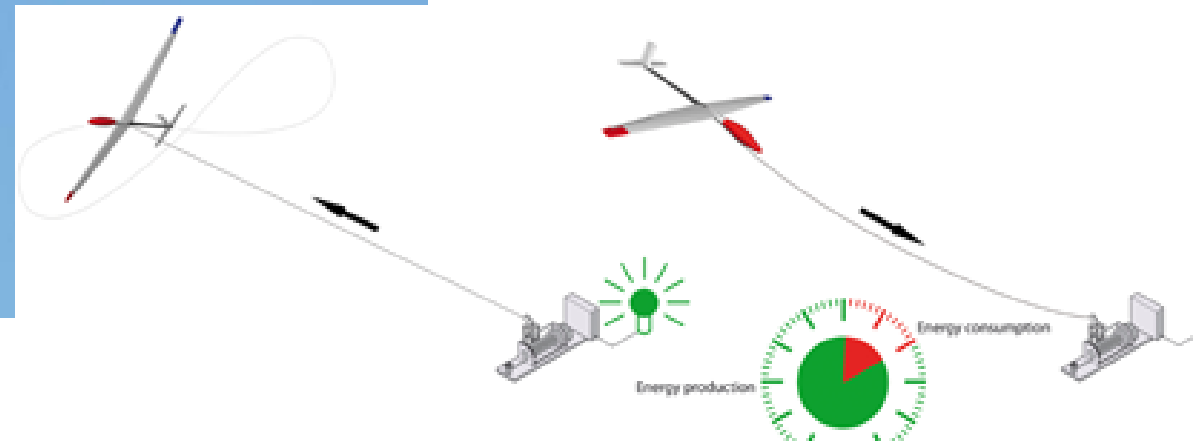
**Windpower**  
ENGINEERING & DEVELOPMENT  
February 27, 2013

# Les éoliennes aéroportées

- Les éoliennes en altitude



<http://www.ampyxpowers.com/>



# Les éoliennes aéroportées

- Les éoliennes à décollage vertical



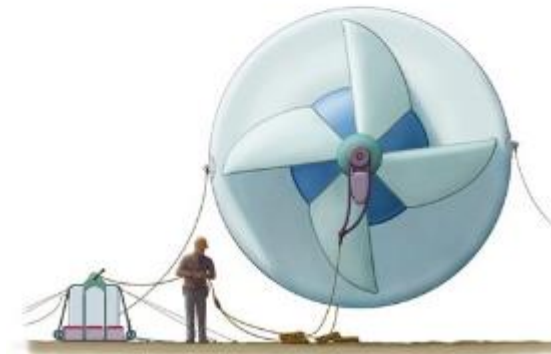
<http://www.makanipower.com>



<http://www.youtube.com/watch?v=cqJY8YFY3Yg>

# Les éoliennes aéroportées

- Les éoliennes à rotor



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- Les éoliennes aéroportées
- ***Les variantes et les tendances***
- Conclusion

