



Histoires d'éolienne et d'aéronautique



Marc RAPIN - ONERA

Département Aéroélasticité et Dynamique des Structures



Thierry BONNEFOND – EADS Astrium

Responsable Ligne de produits « pales d'éoliennes »

Conférence Mercredi 9 février 2011 - ENSICA Toulouse

Histoires d'éolienne et d'aéronautique

Développement éolien

Structure

Aérodynamique / Aéroélasticité

Nouveaux Domaines

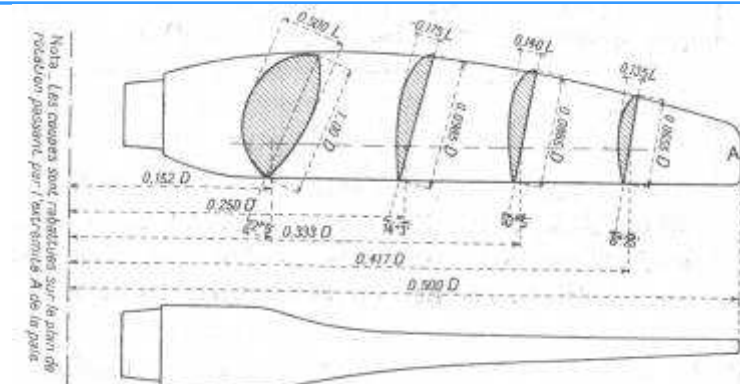
Développement éolien : histoire

Début du 20^{ème}

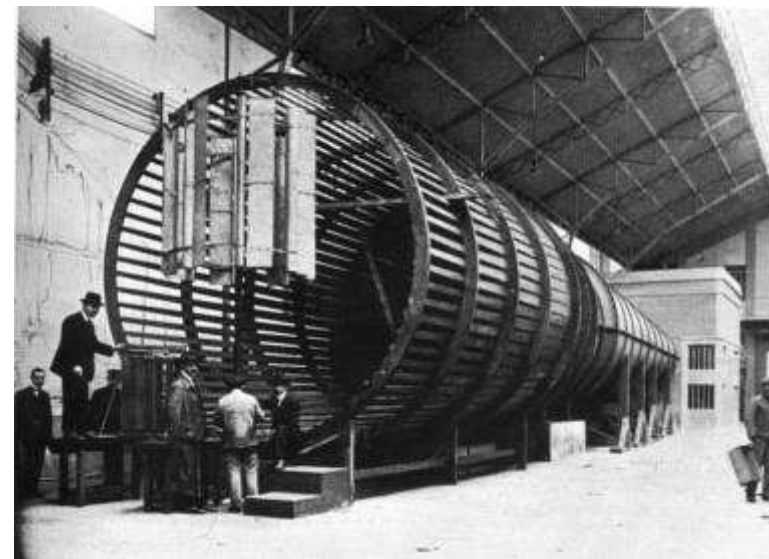


1923 - L. Constantin, "Bois Rosé"

Conférence AAAF - 9 février 2011



Années 10 - Travaux Eiffel

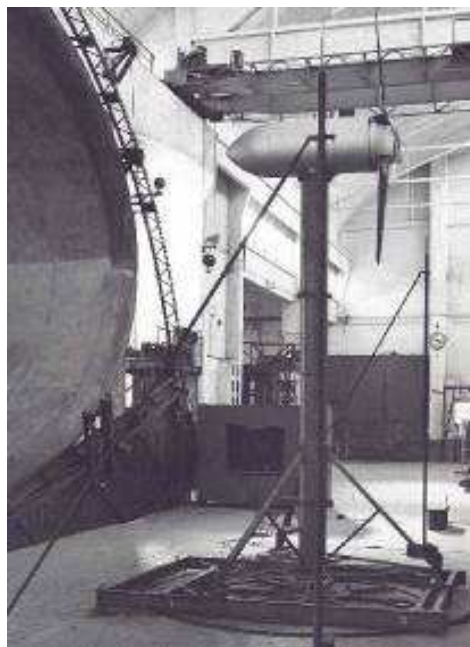


1922 - Lafond model, IAT St Cyr

Développement éolien : histoire

Début de l'éolien à l'ONERA DADS

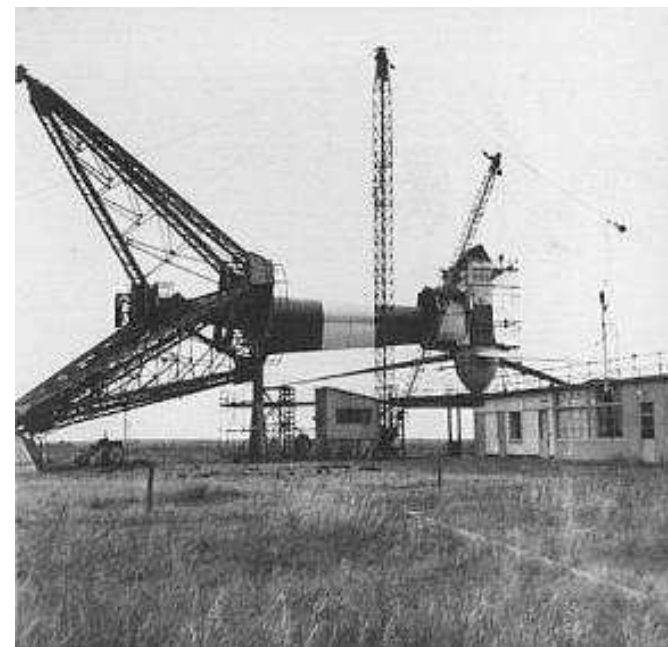
- Efforts après-guerre (EDF et pouvoirs publics)
- Prototype BEST-Romani 800 kW pour Ø30 m (1958-1962)
- Rupture pale rapide en 1963 = **premier problème aéroélastique...**



