

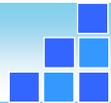
Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire

Soutenance de thèse – Ecole Centrale de Lille – le 20 novembre 2012

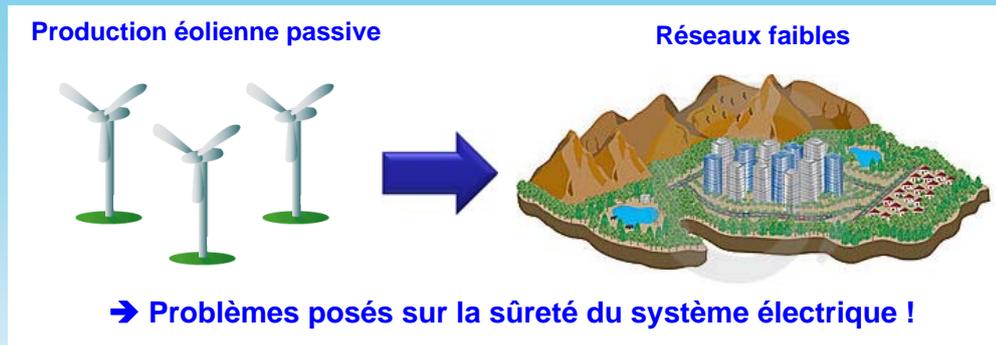
- Doctorant : **Ye WANG**
- Directeurs de thèse : Bruno FRANCOIS (L2EP)
Xavier GUILLAUD (L2EP)
- Partenaires : EDF R&D (Jérôme DUVAL et Herman BAYEM)
ADEME (Stéphane BISCAGLIA)
- Contact : ye.wang@centraliens-lille.org



Avant-propos



❖ Développement de l'éolien



❖ Problème majeur actuel associé à la production éolienne : absence de la participation au réglage de la f/P

- Évolution des réglementations et des référentiels techniques

❖ Exigence de la participation des éoliennes au réglage primaire de fréquence

- Formulée dans certains grid codes (cas irlandais et danois)
- Demandée dans l'appel d'offres de la CRE pour EDF SEI (Systèmes Energétiques Insulaires)

Positionnement et problématiques



❖ De nombreux travaux de recherche existants sur l'implantation du réglage de fréquence sur les éoliennes à vitesse variable

International	L2EP
N. Jenkins et J. Ekanayake (<i>Cardiff University, Angleterre</i>)	A. Davigny
J. Morren et S.W.H. de Haan (<i>DUT, Pays-Bas</i>)	V. Courtecuisse
R.G. de Almeida et J.A. Peças Lopes (<i>INESC, Portugal</i>)	D. Marin
M. O'Malley (<i>UCD, Irlande</i>)	G2ELAB
...	A. Teninge

❖ Problématiques des études dans la littérature

- Concentrées sur la faisabilité technique
 - ➔ performances du service rendu par un moyen de production intermittente ?
- Portées à l'échelle de l'installation d'une production
 - ➔ valeur du réglage de fréquence vue du système électrique ?



- ❖ **Caractérisation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes d'un point de vue du gestionnaire de réseaux**



