

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
ENP D'ORAN – MAURICE AUDIN

---

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

---



---

---

SUPPORT DE COURS N° 2

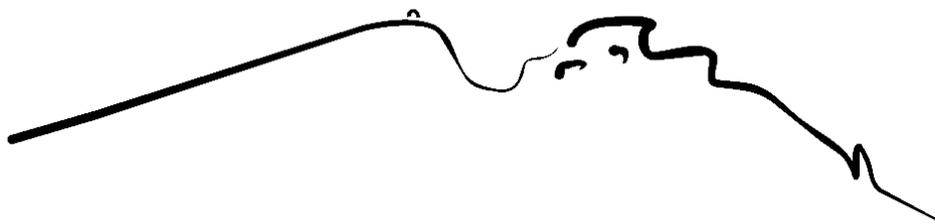
---

---

Formation d'Ingénieurs

LES ÉOLIENNES

« ÉNERGIES RENOUVELABLES »



---

Enseignant : Dr. Sid Ali LITIM

---

## I. Généralités

### I-1. Historique des éoliennes

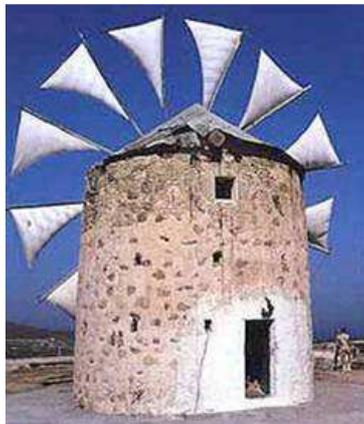
Depuis l'Antiquité, les moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisé pour moudre du grain). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides, ou abreuver le bétail.

Le moulin à vent (Figure 1) est apparu au Moyen-Age en Europe. Il fonctionne à axe vertical dans les premiers temps.



**Figure 1.** Photographie de deux moulins à vent

Puis, le moulin s'oriente vers le sens du vent et est muni de voiles pour mieux capter l'énergie du vent. (Figure 2)



**Figure 2.** Photographie d'un moulin à vent à voile

Au douzième siècle, le premier moulin à pales profilées est apparu. Bien que très simple, il s'agit de la première recherche aérodynamique des pales. Son utilisation est principalement de pomper l'eau ou moudre le grain.

A la Renaissance, les inventeurs célèbres tels que Léonard de Vinci s'intéressent fortement au moulin à vent, ce qui conduit à de nombreuses innovations parfois sans lendemain. Dès lors, les moulins se multiplient en Europe.

La Révolution Industrielle offre un nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation de métal permet de modifier les formes des tours et augmente considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais « éoliennes ». (Figure 3)



**Figure 3.** Moulin à vent (Allemagne du Nord)

L'avènement de l'électricité au XX<sup>ème</sup> siècle fait place aux premiers modèles d'éoliennes modernes. Le profil des pales est étudié et les ingénieurs s'inspirent des profils des ailes d'avion.

De nos jours, les éoliennes sont quasiment toutes à axe horizontal à l'exception de modèles à axe vertical tels que le rotor de Savonius et de Darrieus qui sont encore utilisés mais qui tendent à disparaître.

Les dernières innovations permettent aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable, c'est-à-dire de régler la vitesse de la turbine éolienne par rapport à la vitesse du vent.

## I-2. Exemple de l'un des modèles le plus puissant au monde



**Figure 4.** Éolienne moderne

**Société allemande ENERCON**  
Eolienne Enercon E-126 (Figure 4)

Turbine de 7,5 MW  
Diamètre rotor : 127m  
Hauteur :mât 137m  
Hauteur total : 198m  
Masse : 6000 tonnes  
Vitesse rotation : 5 – 11.7 rpm  
Cutoff : 28 - 34 m/s (with ENERCON storm control)  
Destiné à un parc éolien de 390MW (en 2012)  
52 machines (Juin 2013, 39 Enercon E-126)  
Lieu: Mont des 4 faux (Sud des Ardennes)  
Production électrique d'une E-126 de 14GWh/an  
Soit ~ 15000 foyers

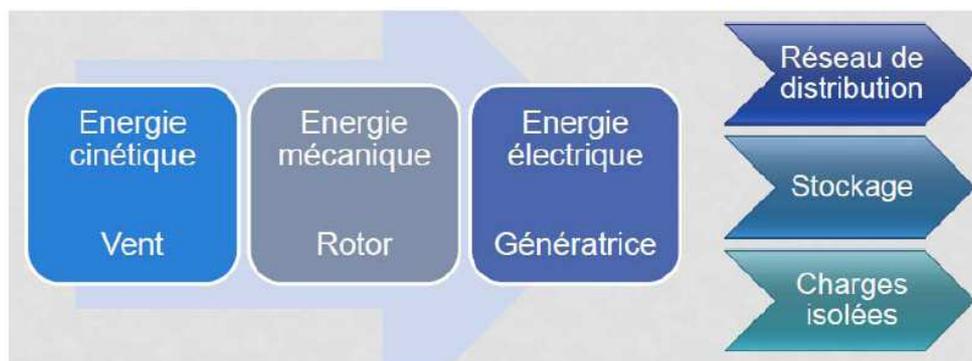
## II. Mode de fonctionnement

### II-1. L'origine des vents

Le vent résulte d'une différence de pression entre deux points, l'air se déplace des lieux de haute pression aux lieux de basse pression. Ce sont ces déplacements d'air qui produisent le vent qui peut être plus ou moins fort selon les régions.

