

# Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique

B. Francois



## Séminaire "Le développement des Energies éoliennes en Tunisie"

Association des Spécialistes Electriciens de Tunisie

19 novembre 2009



Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP)



Ecole Centrale de Lille

[bruno.francois@ec-lille.fr](mailto:bruno.francois@ec-lille.fr)

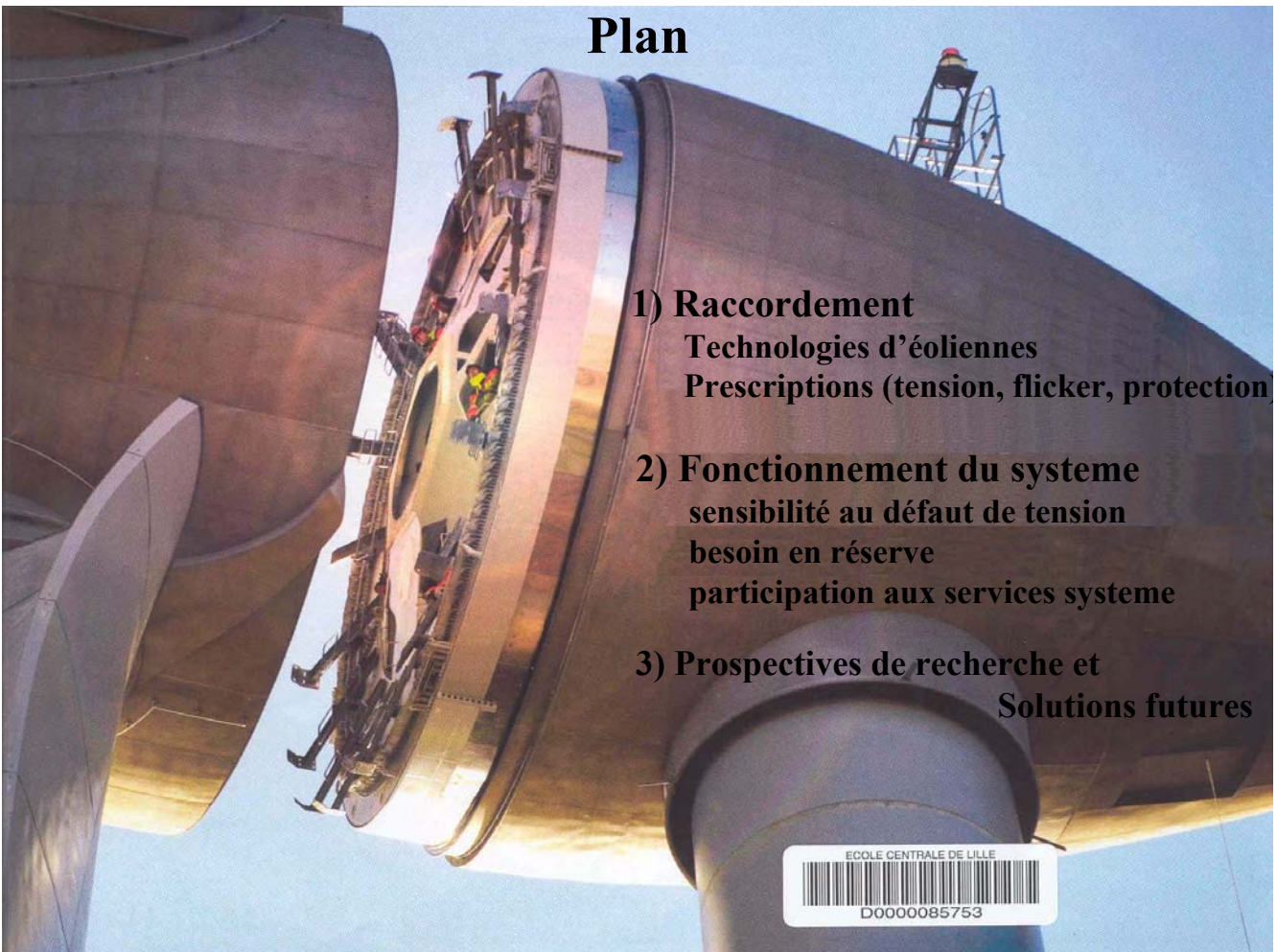
<http://l2ep.univ-lille1.fr/>



1

## Plan

- 1) **Raccordement**  
Technologies d'éoliennes  
Prescriptions (tension, flicker, protection)
- 2) **Fonctionnement du systeme**  
sensibilité au défaut de tension  
besoin en réserve  
participation aux services systeme
- 3) **Prospectives de recherche et**  
Solutions futures



# Introduction

Le Système électrique = adéquation offre de production avec une demande de consommation à travers un réseau.

La demande est **variable** , même si elle est prévisible, il reste un aspect stochastique.

Pour faire face à l'aléa de la demande, les moyens de production doivent être **contrôlables** : maîtrise de l'énergie injectée, fourniture de programme de production, modulations rapides à la hausse ou à la baisse, ...

La production éolienne est **variable**, peu flexible (arrêt/démarrage) et fournit des programmes de production incertain.

La production éolienne **n'est pas programmable** et représente un aléa supplémentaire dans le système.

3

## Quels sont les problèmes ?

- \_ Le raccordement au réseau (capacité d'accueil, qualité de tension, ...)
- \_ Le fonctionnement du système électrique électrique ( tenue aux défauts, participation aux services système, réserve, ...)
- \_ Les marchés de l'électricité (insertion de la production d'énergies renouvelables dans la planification, marché J-1, ajustement, ...)

## Quelles sont les solutions pour une intégration à grande échelle ?

Les réponses changent  
selon la technologie d'éolienne...



4

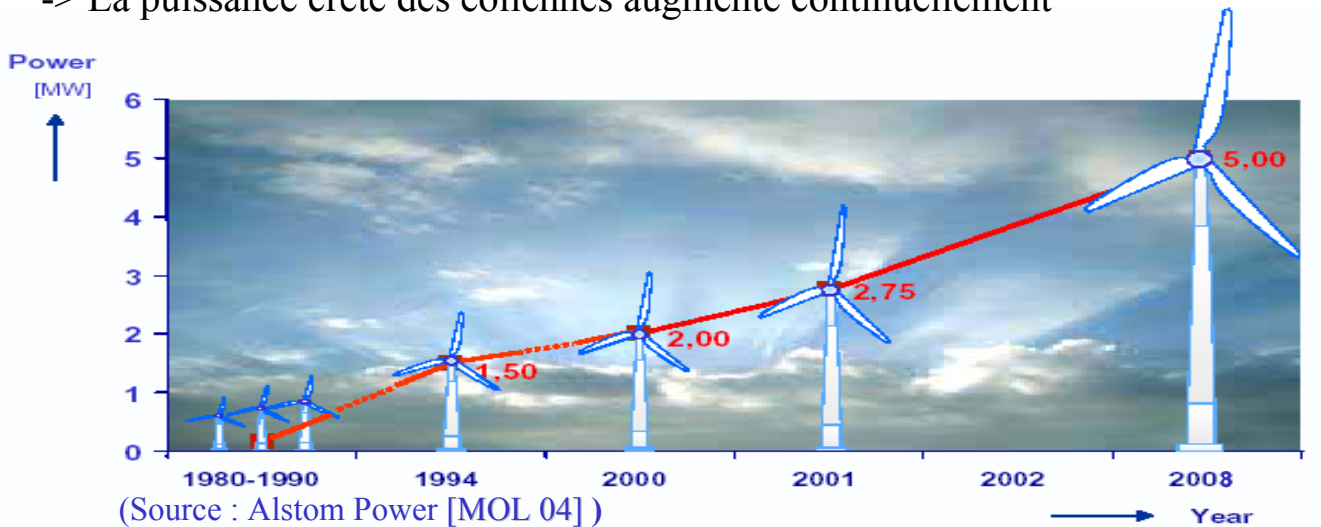
# Le raccordement

## La technologie évolue pour augmenter le productible

-> Sur un territoire donné, le nombre de site exposé à des vents réguliers est limité