1950 – Premières études



1961 – Rotor Rapide



Prototype 800kW – Nogent-Le-Roi

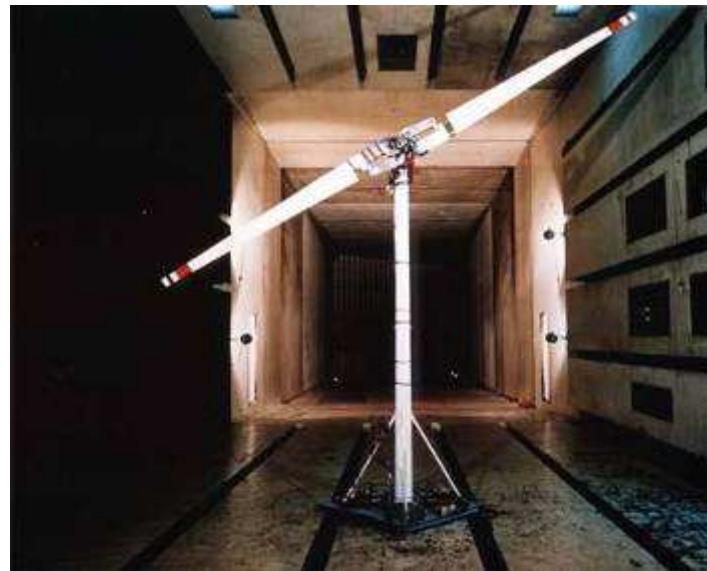
Développement éolien : histoire

Après le 1er Choc Pétrolier

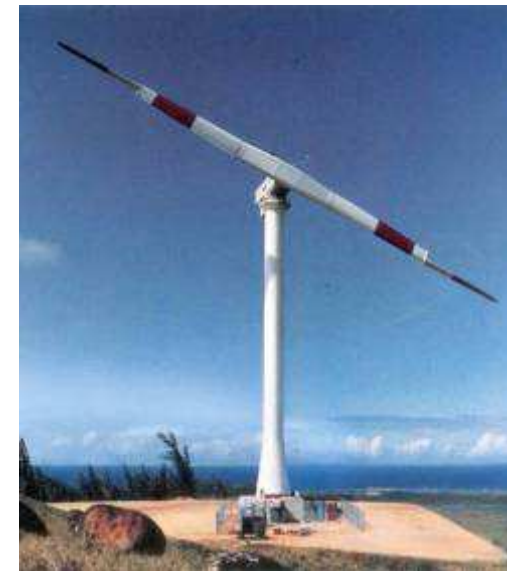
- Effort R&D NASA financé par le DOE (1974-1992: 340 M\$)
- 12 prototypes de 100 kW (1975) à 3,2 MW (1987)
- Génératrices (Westinghouse, General Electric)
- **Pales** (Lockheed, Boeing, Hamilton) présentant des **pbs de fiabilité**



1977 – MOD 0 : 100kW



1979 – Maquette MOD 2 : 2,5MW



1987 – MOD 5B : 3,2MW

Développement éolien : histoire

« Concept Danois »

- Approche pragmatique + développement hors aéronautique
- Création centre de Recherche RISO (1976) + soutien politique

👉 **Passage d'une logique « aérodynamique » à « contrôle-système »**



1957 – Gedser - 200kW



1979 – RISO Nibe A



1989 – V25 – 200 kW



1999 – V80 – 2MW

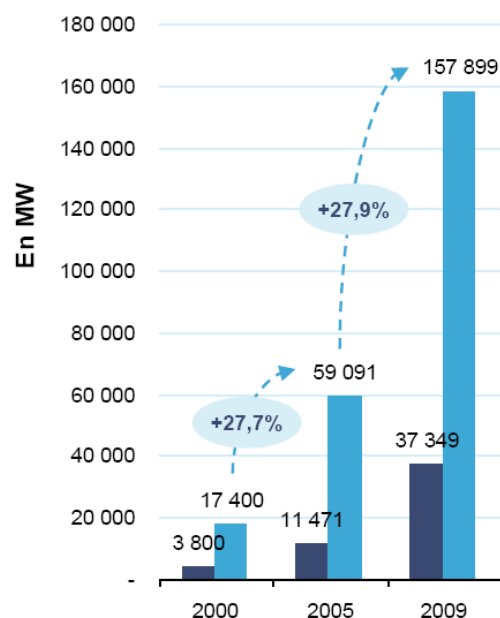
Développement éolien : marché

Un marché en forte croissance :

Une croissance soutenue dans le monde...



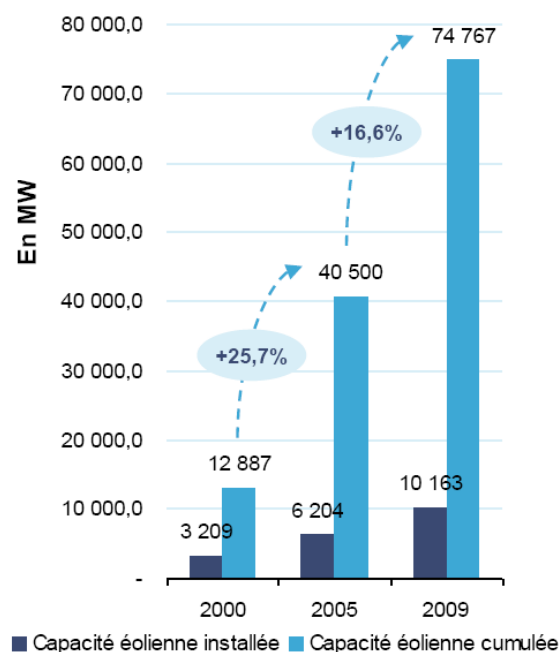
Evolution de la capacité éolienne mondiale



...en Europe...



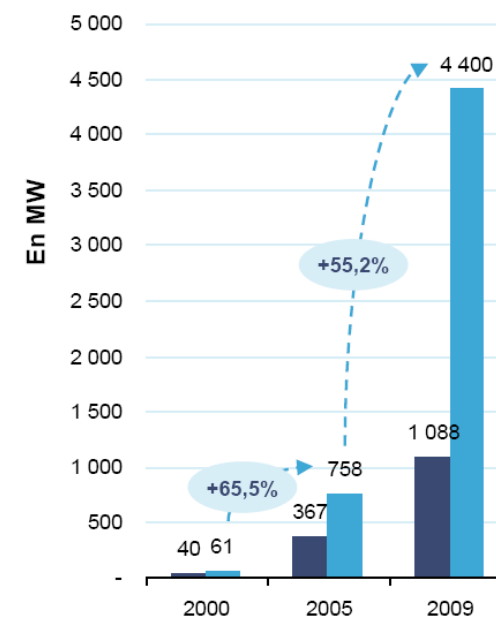
Evolution de la capacité éolienne en Europe



...et qui s'accélère en France

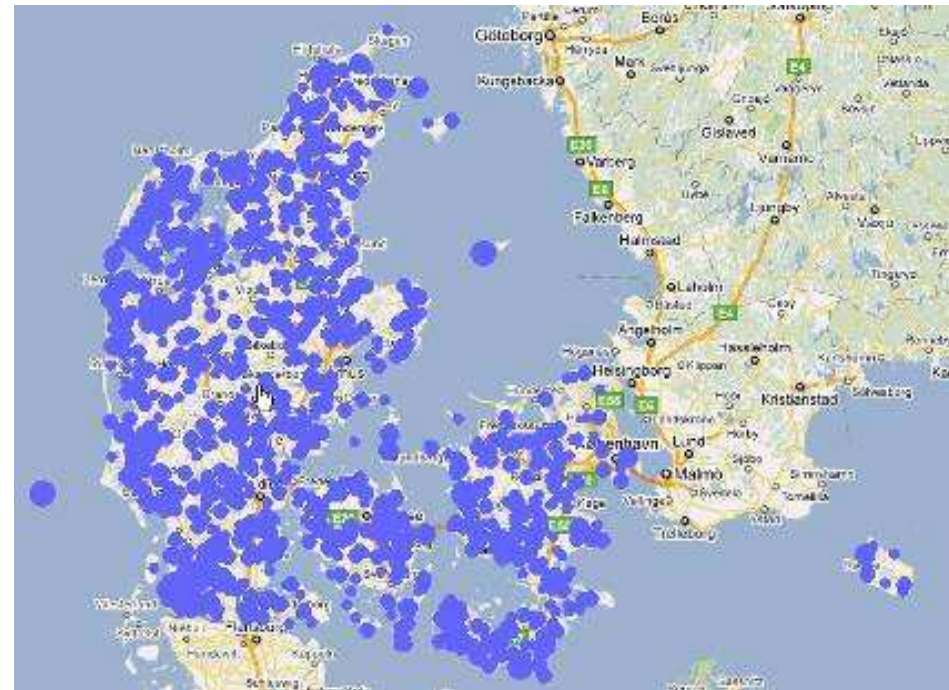


Evolution de la capacité éolienne en France



Source: PRICEWATERHOUSECOOPERS

Développement éolien : marché



Saturation marchés intérieurs

Chiffre 2010 (GW)	% Conso Electrique	
Allemagne	27.2	9.4
Espagne	20.0	14.4
Danemark	3.7	24
Portugal	3.7	14
France	5.7	2.3
EU		5.3