- ❖ **Cas d'étude de référence : un réseau du type « système insulaire »**

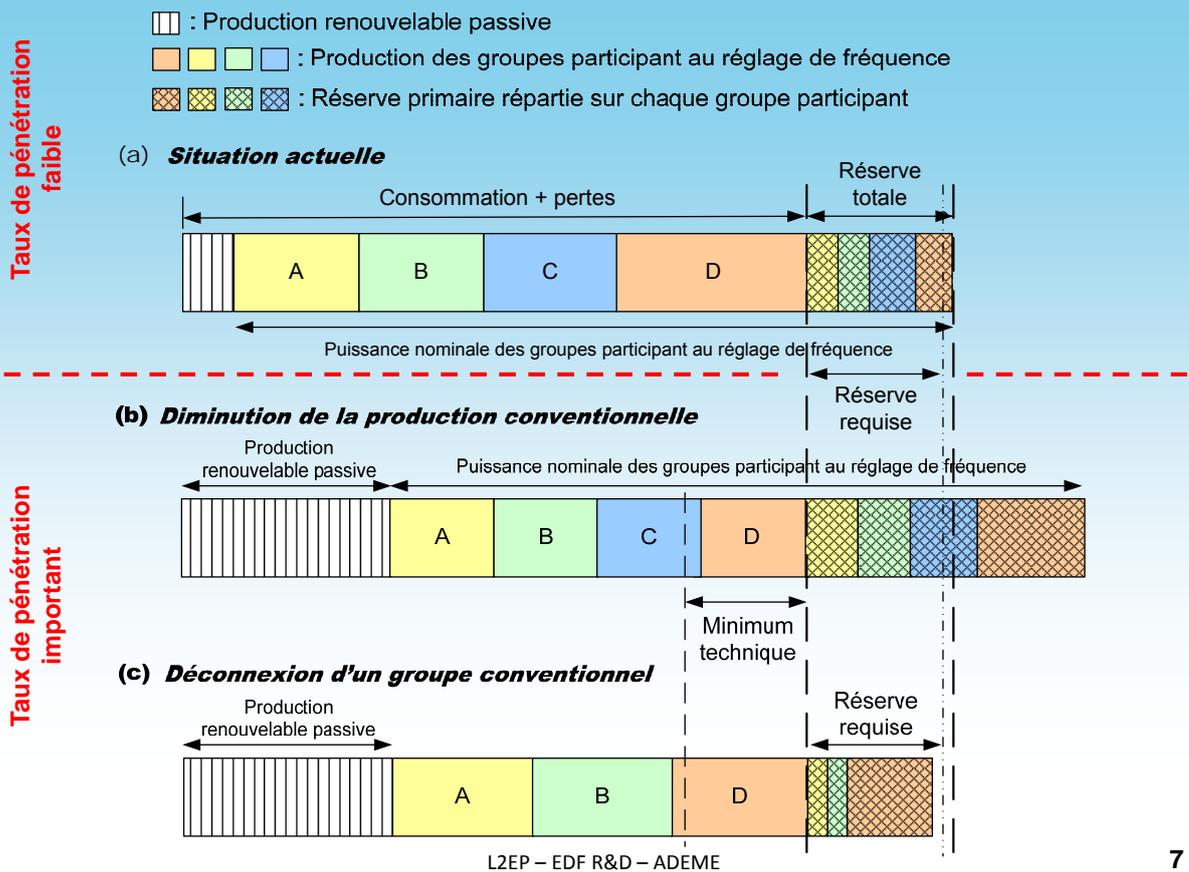
- Taille limitée
→ mise en évidence plus rapide des problématiques
- Hypothèses de développement des filières EnR retenues



1

Impact sur le réglage primaire de fréquence de l'intégration des EnR passives en milieu insulaire

1.1. Impact statique sur le placement de la réserve



7

1.2. Impact dynamique sur l'inertie du système

❖ Intégration des EnR fatales ne contribuant pas à l'inertie

- Eoliennes à vitesse variable : découplage mécanique réseau/turbine du fait du convertisseur
- Panneaux photovoltaïques : pas de masses tournantes
- Eoliennes à vitesse fixe : constante d'inertie faible

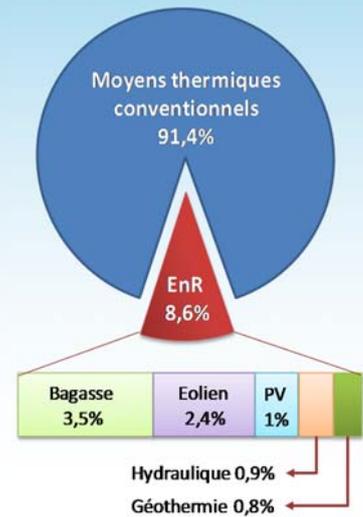
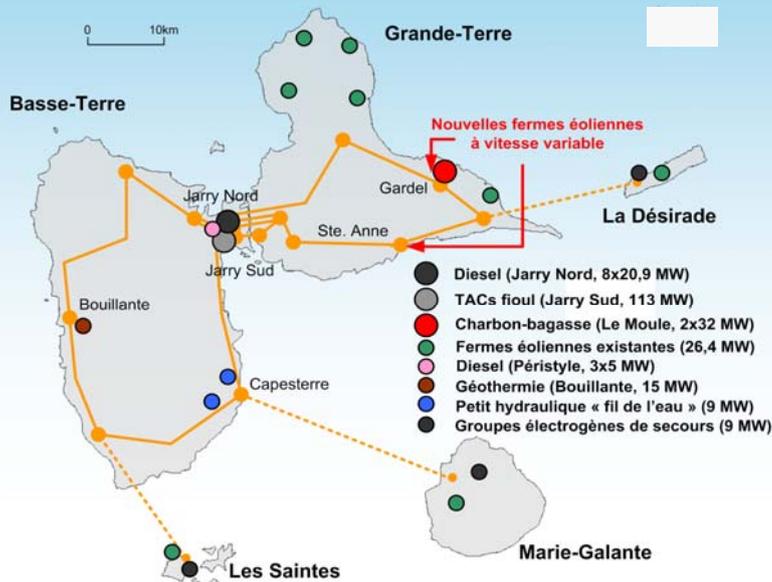
❖ Conséquence sur la dynamique du système