-> Objectifs nouveaux : Meilleure exploitation des ressources éoliennes

-> La puissance crête des éoliennes augmente continuellement

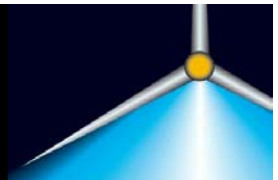


## La technologie suit les exigences des opérateurs de réseau

-> prendre en compte les exigences techniques

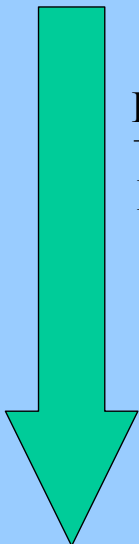
5 -> loi, décrets d'application, appel d'offre, ...

## Coup de projecteur sur les différentes technologies



### Classement général

Puissance crête



**Eoliennes à vitesse fixe**

**Eoliennes à vitesse variable**

Machine asynchrone à cage

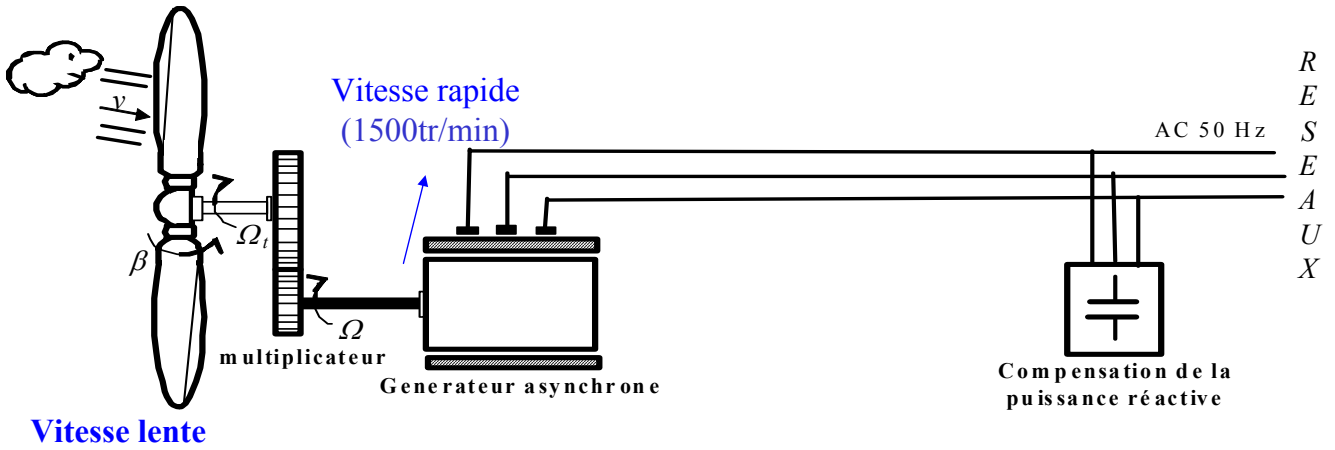
Machine synchrone à rotor bobiné

Machine synchrone à aimant permanent

Machine à double alimentation

# Technologie : Eolienne à vitesse fixe

## Principe de base

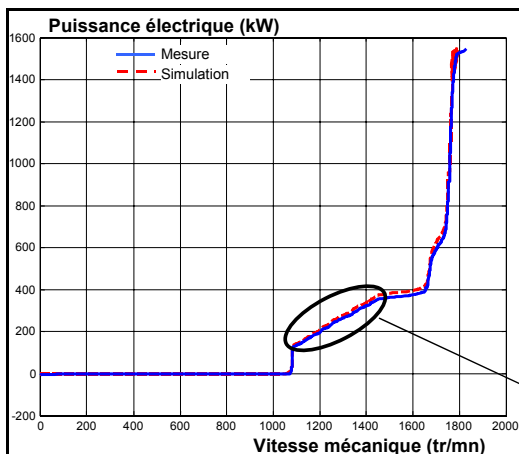
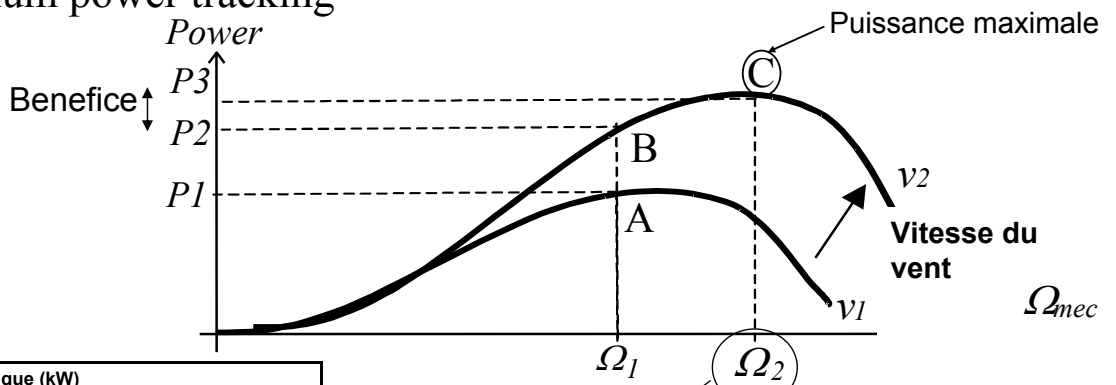


7

# Technologie : Eolienne à vitesse variable

## Principe de base

⇒ Maximum power tracking



La vitesse du générateur doit être adaptée

Mais, ce domaine de fonctionnement est limité aux faibles vitesses et faibles puissances

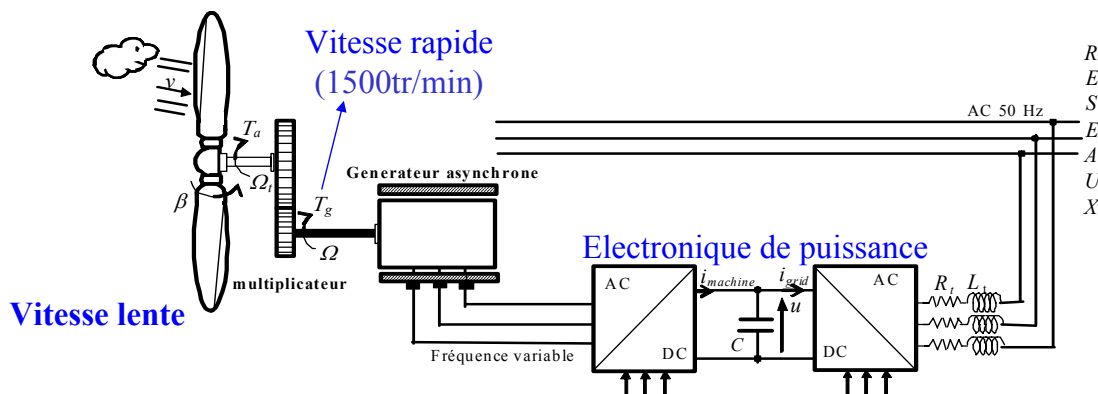
# Technologie : Eolienne à vitesse variable