# Question

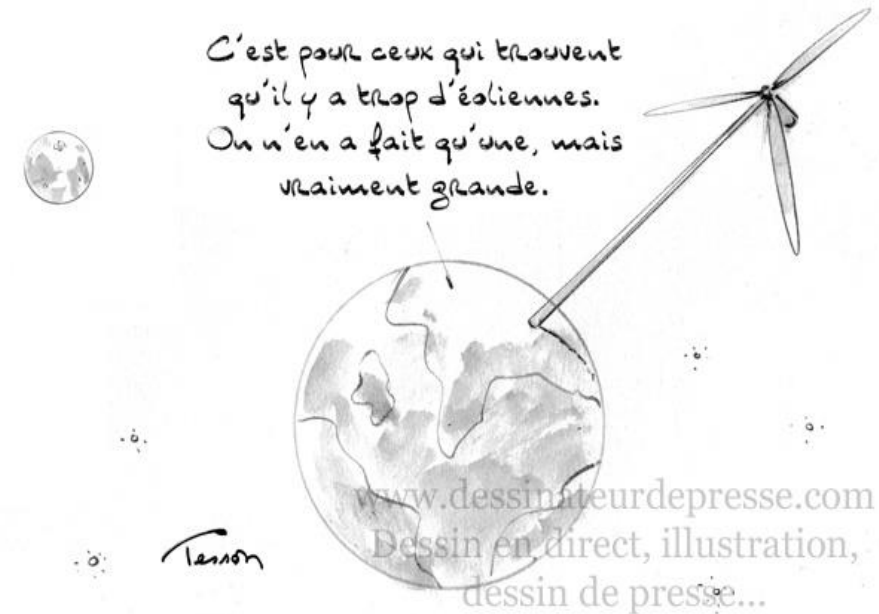
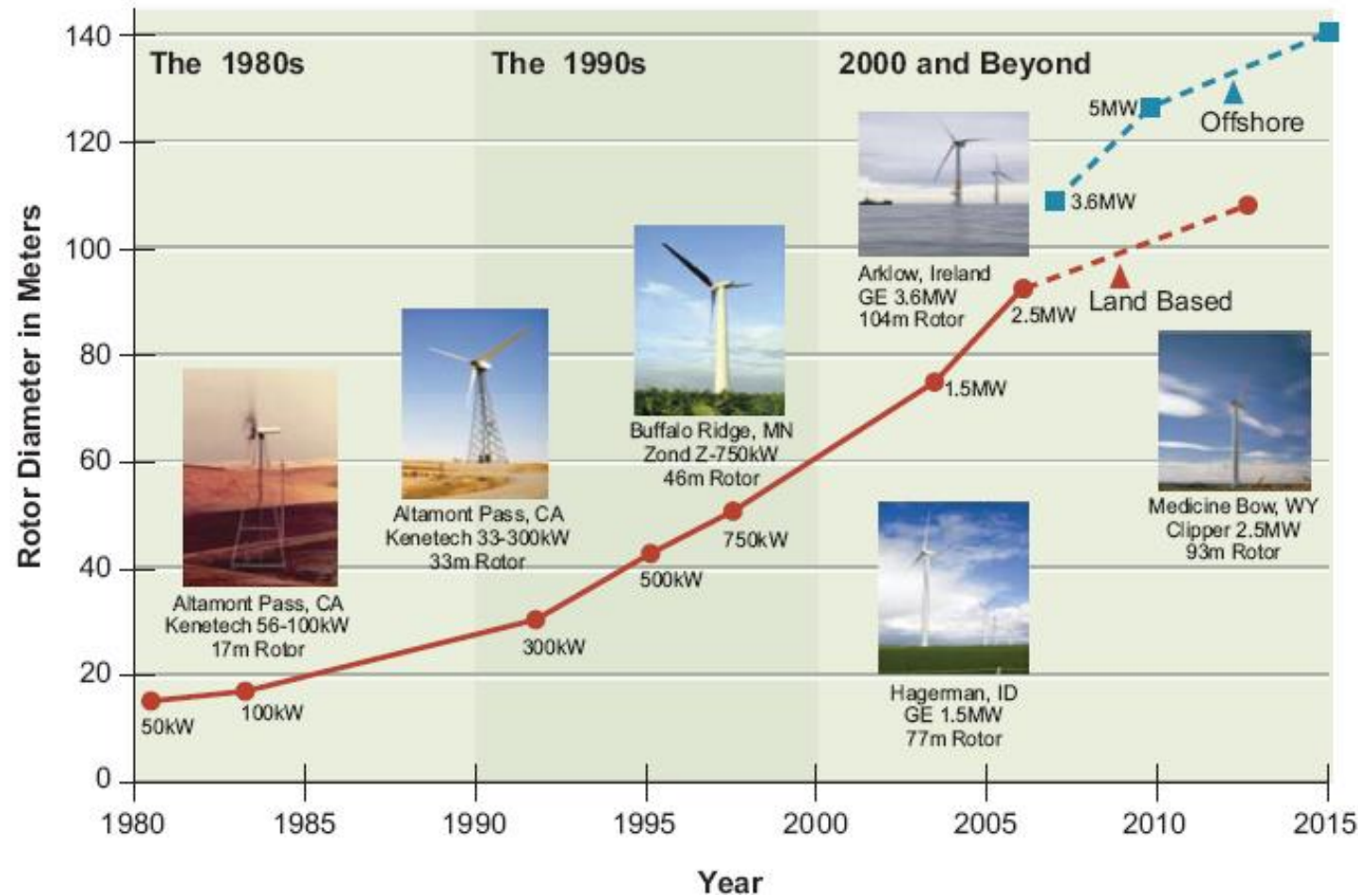


ENR2020

- Quel est le facteur principal qui limite l'installation d'éoliennes loin des côtes ?
  - A. La vitesse du vent
  - B. La faune marine
  - C. Les turbulences
  - D. La profondeur de l'eau
  - E. Aucune de ces réponses

# Les tendances

- Course vers le gigantisme – éoliennes « offshore »



# Les tendances

- Répartition entre « conventionnelle » et « à attaque directe »
- Éolien offshore
- Course au gigantisme