- Remplacement des alternateurs synchrones classiques en cas de fort taux de pénétration
 - ➔ Baisse de l'inertie
- Ecart de fréquence plus marqués en transitoire
 - ➔ Risque plus important de délestage sur les réseaux insulaires

1.3. Présentation de l'étude de cas

❖ Présentation du réseau de Guadeloupe (caractéristiques de 2010)

- Puissance de pointe (≈ 260 MW) et creux de consommation (≈ 140 MW)
- Eoliennes existantes : 27 MW installées / technologie à vitesse fixe
- Introduction de deux nouvelles fermes à vitesse variable
 - ➔ simuler les cas futurs correspondants aux taux de pénétration plus élevés



L2EP – EDF R&D – ADEME

9

1.3. Présentation de l'étude de cas

❖ Description des scénarii simulés

- Scénario de base : mis au point à partir de télémesures (11,7% de taux éolien)
- Incident dimensionnant : perte du plus gros groupe (21,3 MW) sur un creux de consommation (138,4 MW)
- Remplacement des groupes Diesel par les éoliennes futures à fort taux de pénétration

Type de production		Puissance produite	Réserve fournie
Groupes classiques		122,2	32,7
Eoliennes	Existantes	16,2	-
	Futures	0,0	-
Total		138,4	32,7

❖ Hypothèses d'étude pour les simulations dynamiques

- Charges purement impédantes ➔ choix pessimiste
- Vitesse du vent constante ➔ variabilité faible à l'échelle de temps considérée

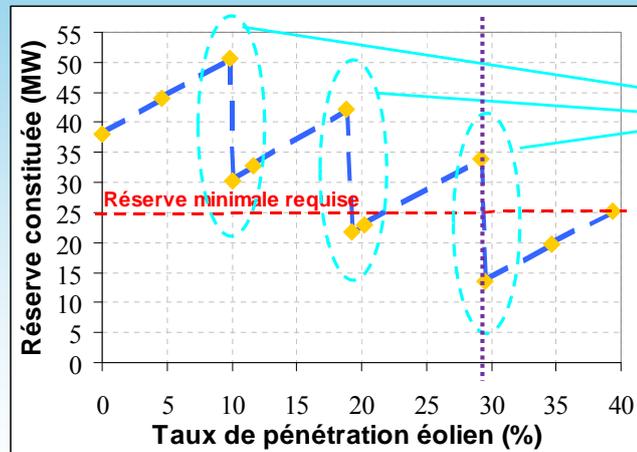
L2EP – EDF R&D – ADEME

10

1.3. Présentation de l'étude de cas

❖ Difficultés pour la constitution de la réserve minimale

- Réserve primaire requise : 25 MW (production + réserve du groupe déclenché)
- Répartition de la réserve sur un nombre limité de groupes participant tout en respectant leur minimum et maximum technique