## Avantage

- ⇒ Maximum power tracking
- ⇒ Reduction du bruit (lors des fonctionnement à faible puissance)
- ⇒ Reduction des efforts mécaniques
- ⇒ Un peu moins de variations de puissance (stockage mecanique dans la turbine, stockage électrique dans le bus continu)
- ⇒ Une plus grande flexibilité par l'électronique de puissance, augmentation de la contrôlabilité ( contrôle possible en puissance active, reactive, en tension, ...)

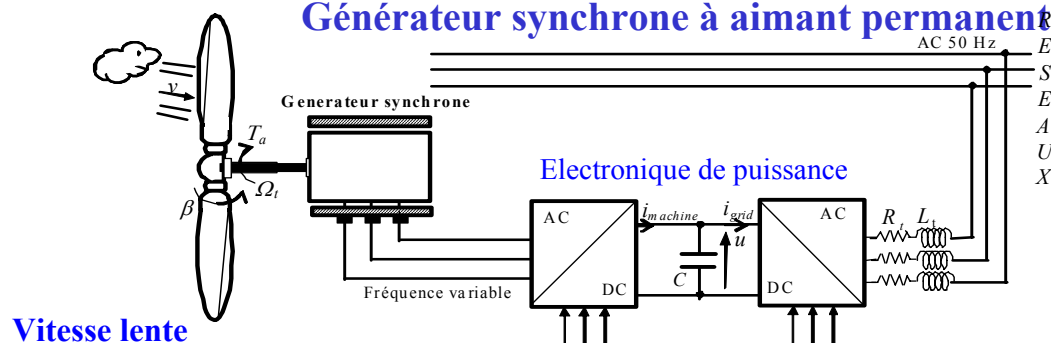
9

# Technologie : Eolienne à vitesse variable



## Générateur synchrone à rotor bobiné

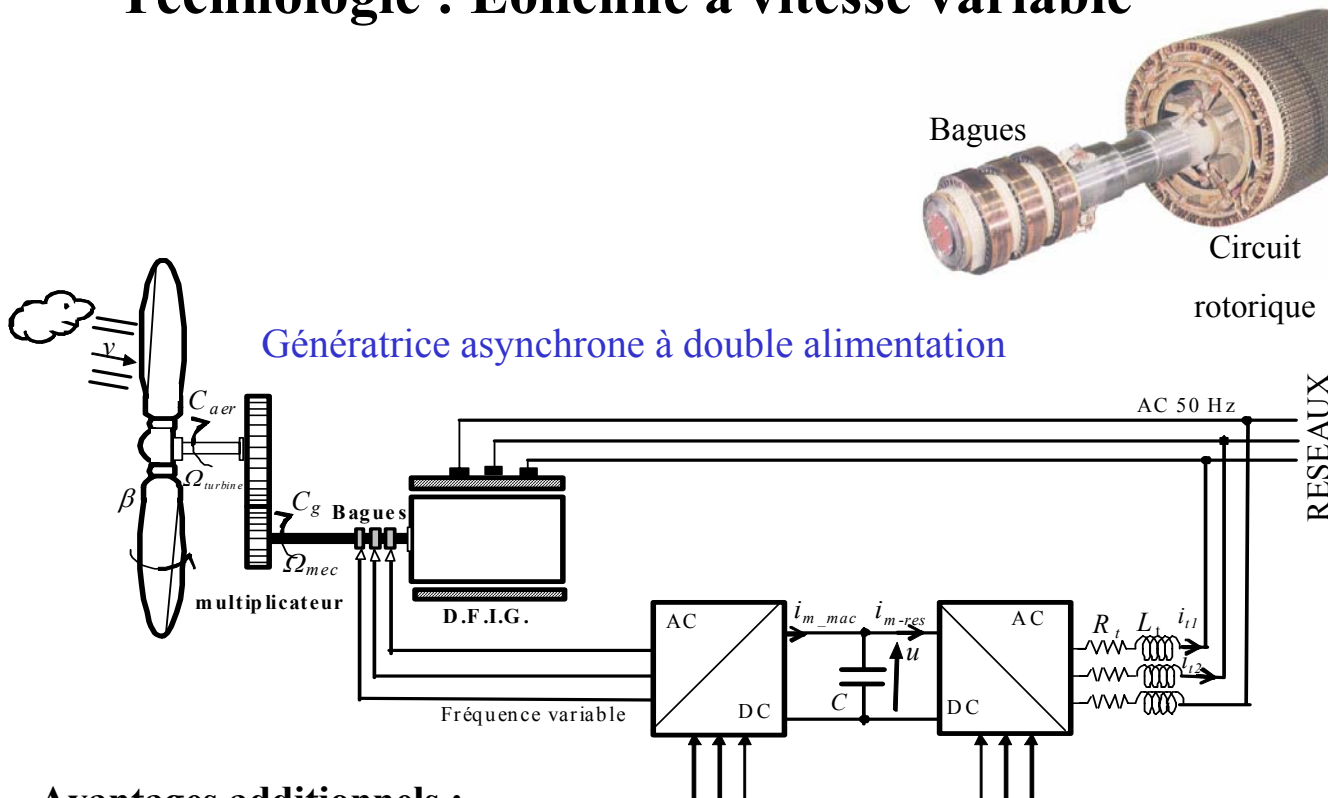
## Générateur synchrone à aimant permanent



10

[FRA 05]