Source:  EWEA

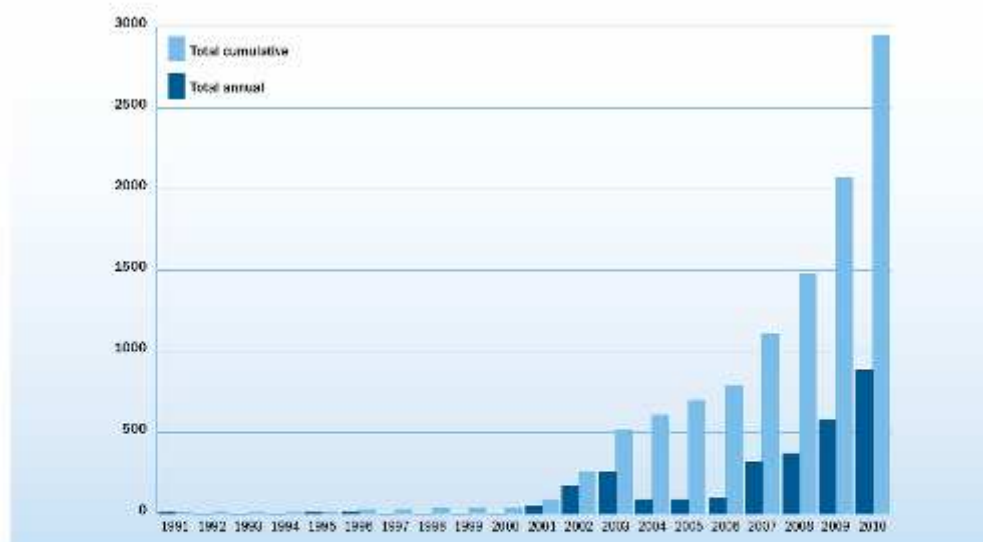
Slow-down of Onshore implementation for pioneer countries

-  **Offshore Developments**
-  **Exportations**
-  **Retrofit**

Développement éolien : marché

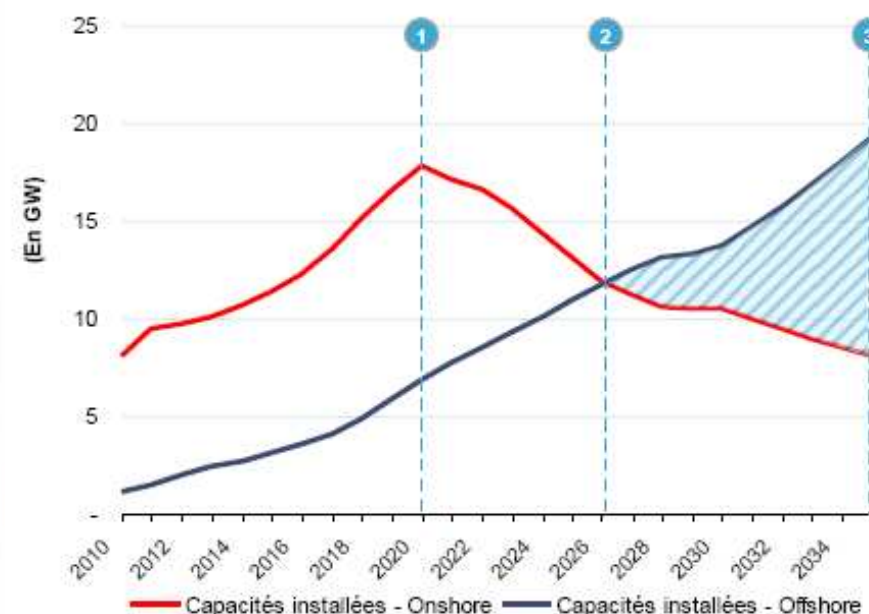
Une part croissante pour l'offshore:

FIG. 8: CUMULATIVE AND ANNUAL OFFSHORE WIND INSTALLATIONS (MW)



Country	UK	Denmark	Nether-lands	Belgium	Sweden	Germany	Ireland	Finland	Norway	Total
No. of farms	13	12	4	2	5	5	1	2	1	45
No. of wind turbines	436	400	128	61	75	19	7	9	1	1,136
Capacity installed (MW)	1,341.2	853.7	246.8	195	163.7	92	25.2	26.3	2.3	2,946.2