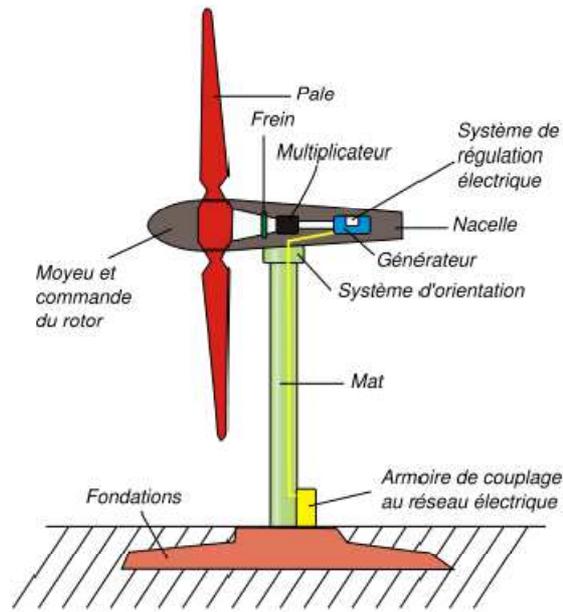
### II-2. Fonctionnement de l'éolienne

Le but d'une éolienne ou d'un aérogénérateur est très simple, il s'agit de transformer l'énergie cinétique produite par le vent en énergie mécanique de translation dans le but de produire de l'électricité. On trouve deux types d'éoliennes, les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical.



**Figure 5.** Principe de fonctionnement d'une éolienne

Comme l'indique la figure 5, l'aérogénérateur ou l'éolienne utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien produit également des pertes. Ainsi, on peut indiquer un rendement de 59 % au rotor de l'éolienne, 96% au multiplicateur. Il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.



**Figure 6.** Schéma d'une éolienne à axe horizontal

### III. Type d'installation

Dans cette partie, on va découvrir les types d'installations d'éoliennes et les différentes orientations de l'axe des éoliennes.

Une éolienne occupe une faible surface au sol. Ceci est un énorme avantage pour son installation qui perturbe peu les sites et permet de conserver des activités industrielles ou agricoles à proximité. On retrouve l'éolienne dite individuelle installée en site isolé. L'éolienne n'est pas raccordée au réseau, elle n'est pas reliée à d'autres éoliennes.

Sinon les éoliennes sont regroupées sous forme de fermes éoliennes. Les installations peuvent être réalisées sur terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes offshores où la présence du vent est plus régulière. Avec ce dernier type d'installation, on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique.



**Figure 7.** Photographie d'une ferme éolienne [1]



**Figure 8.** Ferme éolienne offshore de Middel grunden (*Danemark*)

#### **IV. Orientation de l'axe**

Il existe différents profils d'éolienne. On distingue deux grands types d'éolienne : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

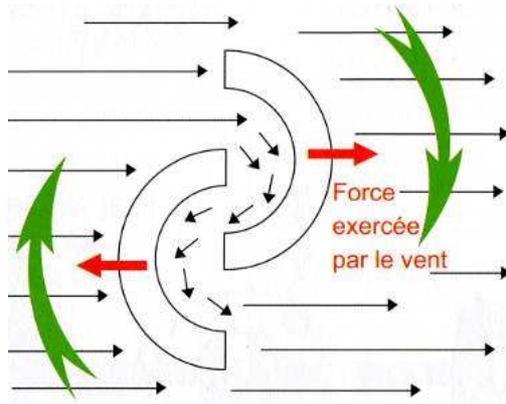
Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

##### **IV-1. Éolienne à axe vertical**

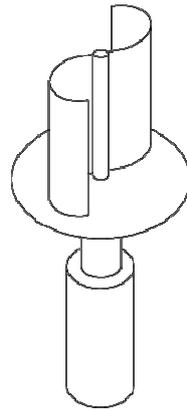
Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

**IV-1-1. Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.



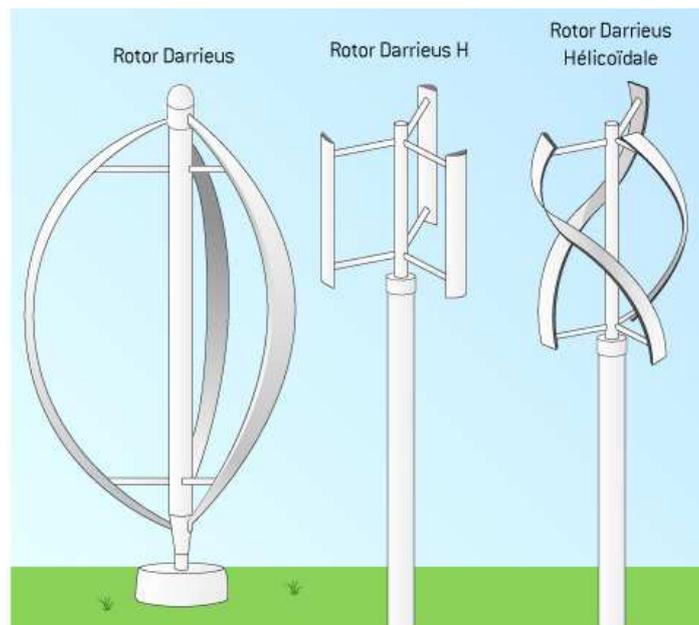
**Figure 9.** Schéma de principe du rotor de Savonius



**Figure 10.** Schéma du rotor de Savonius

#### IV-1-2. Le rotor de Darrieus

est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.