# Technologie : Eolienne à vitesse variable

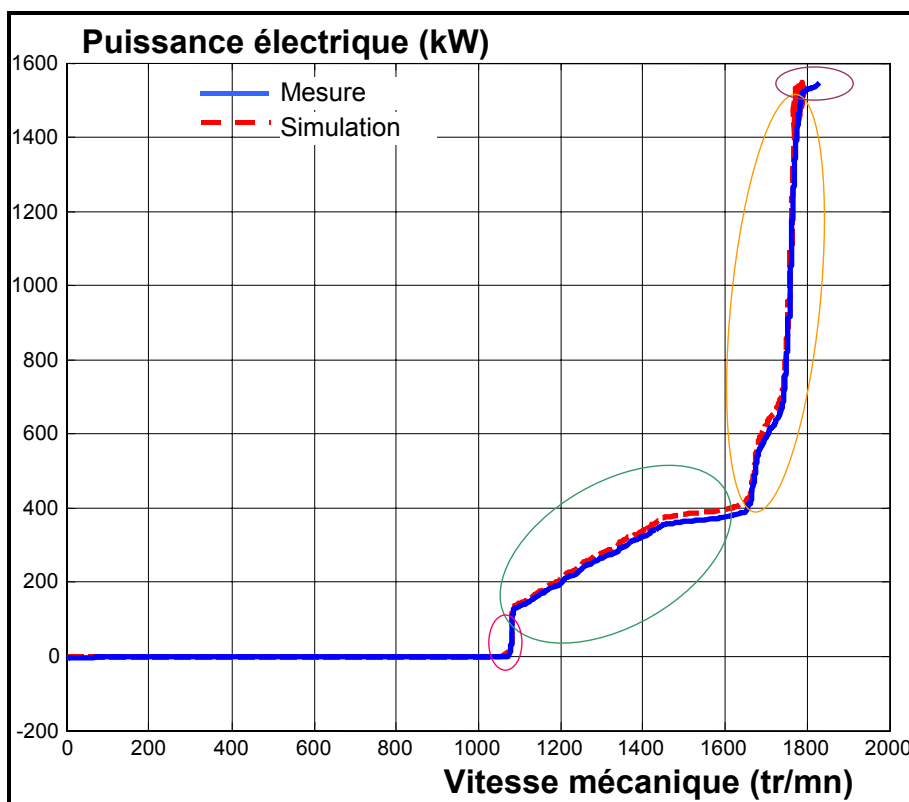


## Avantages additionnels :

- l'électronique de puissance est dimensionnée à 30% de la puissance totale
- Intérêt économique

11

## Caractéristique Puissance/ vitesse d'une éolienne à base de génératrice asynchrone à double alimentation



Puissance constante

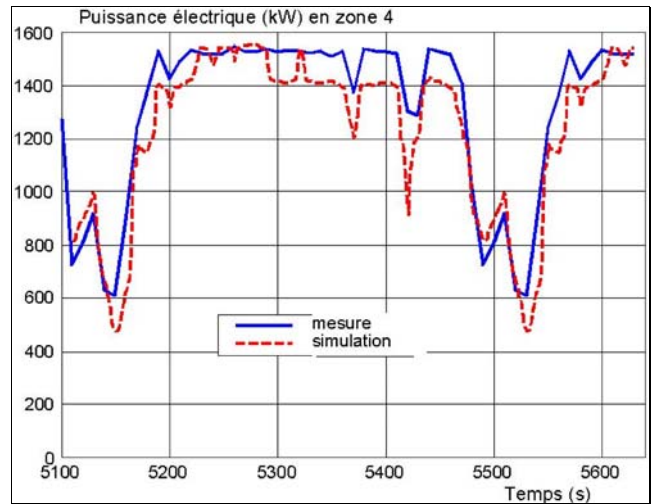
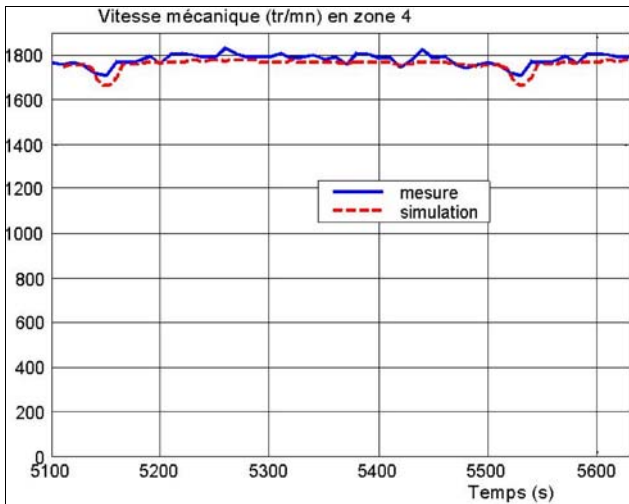
Vitesse constante

MPPT

Démarrage

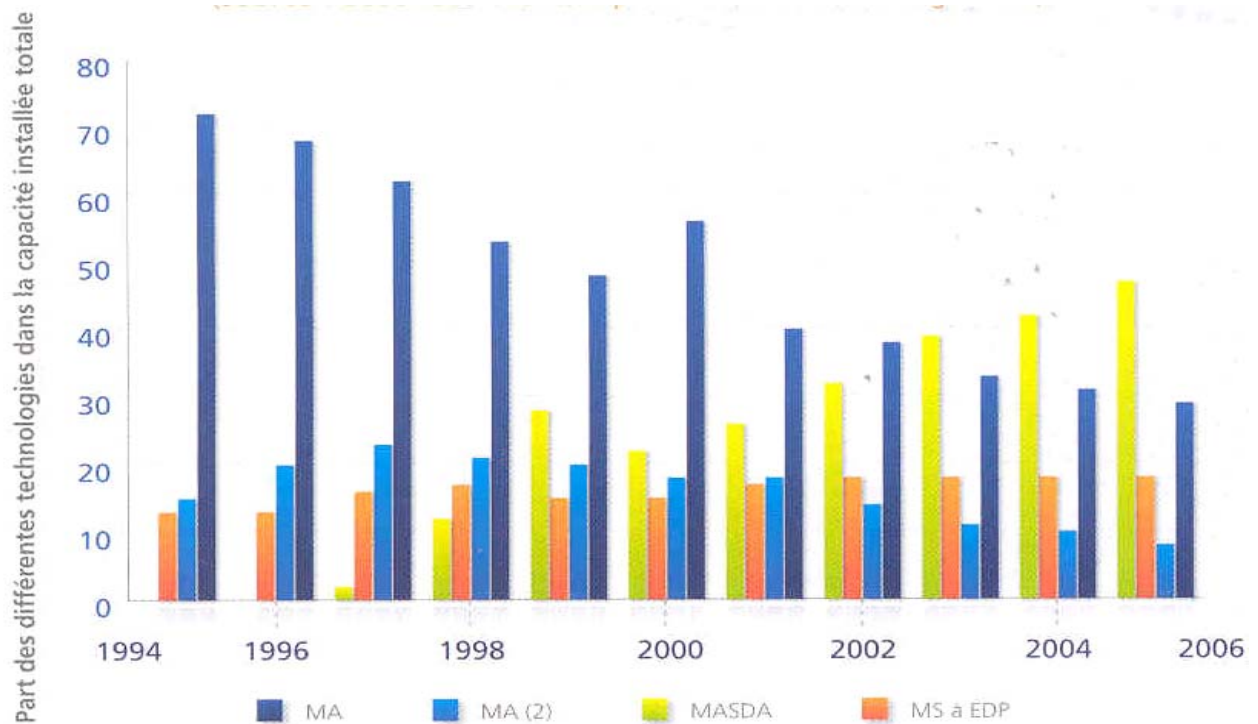


# Relevés dynamiques



13

## Evolution des technologies [2008 IEEE Workshop on Wind power Integration]



MA : machines asynchrones  
 MA (2) : machines asynchrones à rotor bobiné  
 MASDA : machines asynchrones à double alimentation  
 MS à EDP : machines synchrones à électronique de puissance

14

# Raccordement : Prescriptions

- Résolution des problèmes locaux de connexion, tels que :

- \_ **Capacité d'accueil (transit)**

- Vérifier si on est capable d'évacuer vers la puissance produite vers les consommateurs

- Dimensionnement des équipements (transformateurs, postes, lignes)

- \_ **Transmission des signaux** tarifaires et de télé contrôle, les protections

- \_ **Plan de tension**

- \_ **Qualité de la tension** (flicker, harmonique)