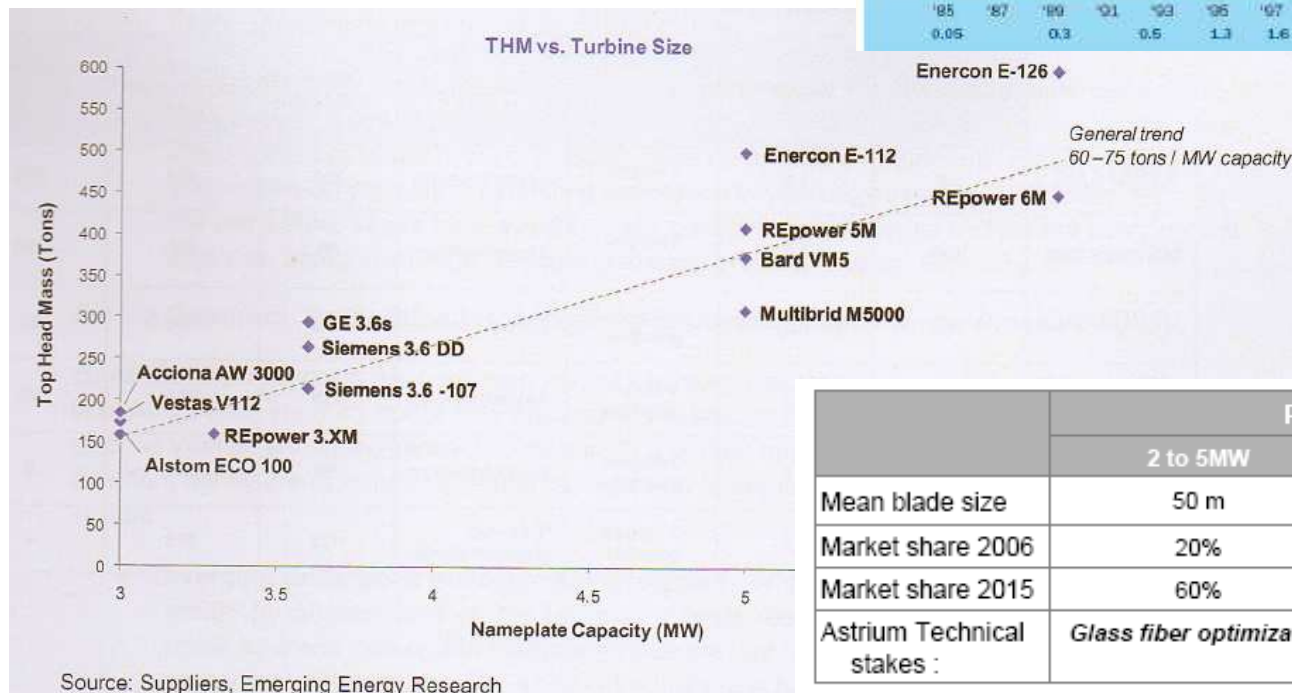
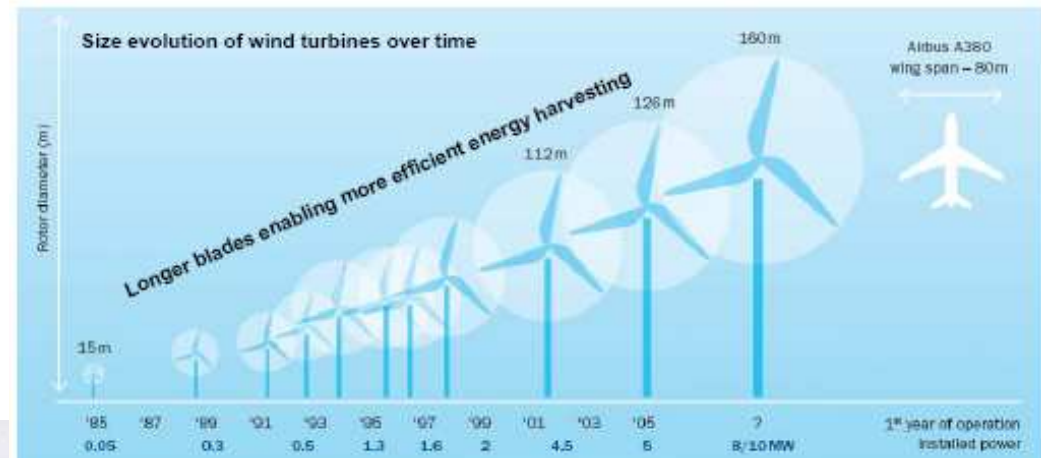
Evolution de la capacité éolienne installée en Europe chaque année



- 1 Saturation des surfaces terrestres disponibles pour l'éolien
 - 2 Les capacités éoliennes offshore installées chaque année dépassent celles de l'éolien onshore
 - 3 En 2035, la puissance éolienne offshore cumulée en Europe dépassera celle de l'éolien onshore
- La puissance éolienne offshore installée dépasse la puissance éolienne installée à terre

Développement éolien : marché

Grandes tendances d'évolution



	Power output of Wind turbines		
	2 to 5 MW	3 to 6 MW	6 to 10 MW
Mean blade size	50 m	55 m	65 m
Market share 2006	20%	0,1%	0%
Market share 2015	60%	20%	20%
Astrium Technical stakes :	Glass fiber optimization Carbon introduction Carbon + system design		

Développement éolien : marché

Développements européens classe 5-6 MW pour Ø126m

- Limites de conception, fabrication, transport et installation!
- Marché Offshore avec contraintes élevées de fiabilité



Pale 61,5m – 15 à 20 tonnes!!



Nacelle 200 tonnes



Fondations...

Développement éolien : marché

Mutation industrielle en cours pour répondre aux nouveaux besoins du marché

Current issue

New required features

Apport de l'aéronautique à l'éolien

Customer Value proposition

1 Design reliable and large turbine blades

Product quality and limits of glass fiber deployment



- Large size composites structures
- Residence to extreme environmental conditions in particular for off-shore
- High loads reduction
- Safety / reliability requirements for 20 years
- High level certification procedures

- Higher product guarantee level

2 Industrialize blade production

Poor industrialization – most of blades are hand-made



- Automated & reliable production processes
- Strong interaction between design and manufacturing processes
- Tooling for composite blades and blade components

- Lower production cost
- Higher turnover

3 Add intelligence to the wind turbine

*Random monitoring Reactive maintenance**



- Condition monitoring, sensors, control systems
- Robotic vehicles for remote access particularly sub-sea
- Wind resource monitoring and wind power yield management

- Higher electricity output
- Lower O&M costs

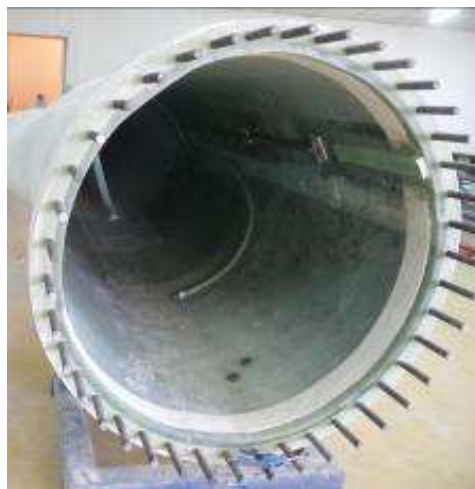
Structure: conception et caractérisation

Architecture des pales

- 2 types concepts principalement utilisés :



- Une interface pale / moyeu « standard » (T-Bolt)