<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>



# Les tendances

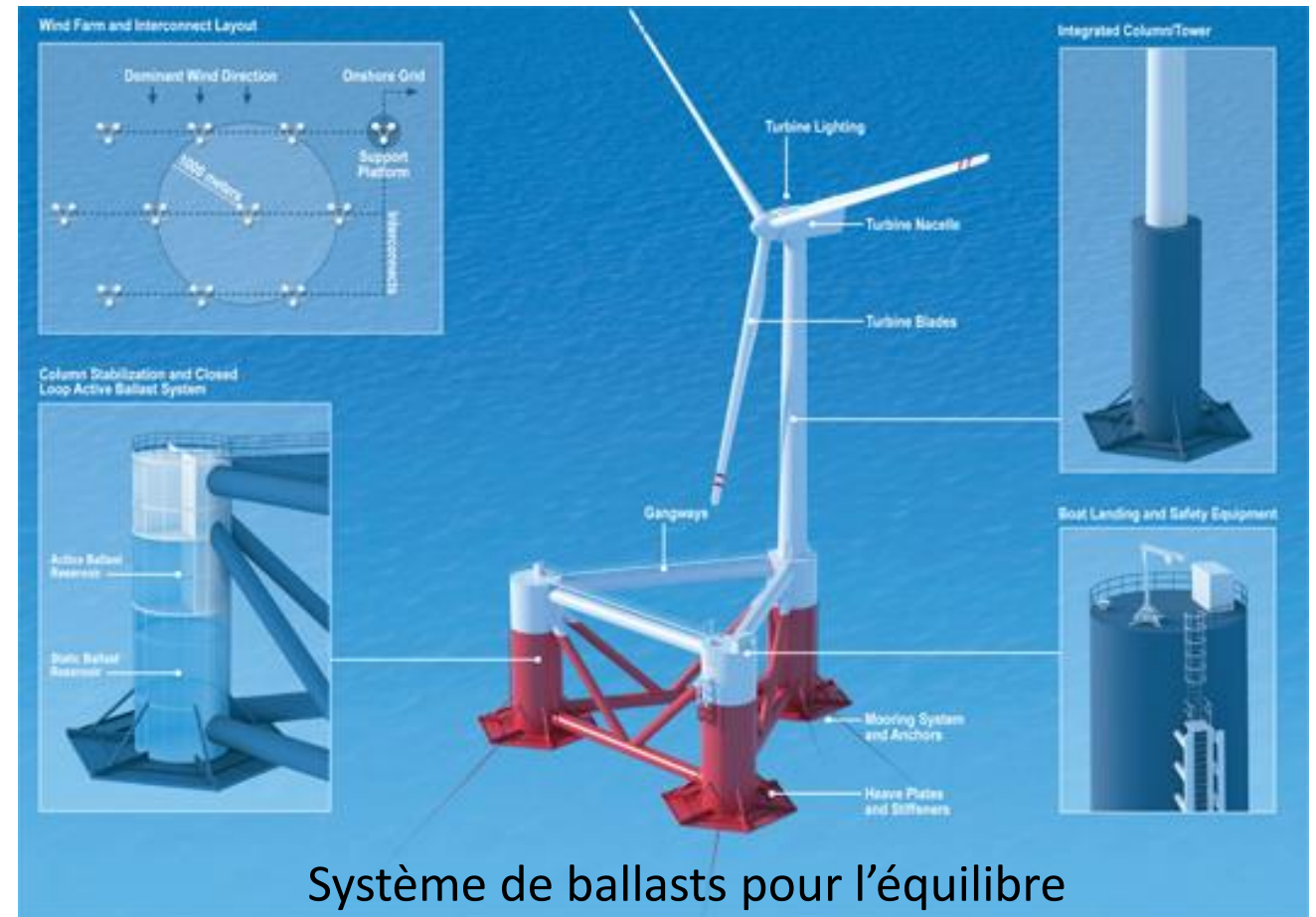
- Les éoliennes les plus puissantes atteignent la dizaine de MW.
- Elles sont installées au large des côtes car :
  - Le vent y est plus stable et plus fort.
  - Leur taille ne permet pas de les transporter au sol.
- Leur installation est en revanche plus coûteuse.