**Figure 11.** Schéma de l'éolienne de Darrieus

## IV-2. Éolienne à axe horizontal

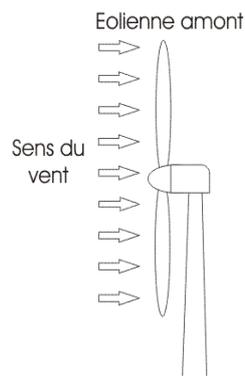
Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.



**Figure 12.** Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent

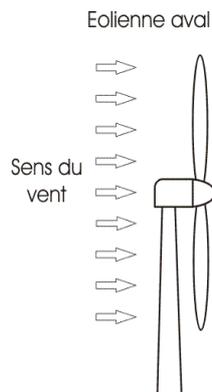
Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

**IV-2-1. Amont :** le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.



**Figure 13.** Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

**IV-2-2. Aval :** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



**Figure 14.** Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

## V. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et vertical

### Éolienne à axe vertical



Type Savonius



Type Darrieus



Type Darrieus

### Éolienne à axe horizontal



### Avantages et inconvénients

- Générateur au sol
- Structure / construction simplifiée
- Peu bruyantes, plus petites et esthétiques
- Résistance forte aux variations climatiques
- Démarrage à faible vitesse (Savonius)
- Rendement faible
- Masse non négligeable

- Stabilité de la structure
- Bon rendement
- Bruyantes, peu esthétiques

## VI. Composants classiques d'une éolienne

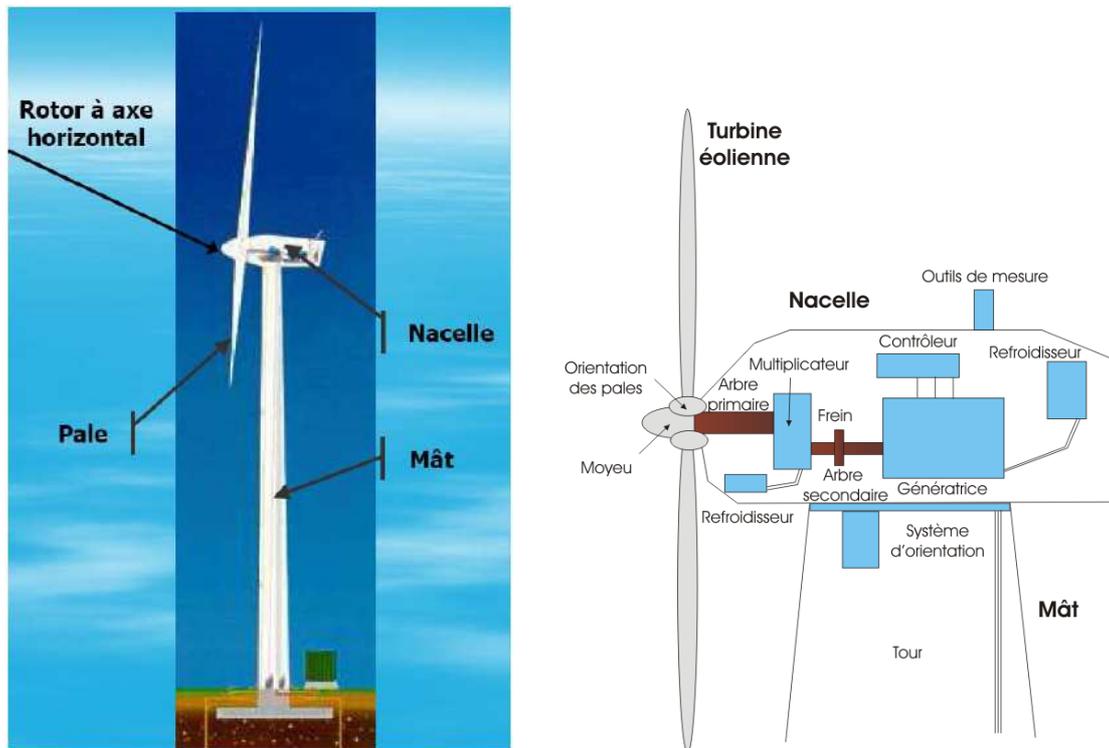


Figure 15. Composants d'une éolienne à axe horizontal

**VI-1. Le mât :** permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

**VI-2. La nacelle :** montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, électriques, électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.

**VI-3. Le rotor :** (en général trois pâles) et un nez. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique.

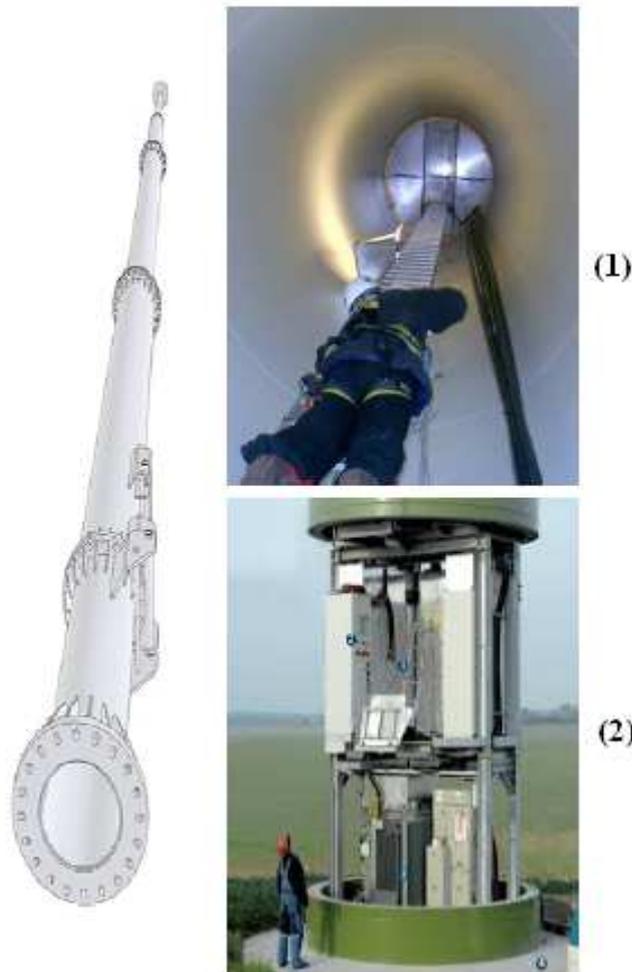
Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu. Un multiplicateur décuple la rotation de l'hélice. L'accélération ainsi produite met en action le générateur qui produit le courant électrique.