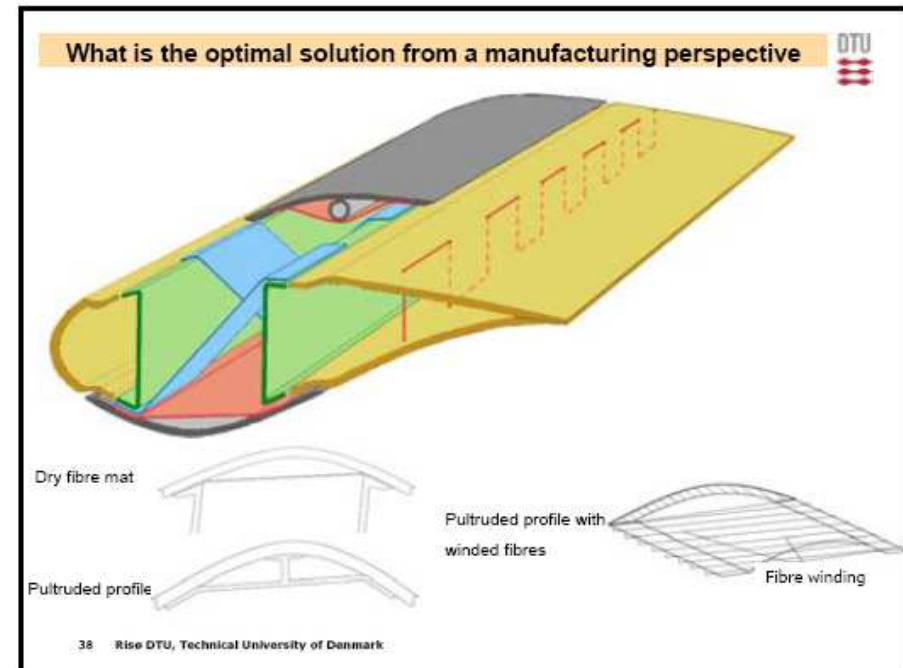
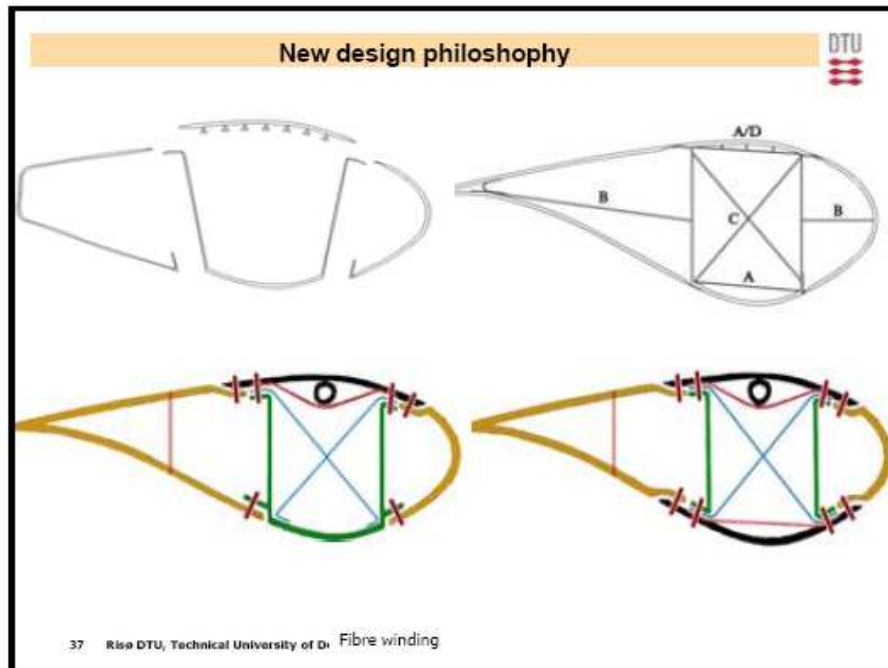
SSP TECHNOLOGY
Catching the winds of Tomorrow



Structure: conception et caractérisation

Architecture des pales

Des solutions innovantes en cours de développement:



Structure: conception et caractérisation

Nouvelles exigences dimensionnantes

- Grandes dimensions => critères de masse
- Cas de charges (effets de gravité + ambiance marine)
- Répétabilité des procédés de fabrication + qualité uniforme
- Maintenance & logistique
- Coût (=> coût de possession)
- Durée de développement réduites (“time-to-market”)

☞ Les architectures & procédés utilisés depuis 25 ans ont atteint leurs limites et ne peuvent plus être étendus pour les futures grandes éoliennes off-shore

☞ **Nouvelles conceptions et ruptures technologiques**

☞ **Meilleure qualité et fiabilité**

Structure: conception et caractérisation

Synergies avec les structures de type « aéronautique »



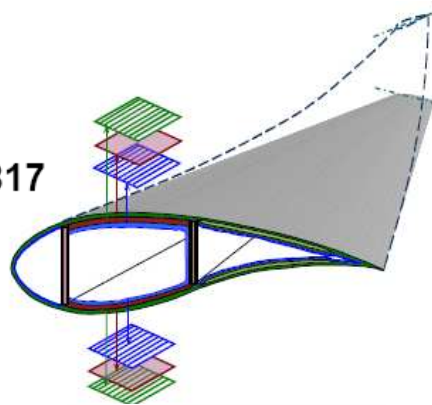
- Grandes dimensions (=> logique de justification basée sur un nombre limité d'essais "échelle 1"),
- Conditions environnementales extrêmes et structures fortement chargées (en particulier pour l'off-shore)
- Intérêt pour des réductions de masse & de coûts,
- Exigences de sûreté et fiabilité,
- Procédures de certification (recommandations récentes de DNV & GL inspirées de l'aéronautique)
- Procédés de fabrication fiables et automatisés

Structure: nouvelles tendances

Architectures & Matériaux

- L'utilisation du carbone permet des géométries plus élancées avec de meilleures performances aérodynamiques
- Structures « adaptatives » & conception couplée aérodynamique/structure => meilleure gestion des charges

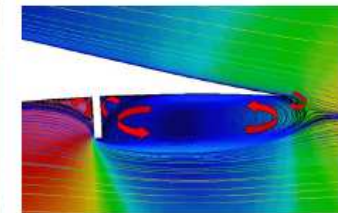
AIAA 2007-817



Bend-twist Coupling.



Aileron, Airfoils with Changing Shape.



Microtabs

- Pales en plusieurs tronçons pour faciliter le transport et/ou la maintenance (*Brevet Astrium*)

Structure: nouvelles tendances

Procédés de fabrication

- Automatisation des procédés & introduction de procédures de contrôles/qualité en cours de production