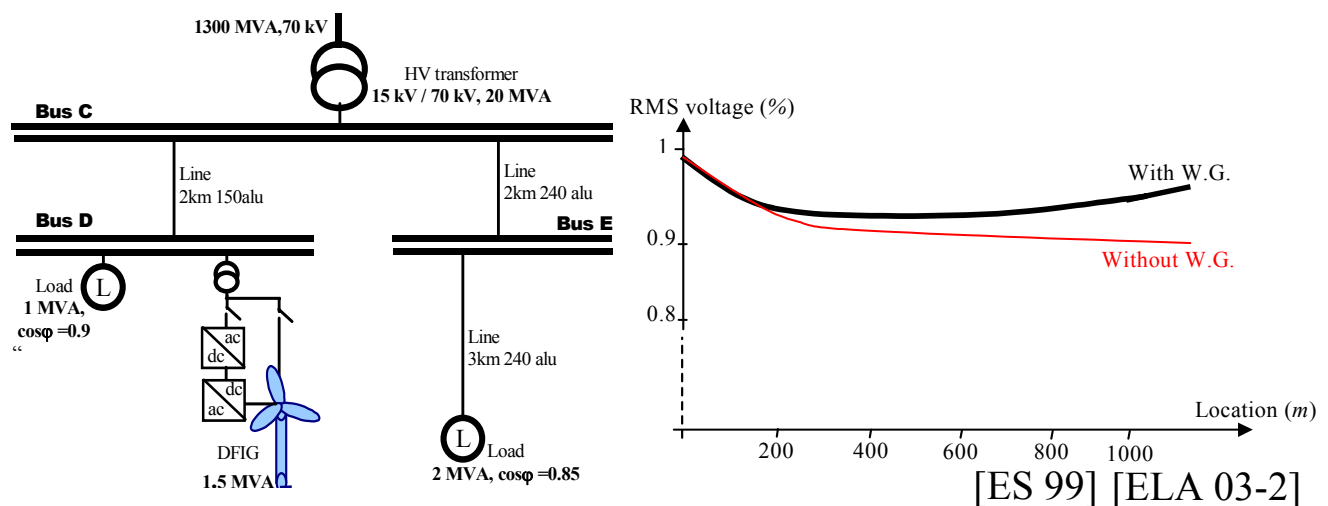
- \_ **Plan de protection**

- Règles de raccordement définies dans des référentiels techniques

15

## Raccordement : Plan de tension

- Augmentation de la valeur efficace de la tension



- Exemple du standard français :

- Variation de la tension : 5 % durant 0.5 s.

- Variation maximale de la puissance : 4 MW/min

16



## Raccordement : Exemple du plan de tension

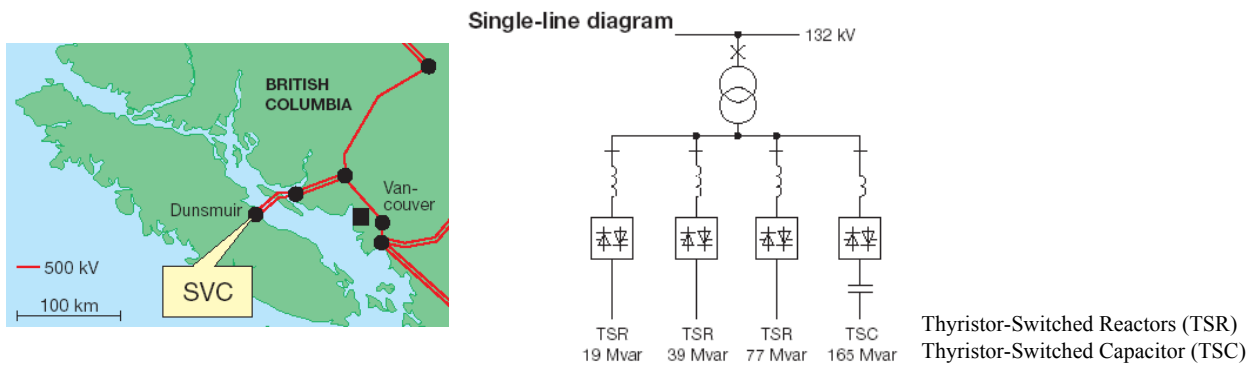
■ Solutions to **correct slow variations** of the rms voltage :

-Direct connexion to a tap transformer, high investment in the architecture

- SVC for dynamic voltage stabilization

Exemple : Dunsmuir (Vancouver island), rating

135 Mvar inductive and 165 Mvar capacitive at 132 kV



■ Le cout de chaque solution doit être étudié

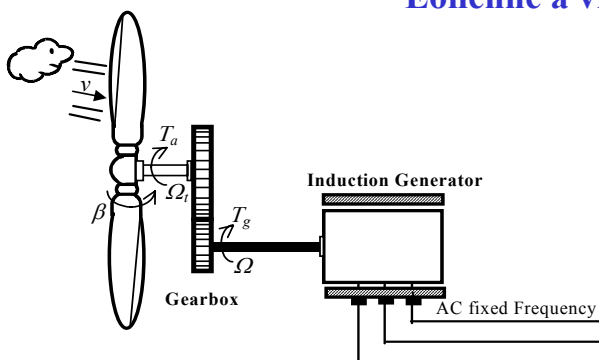
17

## Raccordement : Flicker

■ Variation rapide de la tension

■ Dépend de la technologie de l'éolienne

### Eolienne à vitesse fixe



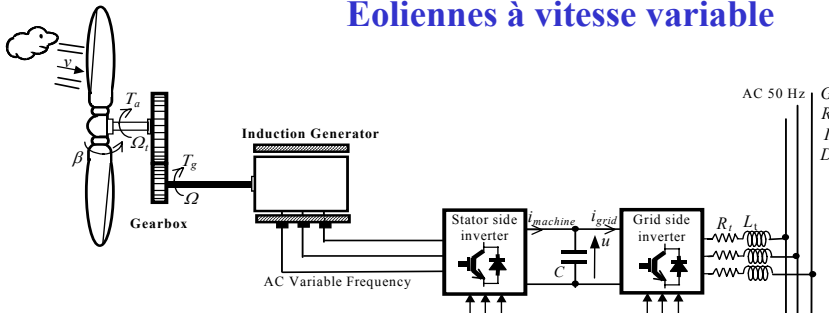
Transfert direct des variations de puissance aérodynamique sur le réseau

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_{\text{electromecanique}} - c_{\text{pertes}}$$

18

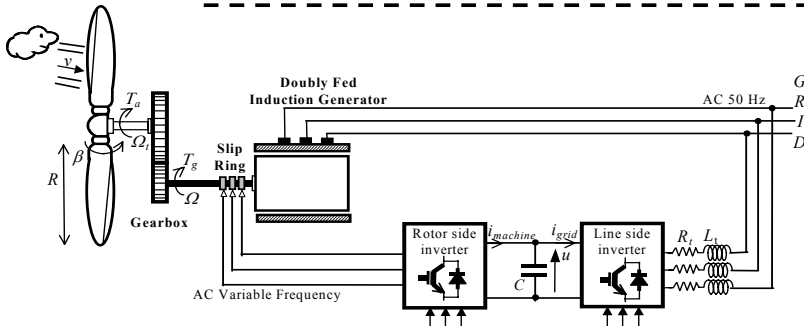
# Raccordement : Exemple du flicker

## Eoliennes à vitesse variable



**Pas de transfert si**

- Variation du bus continu
- contrôle de la puissance moyenne ( $\neq$ MPPT), orientation des pales et contrôle de la machine



**Pas de transfert si**

- Régulation de la tension
- Fonctionnement du convertisseur réseau en D statcom

Le système de contrôle a une grande influence sur les variations rapides de tension!