**Éolienne Haliade X de GE-RE, 12 MW**

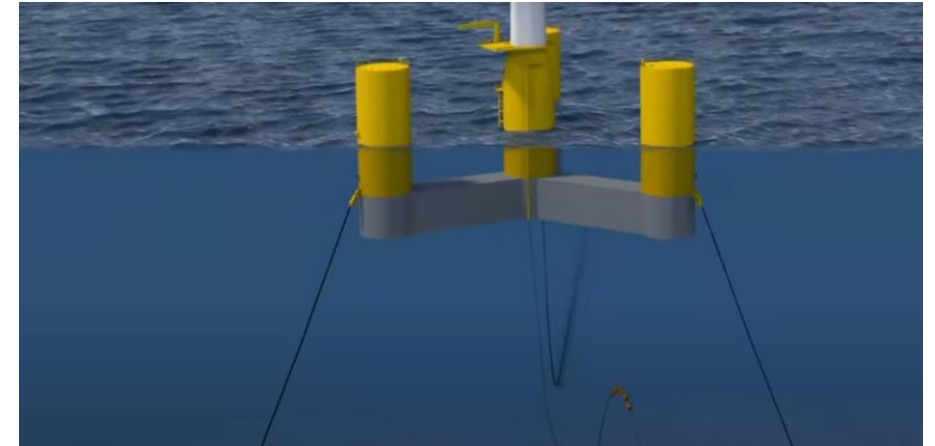
# Les tendances

- Ce qui limite actuellement l'installation d'éoliennes loin de côtes est la profondeur de l'eau;
- A fin 2017, la profondeur moyenne des parcs éoliens en mer dans les eaux européennes était de 27,5 m;
- Ceux-ci étant en moyenne situés à 41 km des côtes;
- Une voie d'avenir, l'éolienne flottante.



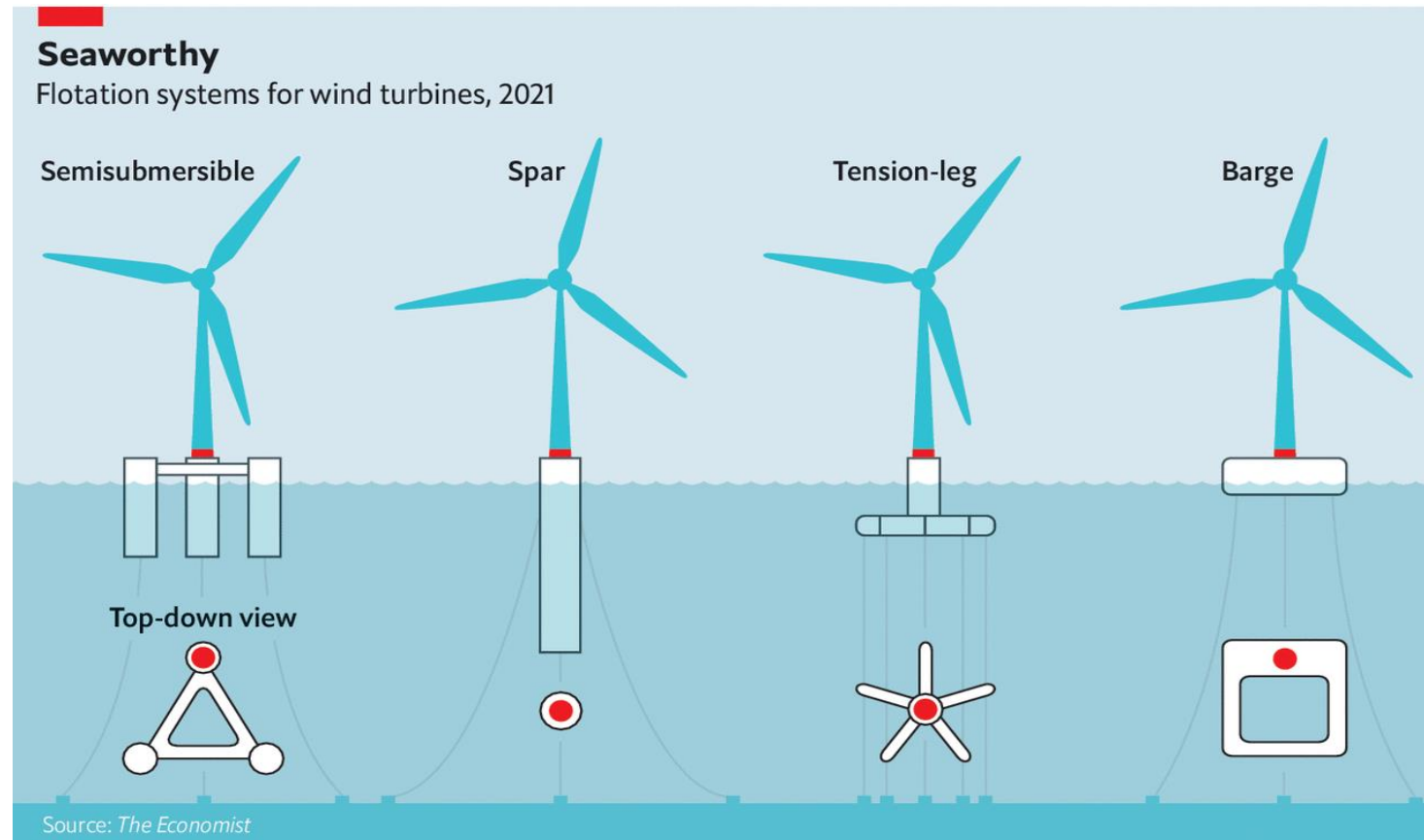
# Les tendances

- Les éoliennes flottantes sont développées pour s'éloigner encore davantage des côtes.
- Elles seraient alors ancrées au fond marin par des câbles au lieu d'une fondation enfoncée dans le sol.
- <http://eoliennes-groix-belle-ile.com/leolienne-flottante-ca-marche/>



# Les tendances

- Diverses méthodes de fixation des éoliennes flottantes existent :



The Economist

# Les tendances

- Au sol, l'une des idées consiste à maximiser la surface de contact avec l'air et n'utiliser qu'une tour pour réduire les coûts.