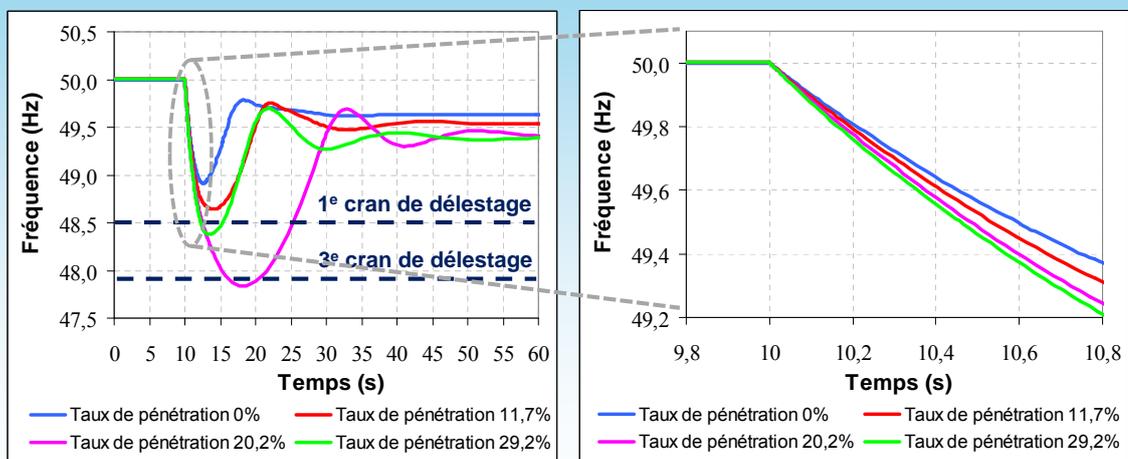
Elimination du programme d'un groupe Diesel

➔ Taux critique statique pour le cas d'application : < 29,2 %
(au delà, contraintes sur placement de la réserve)

1.3. Présentation de l'étude de cas

❖ Contrainte dynamique due à la diminution de l'inertie

- 4 Points de fonctionnement simulés :
 - ➔ Taux de pénétration de 0% (cas de référence)
 - 11,7% (cas actuel)
 - 20,2% (cas où la réserve est minimale)
 - 29,2% (taux critique statique)



- Diminution l'inertie globale avec l'augmentation du taux de pénétration éolien

➔ Taux critique dynamique pour le cas d'application : < 20,2 %
(délestage de la charge)

1.4. Impact de la variabilité éolienne sur le minimum requis de réserve primaire

❖ Dimensionnement de la réserve primaire sur les réseaux insulaires

- Critère déterministe en théorie : respect de la règle « N-1 »

➔ volume nécessaire permettant de couvrir l'aléa 15min dimensionnant

- Cas actuel :

- Aléa 15min dimensionnant = perte du plus gros groupe démarré

$$R_{min} = PCN_{max}$$

R_{min} : minimum requis théorique de réserve primaire

PCN_{max} : puissance continue nette du plus gros groupe

- Avec éolien :

- Aléa éolien « variation sur 15min » plus important que l'aléa de la perte d'un groupe ?

$$R_{min} = MAX(PCN_{max}, VAR_{15min}(EOL))$$

$VAR_{15min}(EOL)$: variabilité 15min maximale de l'éolien

- Cas limite : $VAR_{15min}(EnR) = PCN_{max}$

➔ Il faut caractériser la variabilité éolienne 15min

1.4. Impact de la variabilité éolienne sur le minimum requis de réserve primaire

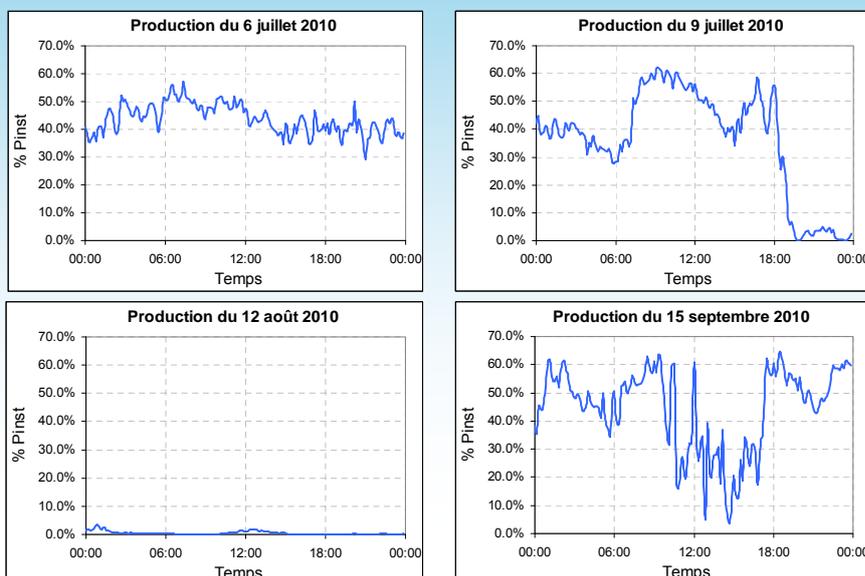
❖ Données disponibles sélectionnées

- Relevé de production éolienne sur le réseau de Guadeloupe au pas 5 minutes (05/07/10 – 05/10/10)