**VI-4. Le poste de livraison :** situé à proximité du parc éolien (**transformateur**) permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

## VI-2. Quelques détails des différents éléments d'une éolienne

### VI-2-1. Le Mât

- Appelé aussi Tour
- Mesure de 40 à 100m
- De forme tubulaire
- Généralement en acier
- Permet l'accès à la nacelle
- Peut contenir transformateur...



**Figure 16.** Le mat d'une éolienne  
(1) Armoire de commande / (2) Transformateur

### VI-2-2. L'anémomètre

- Girouette de différentes technologies
- Reliée au système de contrôle commande



**Figure 17.** Différents types de girouettes (anémomètre)

### VI-2-3. Le système d'orientation

Dispositif d'orientation d'une éolienne de 750 kW, vue d'en bas vers la nacelle : couronne d'orientation tout à l'extrémité, roues dentées des moteurs et des freins du système à l'intérieur. Le dispositif d'orientation est activé par un contrôleur électronique qui vérifie la position de la girouette de l'éolienne plusieurs fois par minute.

- Rotor face au vent
- Moteurs électriques et multiplicateurs
- Pivotement de la nacelle
- Couronne dentée (crémaillère)

La couronne permet d'orienter l'éolienne dans l'axe du vent et la bloquée (frein)



**Figure 18.** Système d'orientation d'une éolienne [2]

### VI-2-4. Les pâles

- Fibre de verre et matériaux composites
- D = 7m donne P = 10kW
- D = 27m donne P = 200kW
- D = 72m donne P = 2000kW

Le système tripale est préféré car il limite les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor. Le couple de démarrage dépend de D.

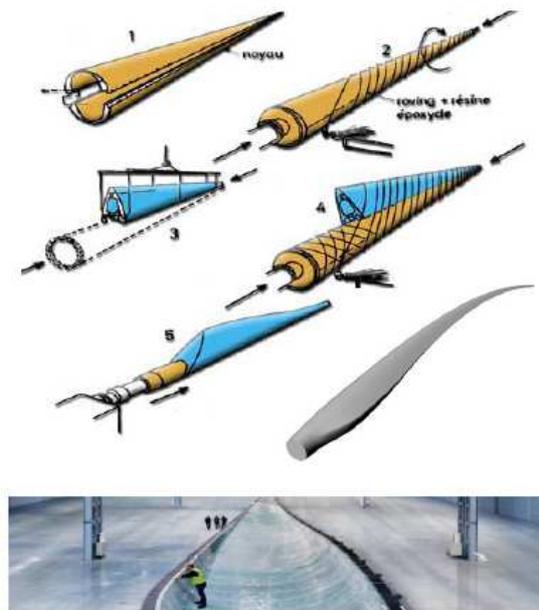


Figure 19. Les pâles d'une éolienne [2]

#### VI-2-5. L'arbre primaire

- Dit « arbre lent »
- Reçoit la rotation du moyeu
- Arbre du rotor de la turbine éolienne
- Vitesse de rotation : 20-40 tr/min
- Relié l'arbre secondaire par le multiplicateur



Figure 20. Arbre primaire d'une éolienne [2]

### VI-2-6. Le multiplicateur

- Relie l'arbre primaire au secondaire
- Constitué d'engrenages
- Passage de 20-40tr/min à 1500tr/min



Figure 21. Multiplicateur d'une éolienne [2]

### VI-2-7. Le frein – arbre secondaire

- Dit « arbre rapide »
- Plus mince
- Relie le multiplicateur à la génératrice
- Équipé d'un frein à disque (sécurité vent)



Figure 22. Arbre secondaire d'une éolienne [2]

## VI-2-8. La génératrice

- Transforme  $E_{\text{mécanique}}$  en  $E_{\text{électrique}}$
- Jusqu'à 7,5MW de puissance
- Machine asynchrone (si multiplicateur)
  - Peu utilisée en site isolé
  - nécessite condensateurs - corriger  $Q_{\text{reac}}$
- Machine synchrone (sans multiplicateur)
  - Aimants permanents ou électroaimants
- Courant alternatif (alternateur: rotor et stator)

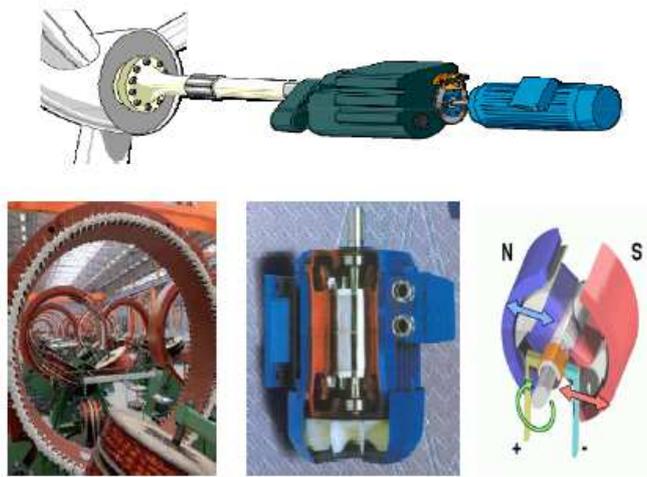


Figure 23. Génératrice d'une éolienne [2]