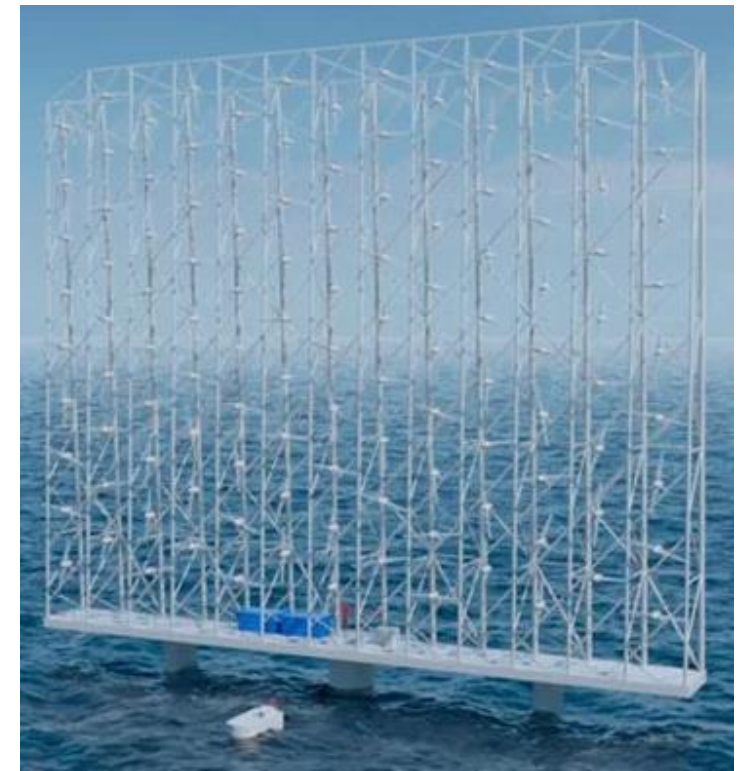
Wind Energ. Sci., 4, 251–271, 2019  
<https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019>



# Les tendances

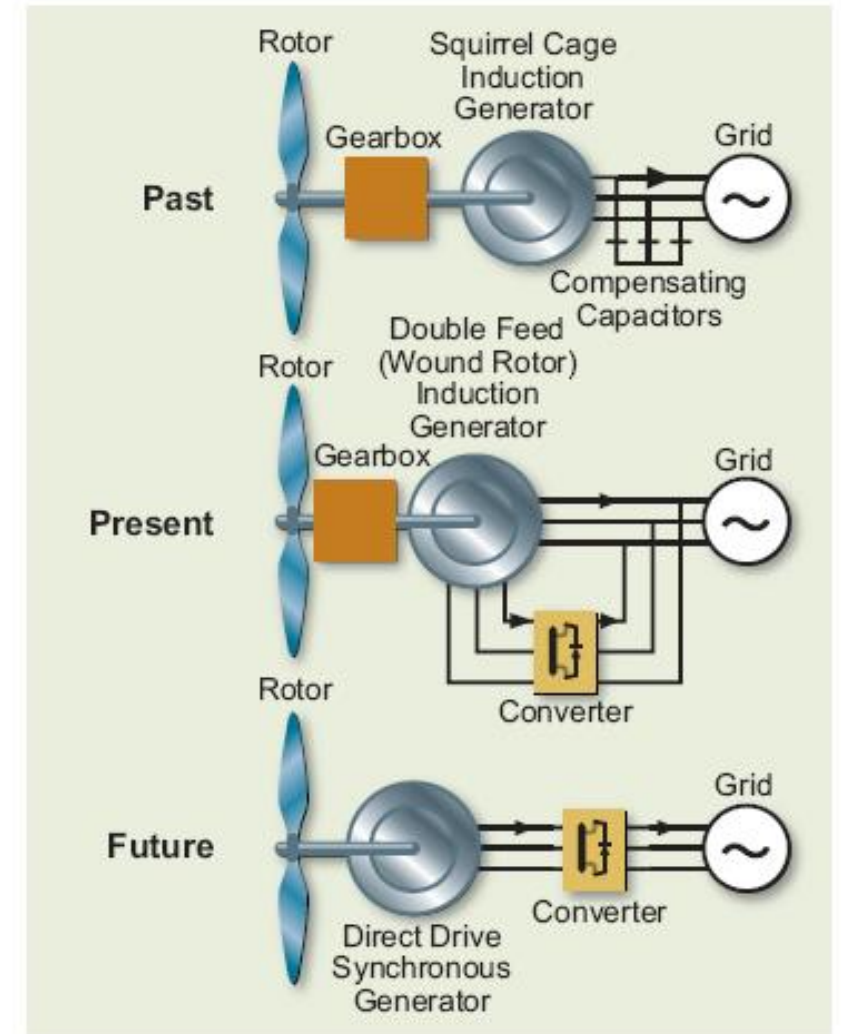
- Technologie de Wind Catching  
Technologies en Norvège
- Agencements multi-rotor en milieu marin
- Composants plus petits
- Offrirait des avantages pour les plus hautes vitesses de vent
- Très peu d'informations et de preuves à ce stade-ci