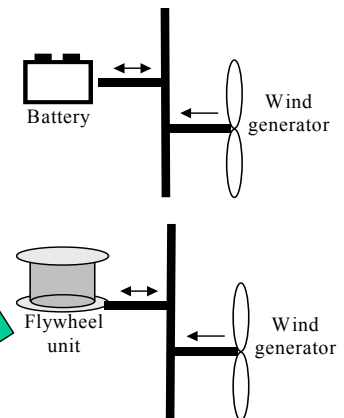
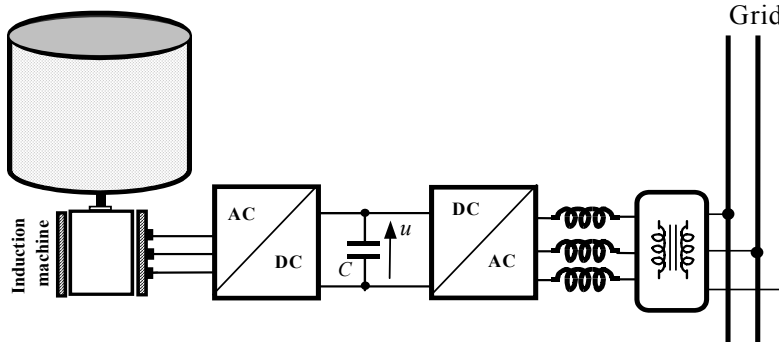


## Raccordement : Flicker

### Solutions

Stockage pour compenser les transitoires de puissance :

- Batteries (vieillessement)
- Volant d'inertie



### Deux avantages :

- Contrôle rapide de la tension
- Régulation de la loi statique : Fréquence/Puissance

## Raccordement : Plan de protection

■ Les réseaux de distribution sont conçus pour un transfert de la puissance électrique du réseau de transport vers les charges

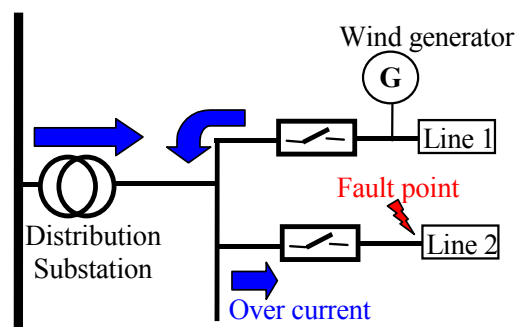
■ **Influence** en terme de qualité de protection et de sécurité

■ Un impact important : Augmentation du courant de court circuit

■ Exemple :

Le courant lors d'un défaut est fourni à la fois par le réseaux de transport et l'éolienne.

Si le courant venant du réseau de transport diminue, la protection ne déclenchera pas et le défaut ne sera pas détecté et persistera car toujours alimenté par l'éolienne !

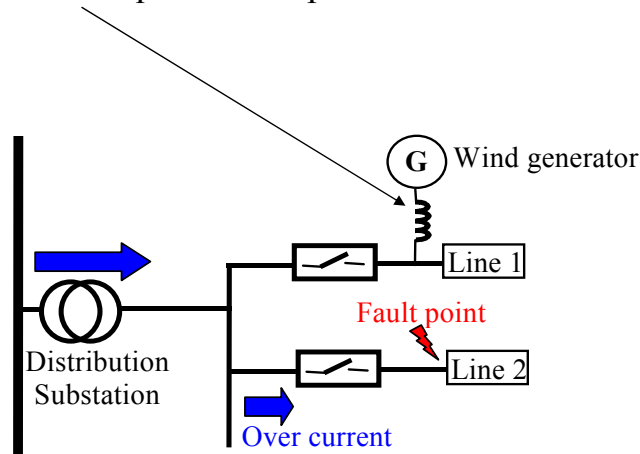


21

## Plan de protection

■ Systemes de protection particuliers: Negative phase relay, Ground over-voltage relay

■ Solutions **externes** : Selfs quiaturent pour réduire le courant de défaut



■ **Remarques**

Avec les éoliennes à vitesse variable et donc des convertisseurs électroniques de puissance, l'impact est réduit car la commande contrôle les courants générés et donc les limitent à leur valeur maximale !

22

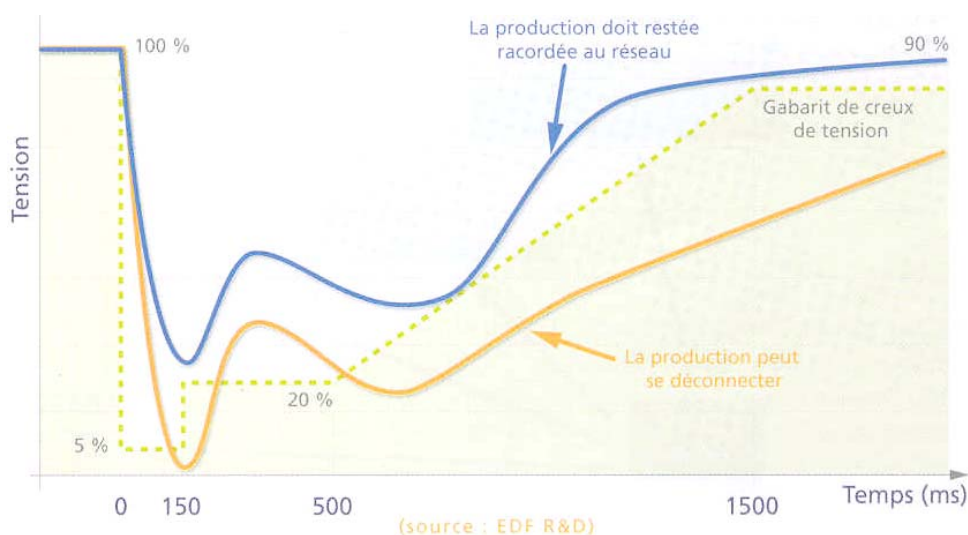
# Fonctionnement du système

- Le taux de pénétration de l'éolien semble limité à 20%  
Générateur passif
  
- Pour faire face à la variabilité, 2 objectifs:
  - \_ Utiliser les éoliennes pour augmenter des possibilités de gestion du réseau électrique
  - \_ Les faire participer aux services système
  
- Techniquement :
  - \_ Le comportement sur défauts
  - \_ Les besoins additionnels en réserve
  - \_ La participation aux services systèmes
    - Réglage de la tension
    - Réglage de la fréquence