## VI-2-9. Le contrôleur électronique

- Contrôle le fonctionnement de l'éolienne
- Gère 100-500 paramètres
- Gère le démarrage, le freinage
- Gère l'orientation de la nacelle / vent
- Gère le pas des pâles
- Gère le refroidissement
- Relié à la girouette



Figure 25. Contrôleur Enercon en pied de mât

## VII. Eolienne Asynchrone et Synchrone

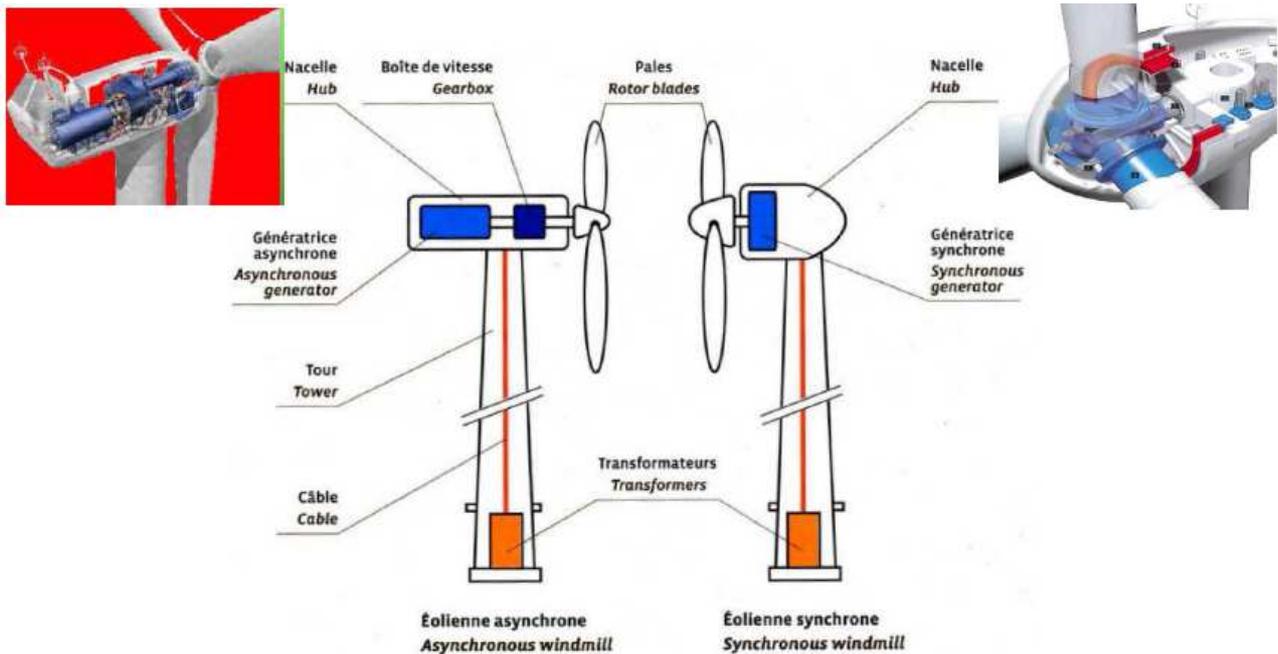


Figure 24. Eolienne Asynchrone et Synchrone

### VII-1. Caractéristiques des deux types d'éoliennes

Pâles à pas fixe avec contrôle **Stall**

#### **Machine asynchrone**

Rotor à vitesse constante  
Vitesse rotation élevée  
Multiplicateur mécanique

Pâles à pas variable avec contrôle **Pitch**

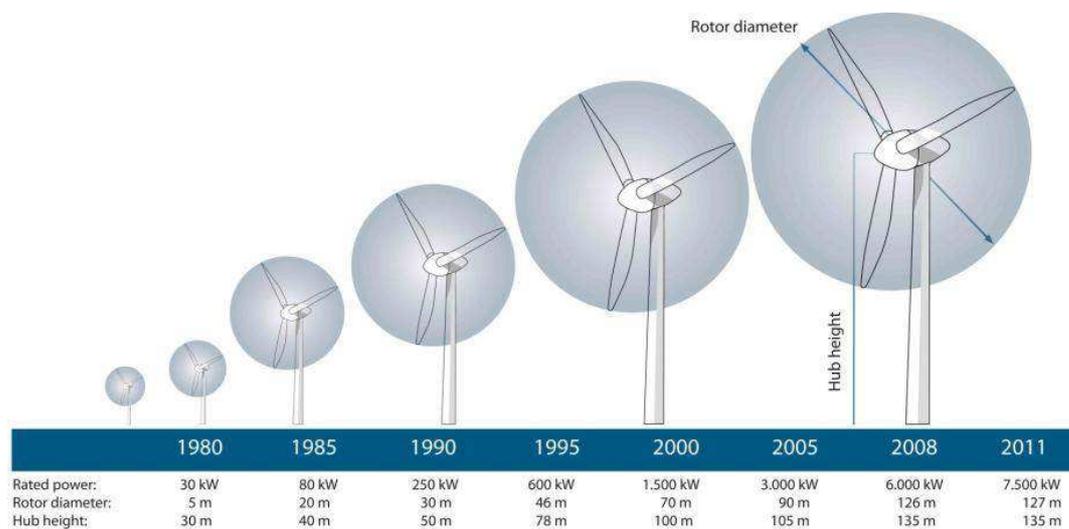
#### **Machine synchrone**

Rotor à vitesse variable (faible)  
Suppression du multiplicateur  
Maintenance et bruit diminués  
Rendement mécanique augmenté