Wind Catching Systems  
<https://windcatching.com/>



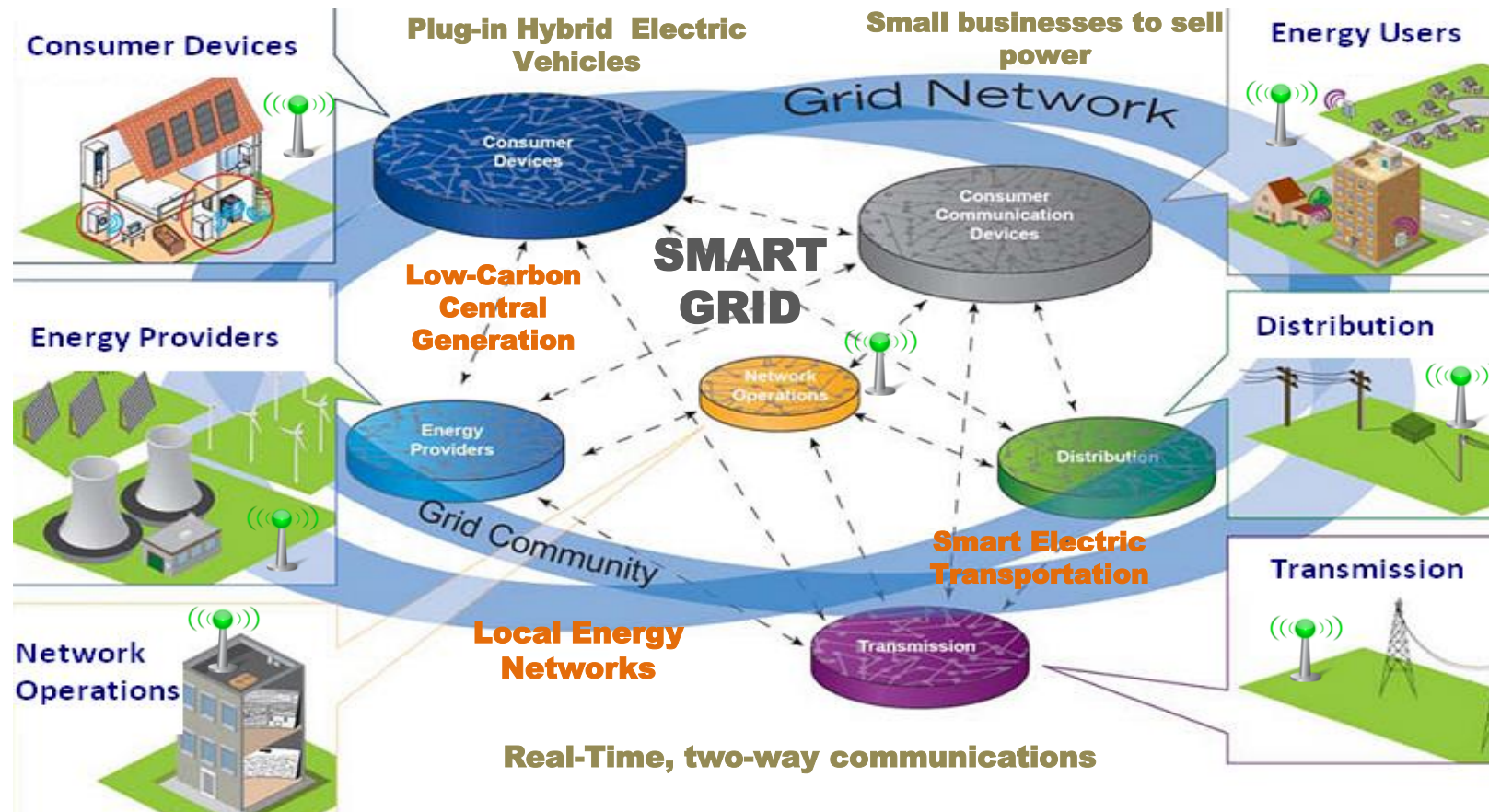
# Les tendances

- Changement du train de puissance (système de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique):
  - Génératrice à induction à cage d'écureuil
  - Génératrice à induction à double alimentation
  - Génératrice synchrone sans boîte de vitesses