Données limitées

➔ dégager des tendances et définir des méthodologies

❖ Variabilité de la production éolienne globale

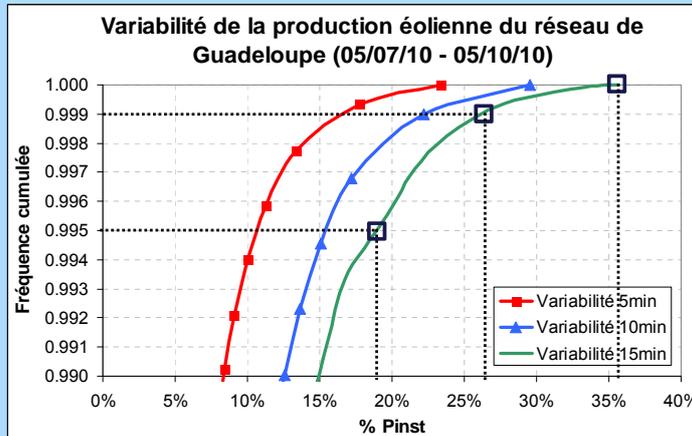


1.4. Impact de la variabilité éolienne sur le minimum requis de réserve primaire



❖ Caractérisation de la variabilité éolienne

- Intervalle de mesure plus long → variation plus importante
- Variation 15min inférieure à 19% (26%) de P_{inst} dans 99,5% (99,9%) des cas
- Variation 15min maximale de 36% de P_{inst}



❖ Résultat :

$$VAR_t(EOL) = k_t \cdot P_{inst}$$

$$\underline{Ex} : k_{15min} = 36\%$$

Occurrence de probabilité	Intervalle de mesure		
	5 min	10 min	15 min
99,9% des cas	< 16%	< 22%	< 26%
100% des cas	23%	30%	36%

1.4. Impact de la variabilité éolienne sur le minimum requis de réserve primaire



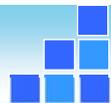
❖ Impact sur la réserve primaire minimale requise

- Puissance éolienne installée critique (P_{inst_c}) : au-delà de laquelle la réserve minimale requise devrait être recalculée
- $P_{inst} = P_{inst_c} \rightarrow PCN_{max} = VAR_{15min}(EOL) = k_{15min} \cdot P_{inst_c}$

$$\Rightarrow P_{inst_c} = \frac{PCN_{max}}{k_{15min}} = 83\text{MW (Guadeloupe)}$$

❖ Limite d'application de la règle « N-1 » : conclusions optimistes

- Variation non négligeable de la production éolienne dans les 15 minutes après l'incident de la perte d'un groupe
- ➔ aléa du type ni « N-1 » ni « N-2 »



2

Performances dynamiques des réglages de fréquence des éoliennes

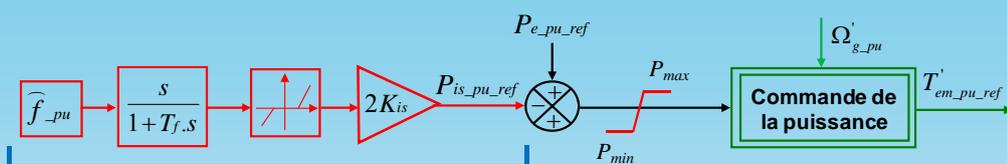
L2EP – EDF R&D – ADEME

17

2.2. Principe de l'inertie synthétique et problématiques



❖ Principe et travaux existants



- Introduction d'une consigne de l'inertie synthétique $P_{is_pu_ref} \propto (df/dt)$
 - Chute de fréquence ($df/dt < 0$)
 - ➔ $P_{is_pu_ref}$ calculé négatif
 - ➔ augmentation du $T'_{em_pu_ref}$
 - ➔ ralentissement de la vitesse éolienne
 - ➔ extraction de l'énergie cinétique
 - Capacité de la fourniture de l'inertie synthétique prouvée
 - ➔ **facteurs impactant la performance ?**
- ➔ pas besoin de dégrader la puissance éolienne**