Entec Machine



MAG



DANOBATGROUP

Structure: nouvelles tendances

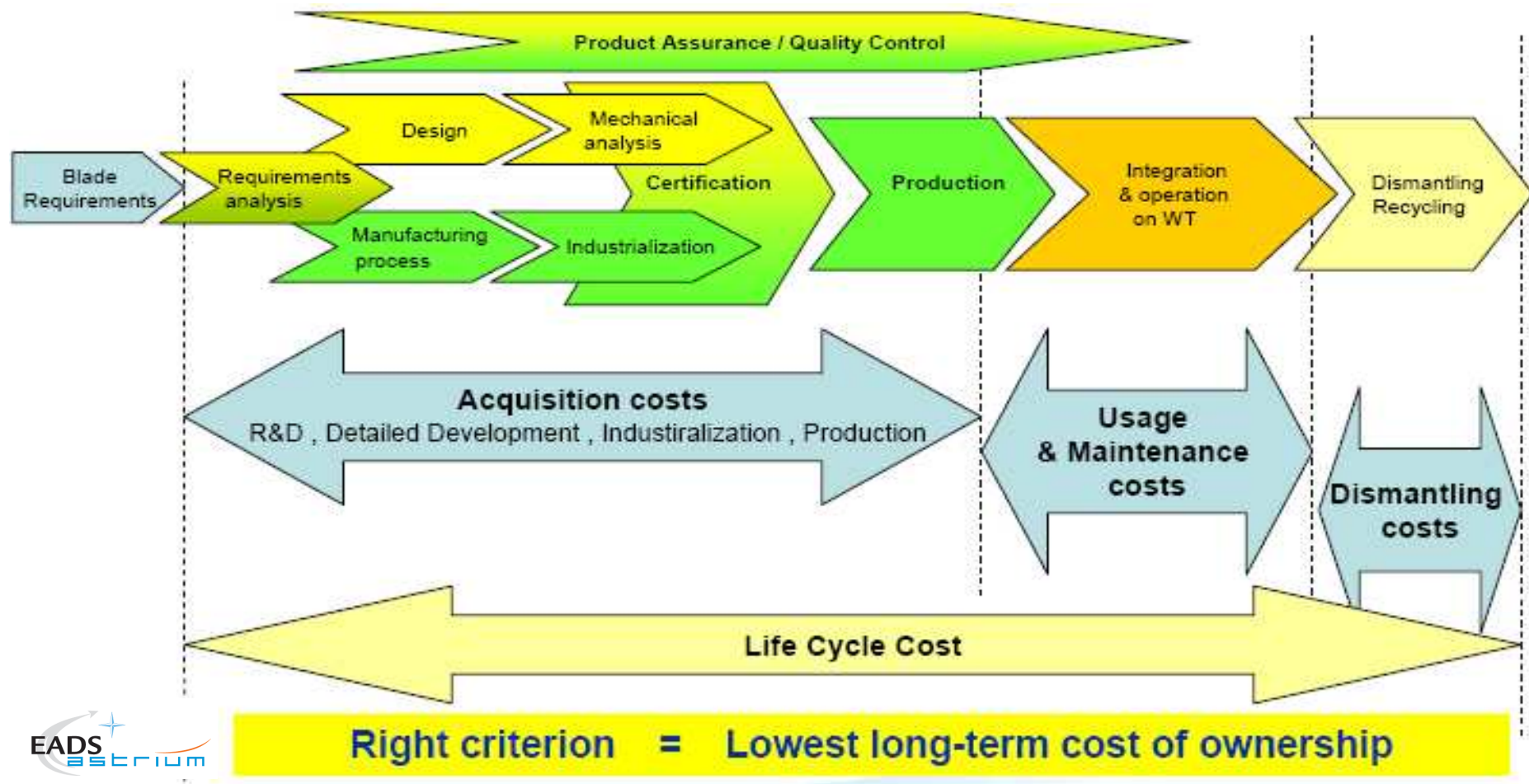
Contrôles non-destructifs

- Utilisation en cours de production et en maintenance



Structure: nouvelles tendances

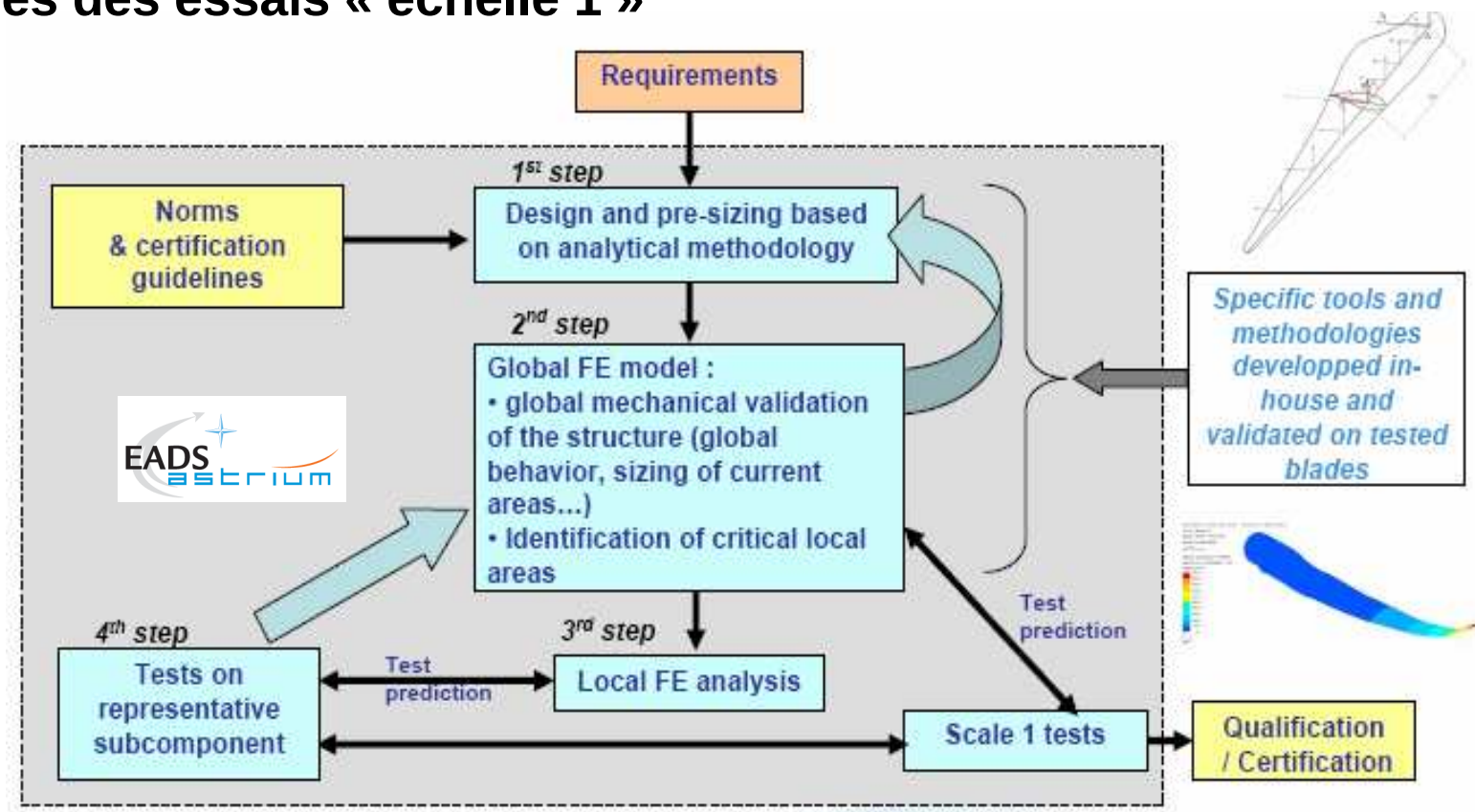
« design to life cycle cost »



Structure: nouvelles tendances

Logique de développement

- Utilisation plus poussée des simulations pour réduire les risques des essais « échelle 1 »



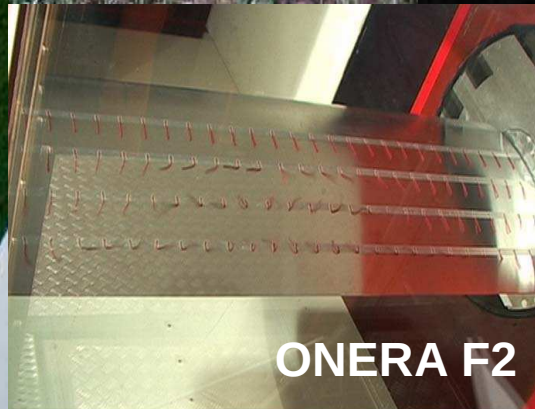
Aérodynamique: simulation et essais

Aérodynamique spécifique **Rotation + Basses Vitesses**

- Surportance et retard au décrochage sections internes
- Profils épais
- Essais en soufflerie = **atmosphère contrôlée**