## VIII. Évolution de la technologie de l'énergie éolienne

Figurant parmi les sources d'énergie les plus anciennes, l'énergie éolienne est exploitée par l'Homme depuis des millénaires<sup>1</sup> : il suffit d'évoquer les premiers Égyptiens remontant le Nil à la voile, les moulins à vent verticaux permettant de pomper l'eau et de moudre le grain et plus proches de nous, la production d'électricité raccordée au réseau, les applications hors-réseaux destinées à l'électrification des campagnes ou des zones reculées ou encore la production d'électricité pour les stations de base des téléphones portables.

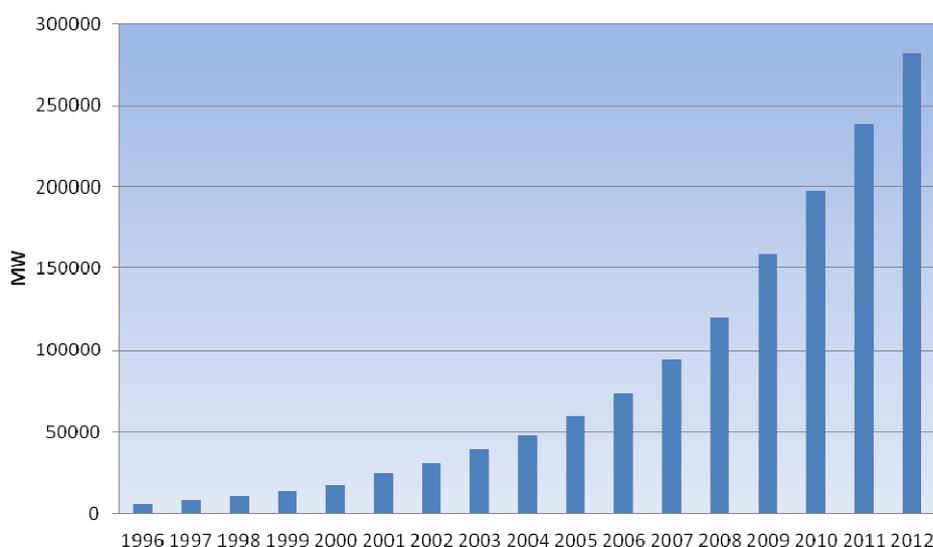
Les dernières décennies ont vu la technologie de l'éolien connaître un développement fulgurant, en particulier en ce qui concerne la production d'électricité. En 1980, la puissance nominale des éoliennes n'était que de quelques watts. Aujourd'hui, celle des plus grandes structures peut atteindre 7 500 kW (voir Figure 26). Les plus grandes éoliennes possèdent actuellement un rotor de 126 mètres de diamètre et des machines aux dimensions encore plus élevées sont en cours de développement.



**Figure 26.** Évolution de la puissance nominale, du diamètre du rotor et de la hauteur du moyeu des éoliennes de 1980 à 2011 [3]

La croissance exponentielle de la taille des éoliennes fut motivée par un certain nombre de facteurs, et principalement par des avantages économiques : la proportion que représentent les frais de surveillance, les frais de raccordement au réseau et les frais de maintenance sur la valeur du système diminue si la taille augmente.[4]

Les premières éoliennes présentaient une puissance nominale pouvant atteindre 60 kW. En comparaison avec des grandes installations d'aujourd'hui, le coût des petites éoliennes était et reste encore beaucoup plus élevé par kW installé (en € /kW ou en \$ /kW). Cela s'explique en partie par le fait que, proportionnellement au diamètre du rotor, il est nécessaire d'accroître la hauteur des mâts pour éviter tout obstacle au passage du vent et échapper aux conditions défavorables que représentent les turbulences et le cisaillement du vent à proximité du sol. À la fin de l'année 2010, quelques 194 GW de puissance éolienne étaient installés à travers le globe. Si l'on regarde 20 ans en arrière, la capacité installée a été multipliée par plus de vingt (voir Figure 27).



**Figure 27.** Évolution de la capacité éolienne installée dans le monde jusque 2012 [5]

Pendant de nombreuses années, l'Europe a représenté le plus vaste marché mondial au regard du développement de l'énergie éolienne ; depuis 2008 cependant, on constate l'émergence de nouveaux marchés entraînant la croissance de l'énergie éolienne. En 2009, les continents européen, asiatique et nord-américain ont chacun installé de nouvelles capacités générant plus de 10 GW (voir Figure 28).