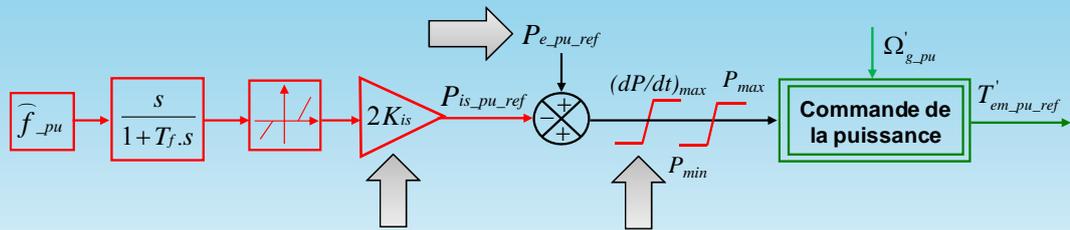
L2EP – EDF R&D – ADEME

18

2.3. Implémentation d'une inertie synthétique

❖ Apports principaux des travaux de la thèse

➤ Caractérisation approfondie de la performance dynamique de l'inerté synthétique



➤ Facteurs clés :

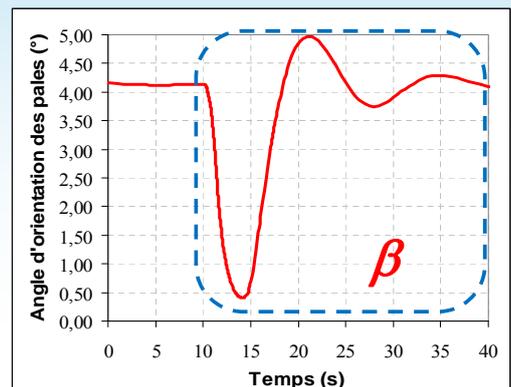
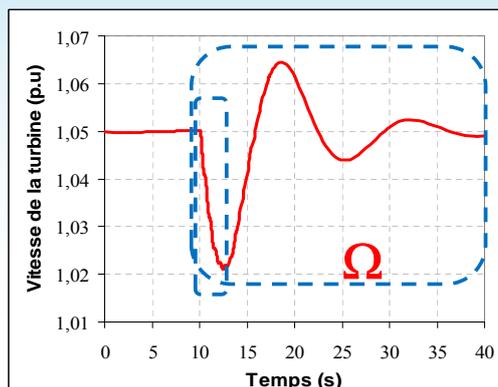
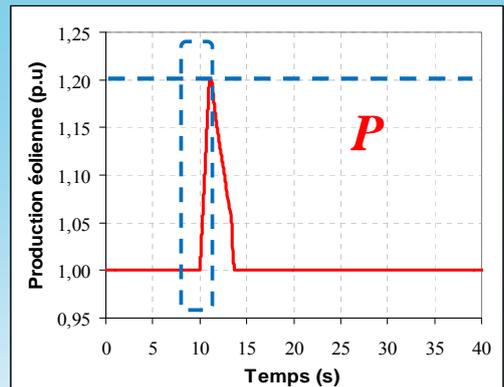
- Point de fonctionnement initial de la turbine éolienne
- Gain du réglage inertiel $K_{is} \neq$ constante d'inertie de l'éolienne
- Limitation de la variation temporelle de la puissance électrique $(dP/dt)_{max}$: $\leq 0,2-0,4$ p.u/s (donnée constructeur)

Précisé dans le mémoire

2.4. Impact du point de fonctionnement initial des éoliennes

❖ Comportement de l'éolienne fonctionnant à pleine charge (P_{nom})