23

## Comportement sur défaut de tension

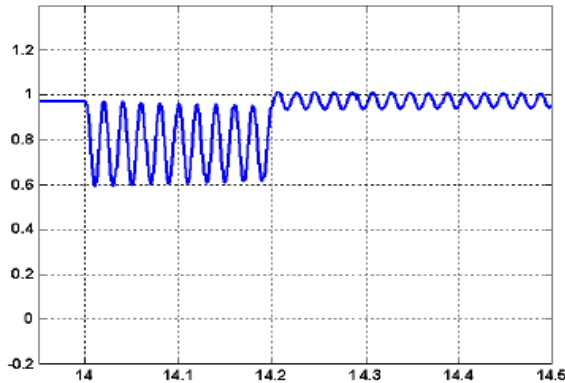
- Si l'éolien représente une petite part de production, pas de problème, les éoliennes peuvent se déconnecter en cas de défauts provenant du réseau (sur la tension)
  
- Ce n'est plus possible en Europe car cela entraînerait une perte instantanée de production supérieure (à l'incident dimensionnant la réserve primaire : 3 000 MW)
  
- Depuis 2000,
  - \_ Tenue aux défauts à travers la mise en place de gabarit de tenue aux creux de tension
  - \_ Définition de plages de fréquences admissibles



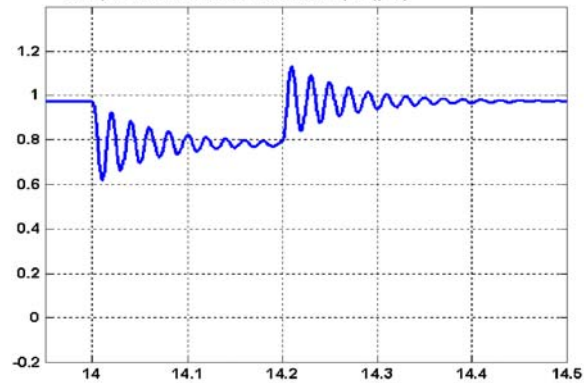
24

# Comportement sur défaut de tension

- Grace à l'électronique de puissance et au contrôle des puissances actives et réactives pendant le défaut, les technologies éoliennes permettent de tenir ces défauts
- Exemple : Amélioration de la stabilité des courants générés par une éolienne à base de MADA par contrôle du flux statorique



(a) Synchronous approach



(b) Asynchronous approach

Timing evolution of the stator flux

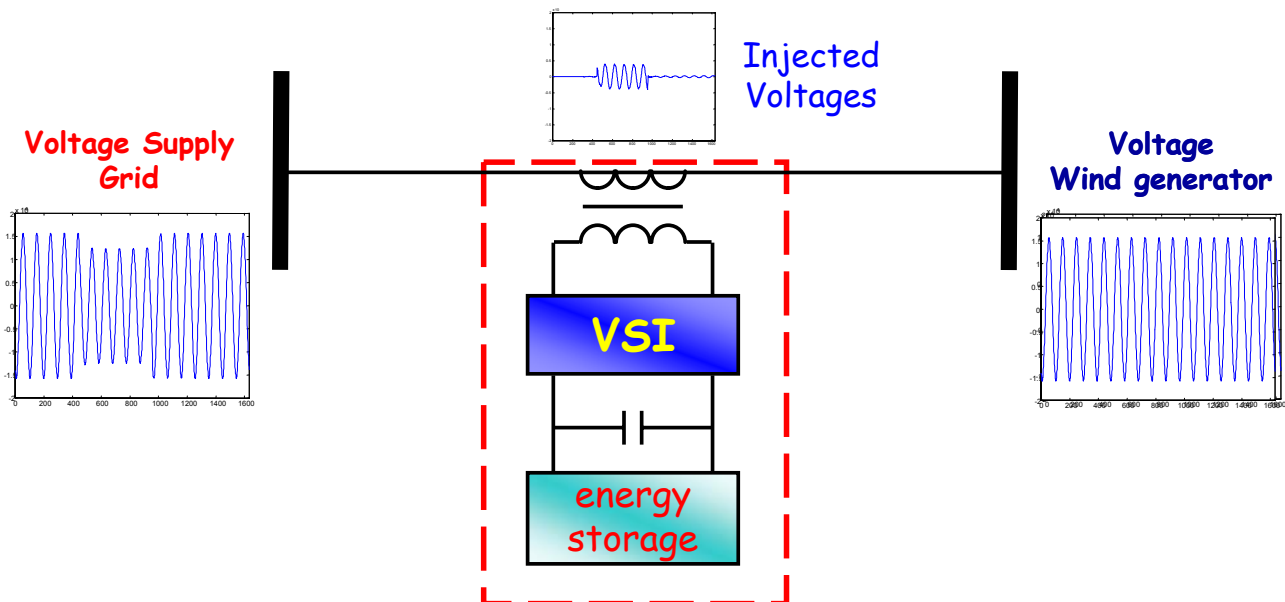
[ELA 05]

25

# Comportement sur défaut de tension

- External solutions

Dynamic Voltage Restorer

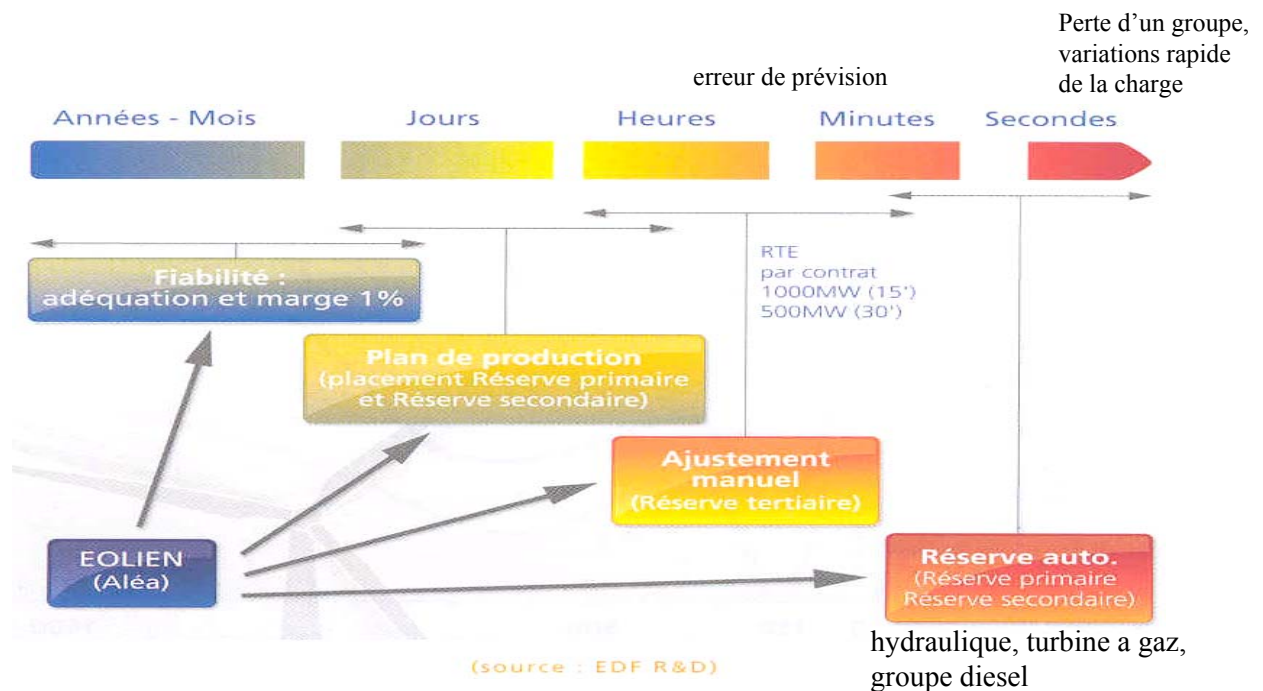


26

[AWA 04]