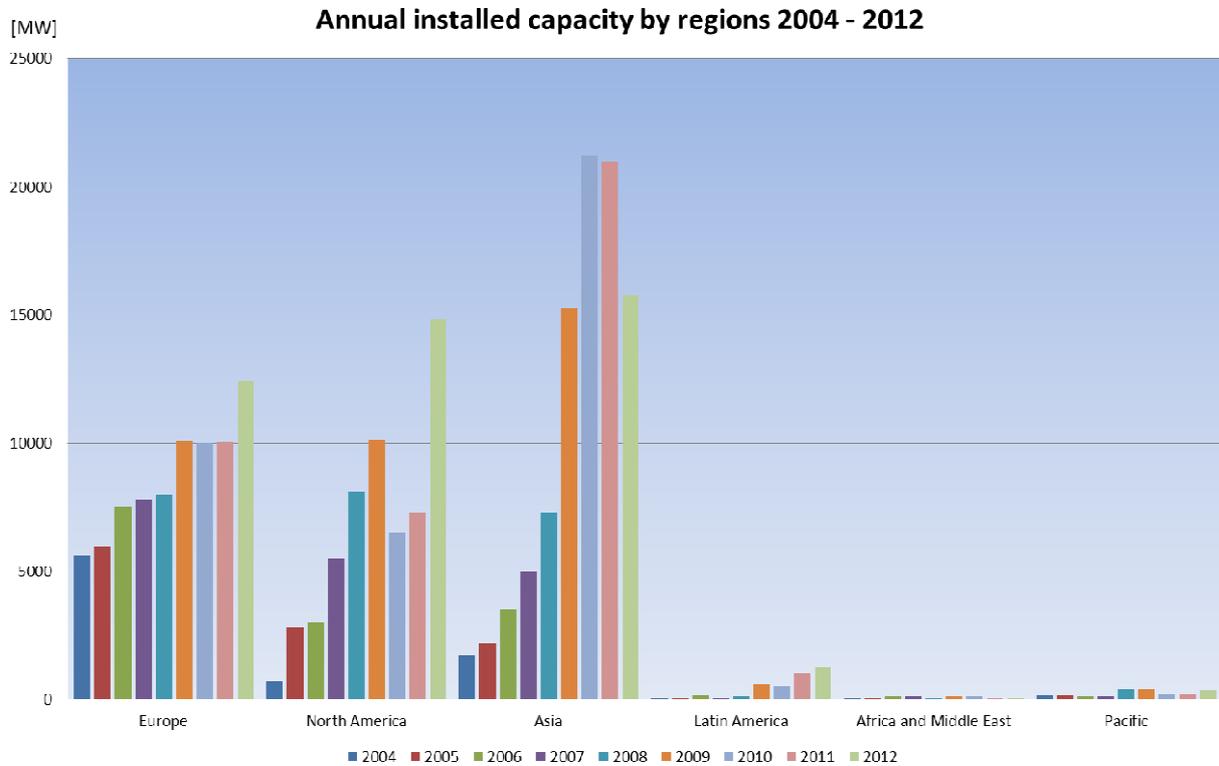


Figure 28. Capacités installées annuellement par région du monde de 2004 à 2012 [3]

## IX. Le seuil du bruit d'une éolienne

Bien que les éoliennes de première génération étaient nuisibles d'un point de vue sonore, il semble aujourd'hui que les avancées technologiques ont permis de réduire considérablement le bruit engendré par ces machines. En effet, sur une échelle de bruit, l'éolienne se situe entre le bruit d'un vent léger et le bruit de l'intérieur d'une habitation, soit environ 45 dB. L'évolution du niveau sonore en fonction du nombre d'éoliennes est logarithmique, c'est-à-dire que l'installation d'une deuxième éolienne augmente le niveau sonore de 3 dB au lieu de le doubler.

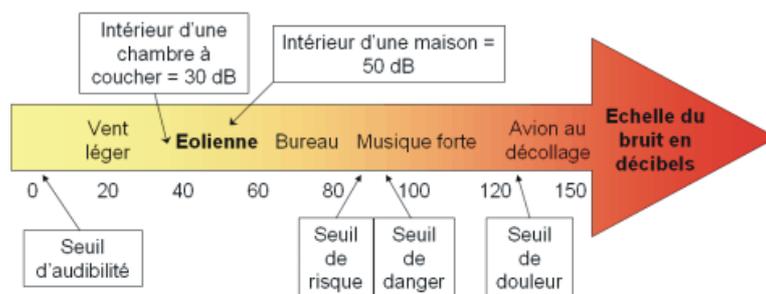


Figure 29. Schéma d'échelle du bruit [6]

Pour diminuer les nuisances sonores :

- les multiplicateurs sont spécifiquement conçus pour les éoliennes. De plus, on essaie de privilégier les entraînements directs, c'est-à-dire les entraînements sans multiplicateur.
- le profil des pales fait l'objet d'études pour réduire les nuisances sonores dues à l'écoulement du vent autour des pales ou à l'émission de sons provenant de la nacelle ou de la tour. Les arbres de transmission sont munis d'amortisseurs pour limiter les vibrations.
- le capitonnage de la nacelle permet également de réduire les bruits.

## X. Mesure du bruit

Les données techniques ci-dessous indiquent le niveau sonore enregistré sur une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

### X-1. Intensité du son

(Mode 0 ; 10 m au dessus du sol ; hauteur du moyeu 80 m ; densité de l'air 1,225 kg/m<sup>3</sup>)

Vitesse du vent	Intensité du son
4 m/s	97,9 dB
5 m/s	100,9 dB
6 m/s	104,2 dB
7 m/s	106,1 dB
8 m/s	107,0 dB
9 m/s	106,9 dB

Document technique de l'éolienne Vestas V90 – 3.0 MW [7]

### Remarque :

**750 éoliennes = 1 réacteur nucléaire**

### Combien d'éoliennes peuvent remplacer un réacteur nucléaire ?

Facile de se poser la question, et pas si difficile que ça de se donner un ordre d'idée par quelques calculs :

### Chiffres

Un réacteur nucléaire possède une puissance d'environ **1 100 MW**.