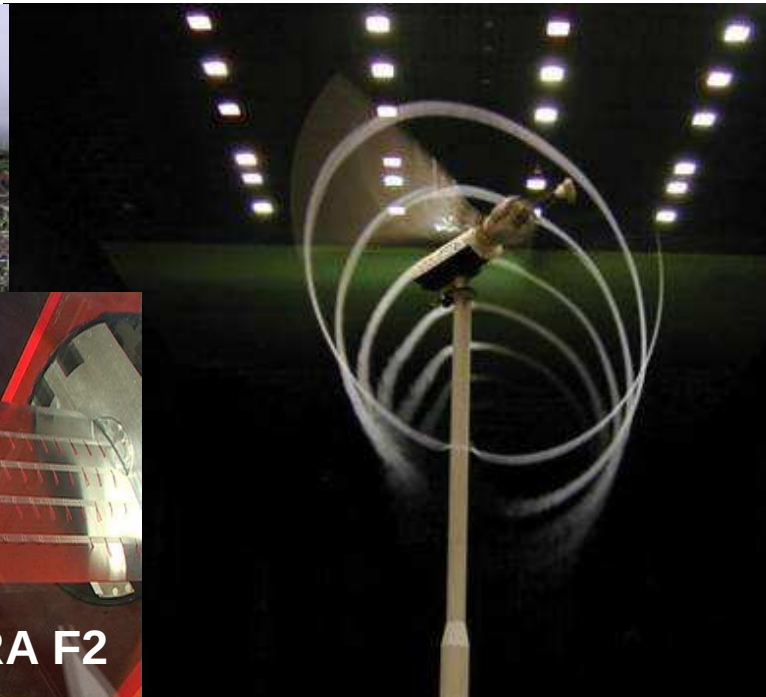


Visualisation Effets de rotation
Conférence AAAF - 9 février 2011



ONERA F2

Générateur Vortex / décrochage

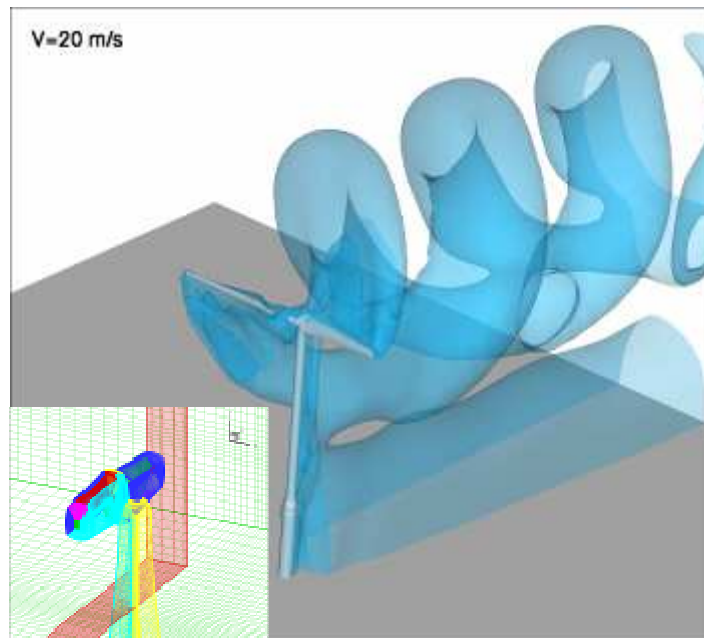


Essais NREL – NASA Ames

Aérodynamique: simulation et essais

Aérodynamique spécifique Sillage

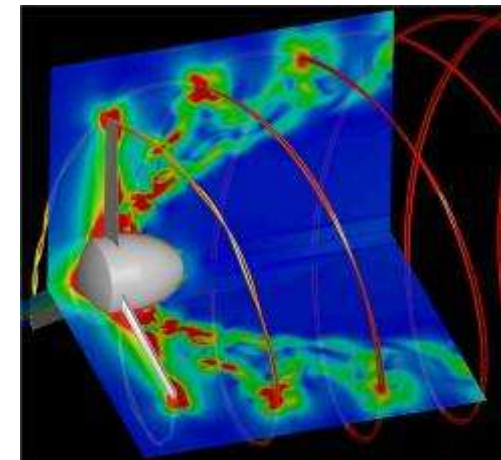
- Simulation CFD
- PIV en soufflerie



Simulation ONERA code elsA



Essais MEXICO – DNW



Aéroélasticité: simulation

Couplage Aérodynamique - Structure Prise en compte des Conditions Externes

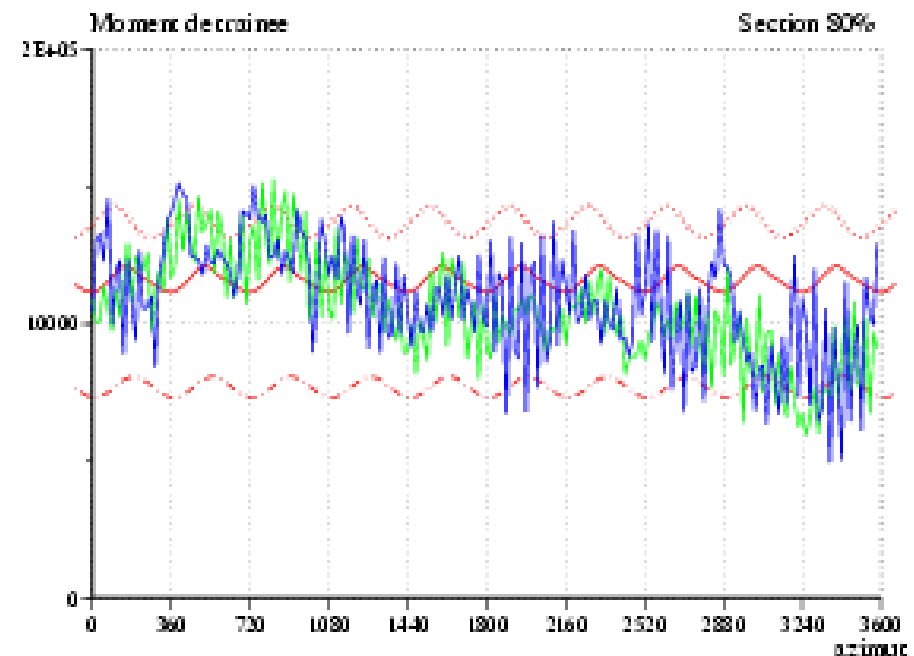
- Rafales, Changements de direction
- Turbulence atmosphérique

sans turbulence	avec turbulence
--- vent 12.0 m/s	--- u sigma=2.65m/s
--- vent 14.6 m/s	--- u v w sigma=2.65m/s
--- vent 17.0 m/s	