# Les tendances

- Augmentation du niveau de pénétration de l'énergie renouvelable (éolienne) à l'aide des technologies « smart grid »



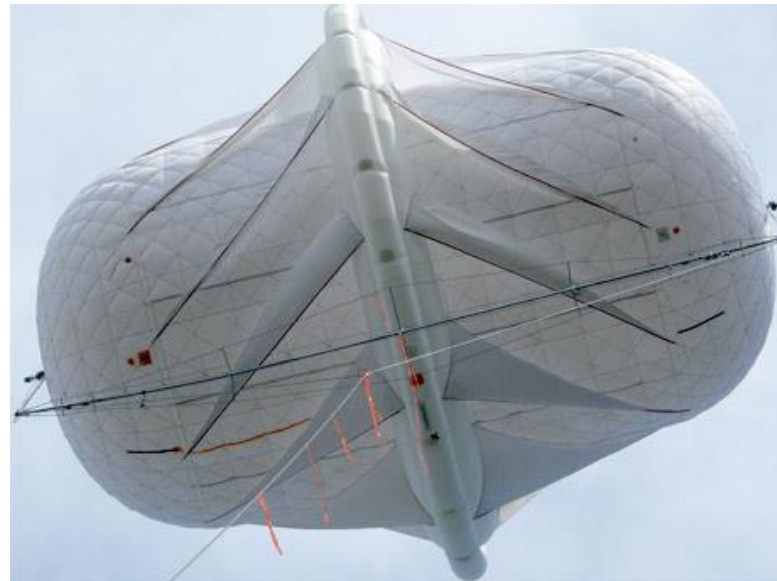


# Les tendances

- Concepts avancés des tours (plus hauts, plus légers, auto-levants)
- Concepts avancés de rotors (nouveaux matériaux, contrôles actifs et passifs, conception structurelle améliorée)
- Réduction des pertes d'énergie (diminuer la sensibilité des pales aux agents externes, senseurs et systèmes de contrôle plus robustes, maintenance prédictive)

# Les tendances

- Trains de puissance (diminution des boîtes de vitesse, génératrices à aimants permanents, nouveau matériaux, ...)
- Amélioration des processus de fabrication et du cycle de maturation de la technologie
- Nouveaux concepts ...

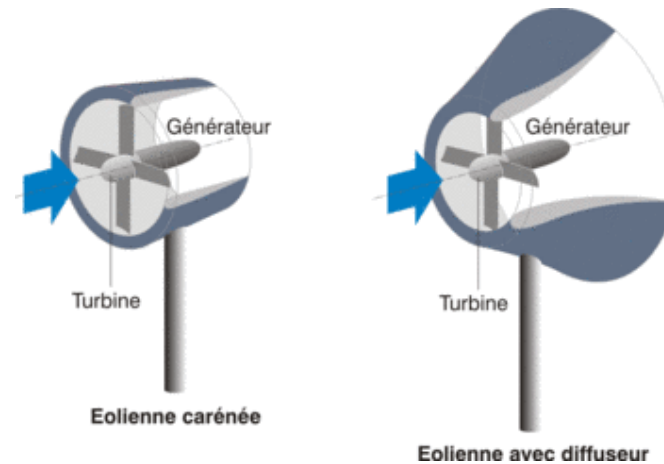


# Les tendances

- Forte intégration des manufacturiers dictée par:
  - Augmentation de la puissance des machines;
  - Tendance à l'intégration des sous-traitants clés;
  - Coûts élevés de la R&D;
  - Hausse des exigences de garantie des produits.