# Besoin en réserve

- Les réserves en puissance sont constituées pour faire face aux aléas dans le réseau, leur niveau dépend de l'horizon temporel des aléas
- L'aléa de la production éolienne impacte tous les horizons temporels. Le calcul des marges doit prendre en compte la variabilité de l'éolien

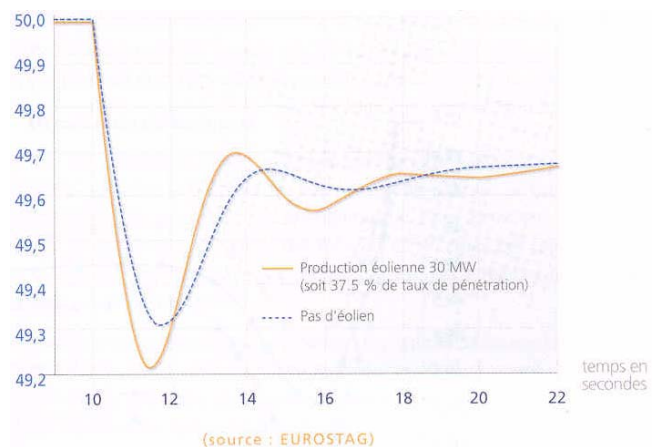
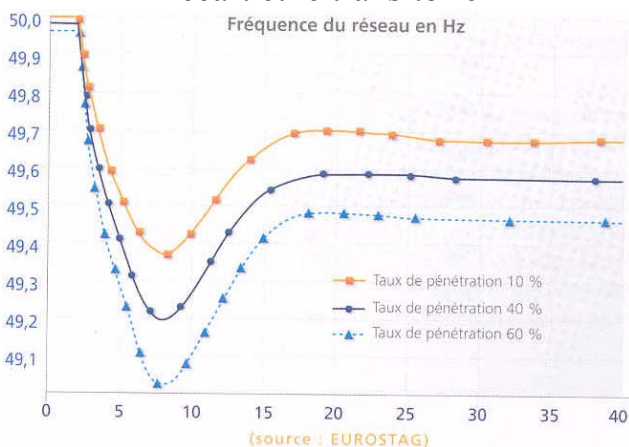


27

# Participation aux services systeme

- Moyens de réglage mis à la disposition du gestionnaire de réseau par les producteurs pour le réglage de la tension et de la fréquence.
- Réglage automatique réalisé par des groupes de production permettant des variations contrôlées très rapides de leur puissance active (réglage de la fréquence) ou réactive (réglage de la tension).
- Le comportement en fréquence

Si on remplace les groupes conventionnels (participant au réglage de la fréquence) par des éoliennes ne participant, alors il y a dégradation sur l'écart et le transitoire





# Participation aux services systeme

## ■ Le réglage de tension

Les normes européennes « grid codes » imposent aux eoliennes de régler la tension ou la puissance réactive échangée.

Exemple : Espagne

+/- 30% de la puissance apparente produite pour les fermes > 30MW  
raccordées au réseau de transport (>220 kV)

29

## Prospectives de recherche et Solutions pour intégrer l'éolien dans le système

Systeme de prévision et de conduite

Nouvelles sources de flexibilité

Nouvelles architectures de réseau dédiées



30

# Solutions pour intégrer l'éolien dans le système

## Systeme de prévision et de conduite

### ■ Prévision de la production éolienne

- Quelques heures, erreur de 3 à 5% de la puissance installée
- J-1, erreur de 5% de la puissance installée
- >4J, erreur > 7,5% de la puissance installée

Intérêt, recalculer les marges de la réserve

### ■ Systèmes de conduite centralisée

- Pour gérer l'impact de l'éolien, il faut le mesurer et le contrôler
- exemple : Espagne, les « Despatcho delagado »
- exemple : Allemagne, petites fermes raccordées en distribution,  
quelques mesures + estimation (ISET)
- exemple : France, IPES (2009-2010),  
système d'observation (mesures+predictions) et de contrôle à la baisse (effacement)

31

# Solutions pour intégrer l'éolien dans le système

## Nouvelles sources de flexibilité

### ■ Couplage avec d'autres moyens de production

rechercher des complémentarités au travers des marchés (économique)

### ■ Stockage

### ■ Modification des éoliennes en générateur actif participant aux services système (statisme de réglage puissance/fréquence et réactif/tension)

32

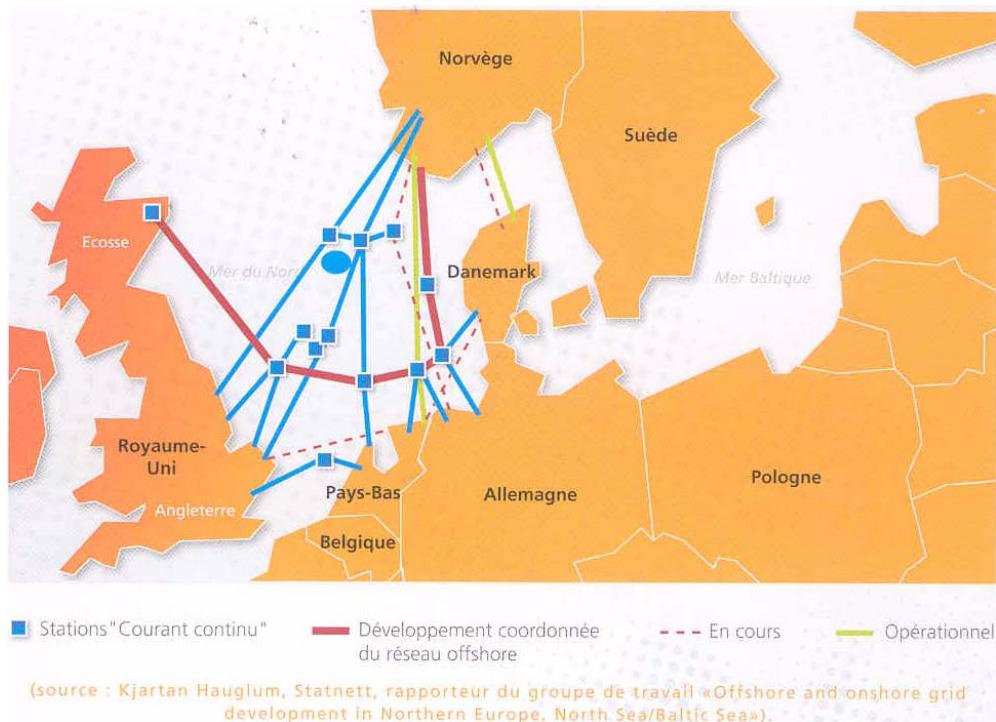
# Solutions pour intégrer l'éolien dans le système

## Nouvelles architectures de réseau

Micro réseau en grappe

Réseau continu urbain (éco quartier)

Réseau continu haute tension offshore



33

*Merci pour votre attention !*



*Site de Sidi Daoud (Tunisie)*