👉 Dimensionnement

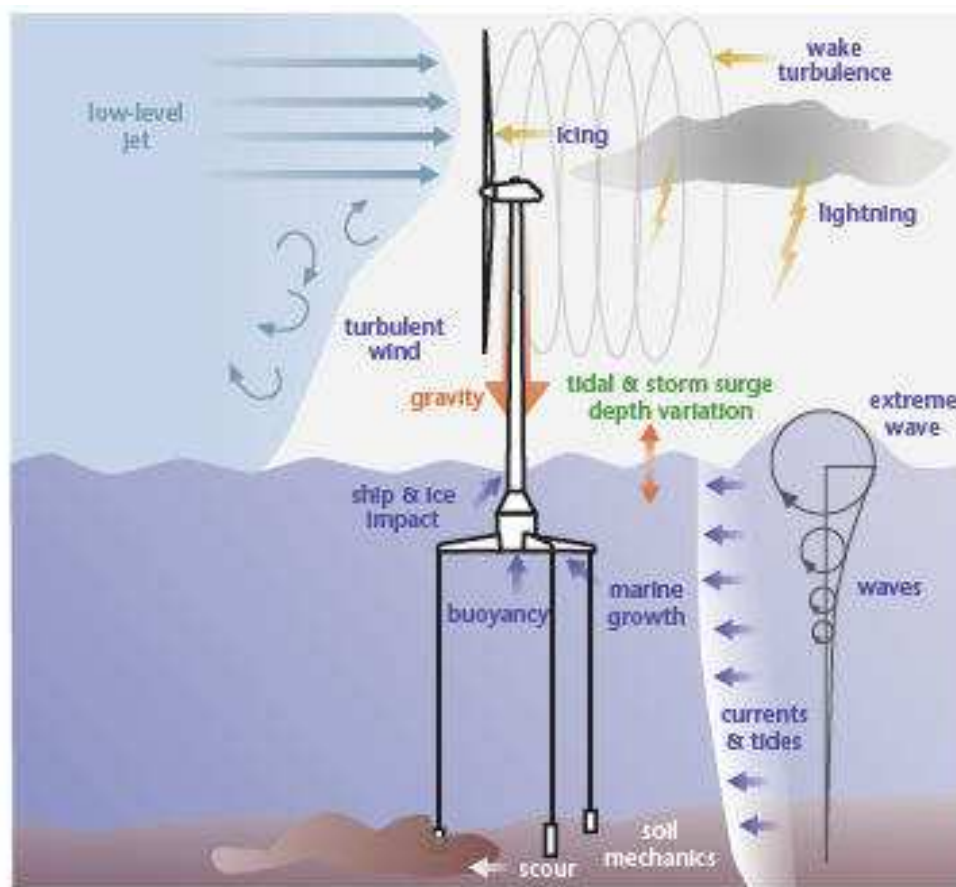
👉 Fatigue

*Calcul ONERA, code ROTOR:
Moment de traînée perturbé sur 10 tours
par la turbulence atmosphérique axiale et 3D*



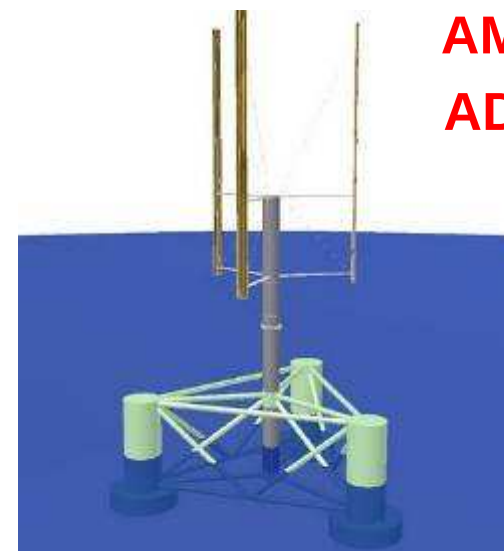
Aéroélasticité: couplage

Offshore posé, flottant...



WinFlo: DCNS, Nass&Wind, Saipem etc

**AMI Français
ADEME 2010**



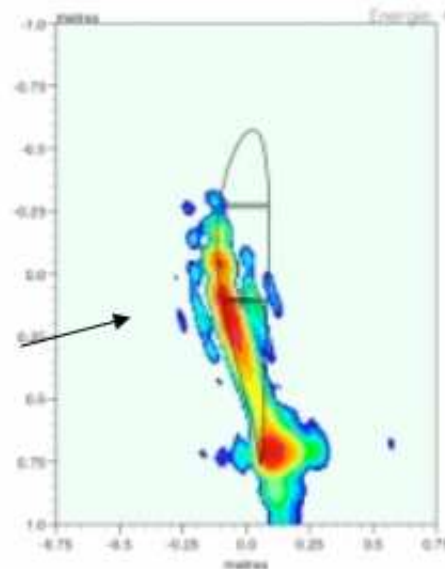
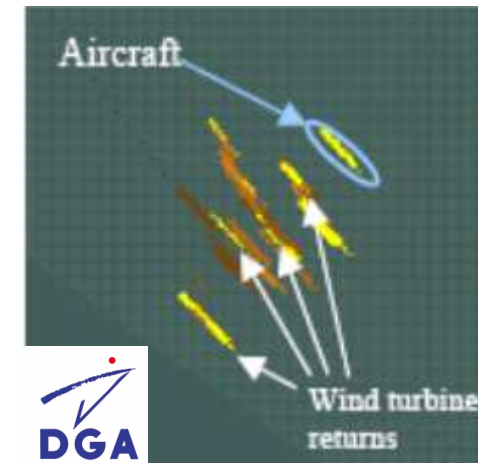
VertiWind:
Nenuphar,
Technip,
EDF etc

Nouveaux Domaines!

Radar

- Principal motif de rejet de dossier
- Pb nbre d'éoliennes et nbre Radar
- Masquage, Réflexions, perturbations Doppler

☞ **Pales furtives**



SER Avion

- Transport : 100 à 1000 m²
- Arme: 0.01 à 10 m²

Eolienne

50 000 m²

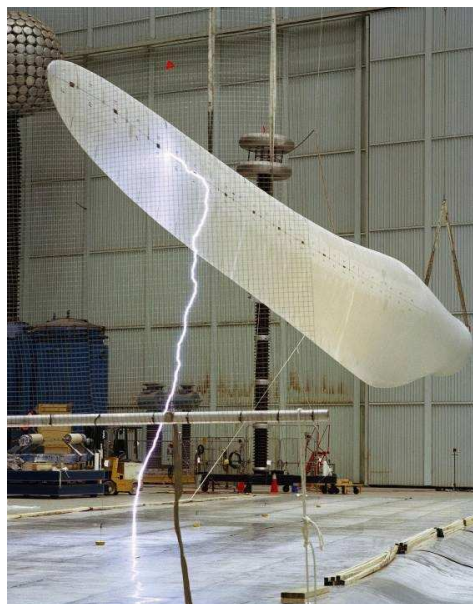
Chambre Anéchoïque BABI + Simulation ONERA

Nouveaux Domaines!

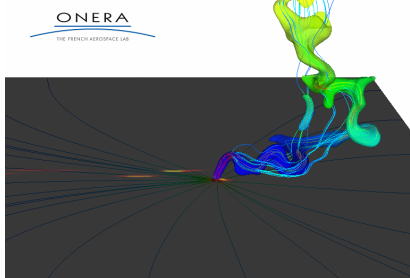
Foudre

- Principale cause de détérioration
- Pb des composites
- Point d'attache? déplacement?

Protection



t=1.00e-02s
ddp=612V



Eolien

- 200 kA & 10 MJ/Ohm
- 150 kA & 5.6 MJ/Ohm

Aéronautique

200kA & 2 MJ/Ohm