# Les variantes

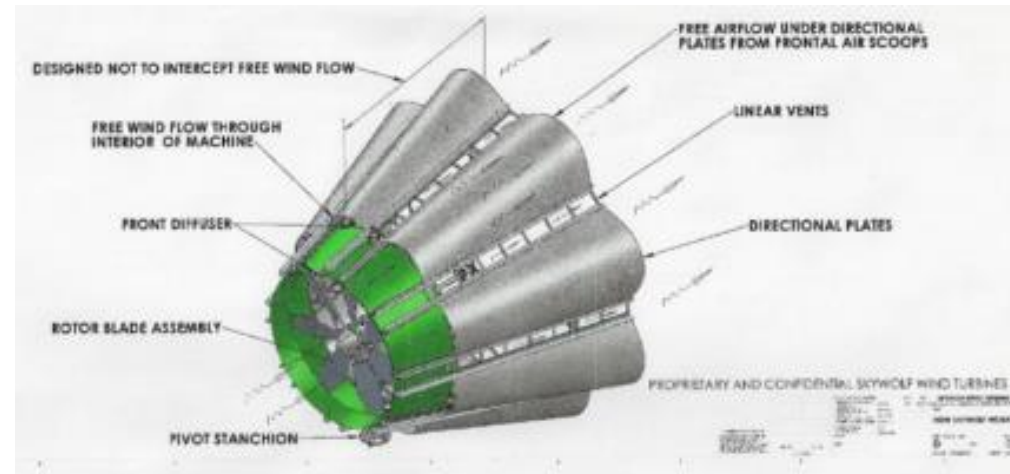
- Les éoliennes carénées
  - Plus efficaces
  - Plus coûteuses
    - La structure doit survivre aux épisodes extrêmes



# Les variantes

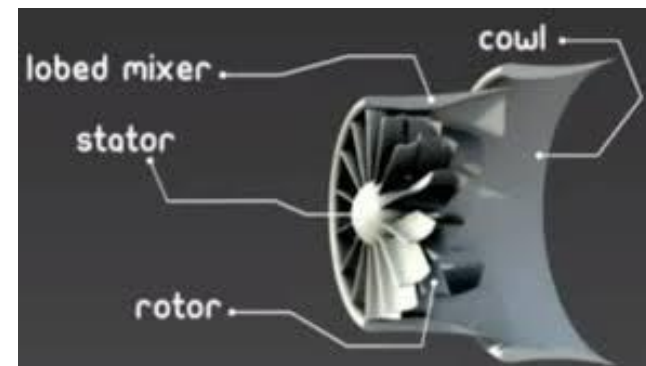
- Les éoliennes carénées
  - Skywolf

<https://www.youtube.com/watch?v=jGTO886FKMA>



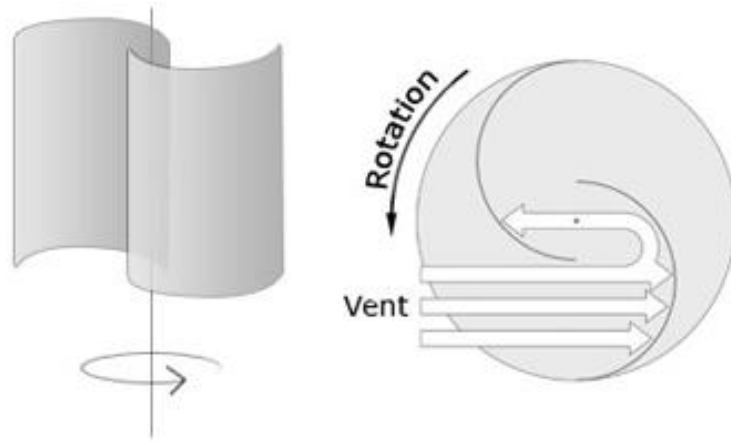
<https://www.youtube.com/watch?v=WB5CawKfE2M>

- Flow Design



# Les variantes

- Drag or Lift?
- Utiliser la force de trainée ou de portance?
  - Le rotor de Savonius



# Les variantes

- Drag or Lift?
  - Une combinaison?



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Les éoliennes basse puissance ou micro-éoliennes
- Les éoliennes moyenne et haute puissance
- Les éoliennes aéroportées
- Les variantes et les tendances
- ***Conclusion***



# Conclusion

- Les objectifs de cette capsule consistaient à:
  - Présenter les principales catégories d'éoliennes et leur fonctionnement;
  - Présenter les principaux types de générateurs;
  - Savoir distinguer les différentes technologies;
  - Estimer un ordre de grandeur des puissances typiques de chaque type d'éolienne.

# Conclusion

- On distingue les éoliennes :
  - à axe horizontal (les plus communes),
  - à axe vertical
  - et aéroportées (en phase de R&D et démonstration).
- Les générateurs sont :
  - Asynchrones avec boîte de vitesse
  - Synchrone à aimants permanents (nouvelle génération)
- Les éoliennes « grandissent » et en off-shore on installe désormais des turbines de plus de 12 MW.

# Conclusion

- Une éolienne est une machine complexe sujette à des charges statiques, cycliques, stochastiques, transitoires et imputables à de la résonance (12.3).
- La puissance d'une éolienne est contrôlée par la maîtrise de l'aérodynamisme et de plusieurs autres facteurs (12.4).
- L'éolien n'est pas sans impact environnemental, social et économique (12.5).
- L'estimation de la ressource éolienne est une science complexe (12.6).
- Le Québec possède une capacité installée de 4 000 MW complémentaire à sa capacité hydroélectrique (12.7).



**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