Un réacteur nucléaire peut délivrer entre **7 000 000 MWh et 8 000 000 MWh par an**

Les éoliennes d'aujourd'hui sont capables de développer une puissance de **5 MW**

Les meilleures éoliennes (off-shore) délivrent en moyenne **17 000 MWh par an**

Le chiffre retenu pour l'éolien européen installé est de **2 000 MWh de production annuelle par MW** de puissance installée

## Calculs

Moyenne annuelle de la production d'électricité pour 1 réacteur nucléaire :

$$(7\,000\,000 + 8\,000\,000) / 2 = 7\,500\,000 \text{ MWh / an}$$

Moyenne annuelle de la production d'électricité pour 1 éolienne :

$$2\,000 * 5 = 10\,000 \text{ MWh / an}$$

Combien d'éoliennes pour remplacer un réacteur ?

$$7\,500\,000 / 10\,000 = \mathbf{750 \text{ éoliennes / réacteur}}$$

## Et en off-shore ?

Un chiffre qui paraît plutôt raisonnable. De plus si l'on utilise au maximum les éoliennes off-shore, les problèmes de bruit, de paysage, et de place se retrouvent considérablement réduits. En recalculant notre quotient, on se rend compte que seulement 450 éoliennes offshore suffiraient à remplacer un réacteur.

À titre d'exemple, la France compte aujourd'hui 58 réacteurs pour 19 centrales nucléaires.

$58 * 450 = \mathbf{26100 \text{ éoliennes off-shore pour remplacer l'intégralité des centrales nucléaires françaises.}}$

## Implantations des éoliennes

**L'inconvénient majeur est que chaque éolienne doit être espacée de 6 fois le diamètre de son rotor pour produire un maximum d'énergie.** Sachant que les grandes éoliennes possèdent des diamètres de 125m, beaucoup de place est nécessaire à leur installation (8 éoliennes par kilomètre soit environ 3 000 km<sup>2</sup> ou 300 000 hectares ou encore 1/200<sup>ème</sup> de la France = 13 fois Marseille = 30 fois Paris).

Il peut ensuite être intéressant d'exploiter **d'autres moyens que l'offshore et les fermes d'éoliennes** pour produire ce genre d'énergie.

## XI. La mesure la vitesse du vent

- Mesure de la vitesse des vents entre 6 mois et 1 an
- Mesure à 10m ou 50m du sol (minimal requis 6m/s)
- Calcul de la vitesse moyenne des vents
- Tracé de la Rose des vents locale (analyse des vents)
- Modélisation du gisement (distribution de Weibull)



**Figure 30.** Principaux dispositifs de mesure de la vitesse de vent

4,5m/s	16,2km/h	Bien que cela varie en fonction du type d'éoliennes, il faut un minimum de vent pour qu'elle se mette à tourner, c'est la vitesse d'amorçage.
6m/s	21,6km/h	Voilà une vitesse moyenne des vents qui vous permet d'exploiter sérieusement une éolienne pour produire de l'énergie, si, au site ou vous projetez installer une éolienne, votre moyenne annuelle est plus basse, il n'est pas sûr du tout que ce soit une opération rentable.
8m/s	30km/h	Les choses sérieusement commencent! C'est un seuil idéal pour installer une éolienne 15m/s 55km/h un bon vent pour votre éolienne, elle est en pleine production, le propriétaire d'un parc éolien voudrait des vents comme ceux-là tous les jours!
25m/s	90km/h	Votre petite éolienne doit être arrêtée, cela va trop vite pour sa frêle constitution! Sa grande sœur fonctionne bien, mais déjà les contrôles automatiques réduisent sa capacité.
30m/s	115km/h	Toutes les éoliennes sont arrêtées, les autres risquent des dommages considérables: perte de pales, rupture de la tour.

Vitesse à 10 m d'hauteur			Échelle de Beaufort	Nature du vent
m/s	Km/h	Nœud		
0 à 0,4	0 à 1,4	0 à 0,9	0	Calme
0,4 à 1,8	1,4 à 6,5	0,9 à 3,5	1	
1,8 à 3,6	6,5 à 13	3,5 à 7	2	Léger
3,6 à 5,8	13 à 21	7 à 11	3	
5,8 à 8,5	21 à 31	11 à 17	4	Modéré
8,5 à 11	31 à 40	17 à 22	5	
11 à 14	40 à 50	22 à 28	6	Fort
14 à 17	50 à 61	28 à 34	7	
17 à 21	61 à 76	34 à 41	8	Tempête
21 à 25	76 à 90	41 à 48	9	
25 à 29	90 à 104	48 à 56	10	Tourmente
29 à 34	104 à 122	56 à 65	11	
> 34	> 122	> 65	12	Ouragan

**Tableau 1.** Nature de vent suivant l'échelle de Beaufort [8]

## **XII. Références bibliographiques**

[1] <http://valromeysolidaire.free.fr/index/main.php3>

Site web consulté le 19 septembre 2016

[2] [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Site web consulté le 23 janvier 2015

[3] Fédération allemande de l'énergie éolienne, 2010

[4] EWEA (2010) « Wind Energy the Facts - Growth of Wind Turbine Size »,

[www.wind-energy-the-facts.org/](http://www.wind-energy-the-facts.org/)

Site web consulté le 11 Octobre 2016

[5] Conseil mondial de l'énergie éolienne, "Rapport mondial 2011 sur l'énergie éolienne et d'autres données" , Bruxelles, 2012

[6] [fr.wikipedia.org/wiki/Échelle\\_de\\_Beaufort](http://fr.wikipedia.org/wiki/Échelle_de_Beaufort)

Site web consulté le 15 novembre 2017

[7] Revue Sciences et Avenir, juillet 2004

[8] <http://www.vestas.com/fr/fr/actualités/brochures.aspx>

Site web consulté le 25 septembre 2016