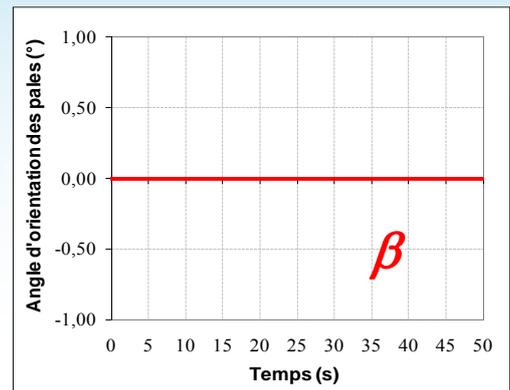
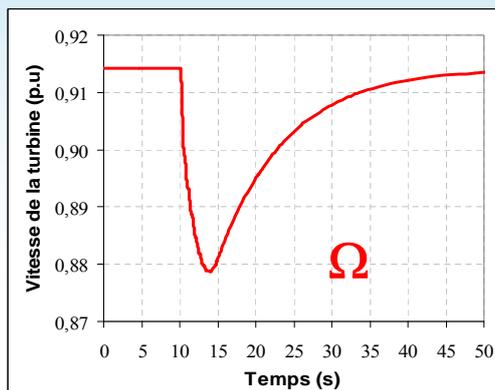
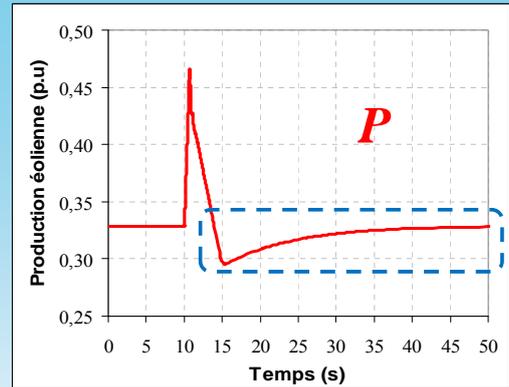
- Pic de puissance envoyé
→ diminution de la vitesse de rotation
- Régulation de la vitesse par action sur l'angle d'orientation des pales (extraction de l'énergie mécanique du vent)
- Puissance maximale envoyée liée au dimensionnement de l'EP



2.4. Impact du point de fonctionnement initial des éoliennes

❖ Comportement de l'éolienne fonctionnant en charge partielle ($< P_{nom}$)

- Angle de calage maintenu nul
- Pic de puissance envoyé
 - ➔ diminution de la vitesse de rotation
 - ➔ restauration de la vitesse optimale à l'aide de la puissance prélevée sur le réseau
- Fonctionnement en dessous de la puissance initiale pendant la période de restauration



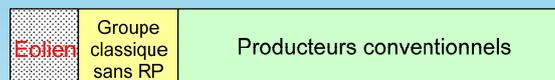
L2EP – EDF R&D – ADEME

21

2.5. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique

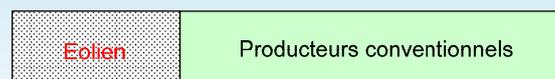
❖ Scénarii de simulation pour les études sur l'inertie synthétique

- Réglage primaire (RP) d'un groupe charbon-bagasse désactivé
 - ➔ comparaison de l'inertie naturelle avec l'inertie émulée



Cas de référence : taux éolien 11,7%

- Remplacement de ce groupe (25 MW) par les éoliennes futures de même puissance



Cas éolien : taux éolien 29,5%

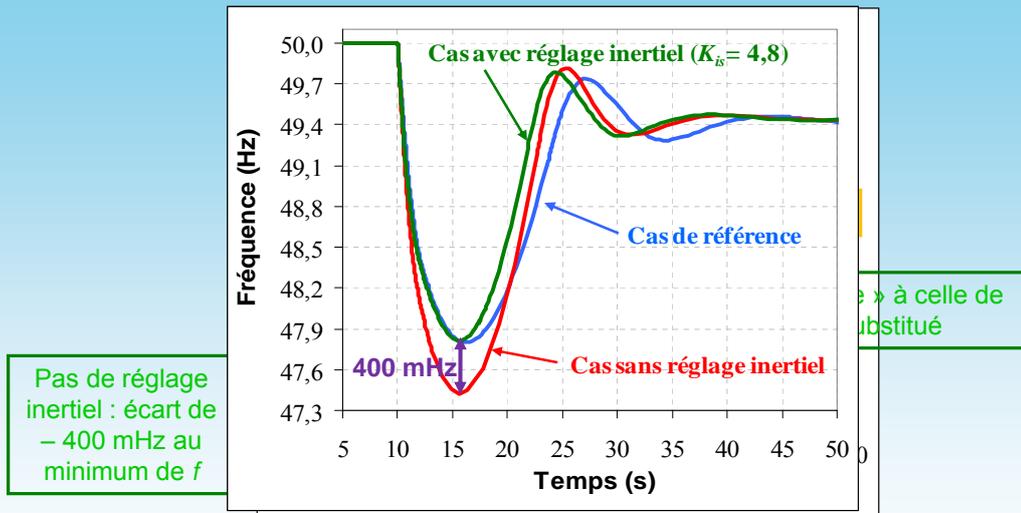
- Comparaison de 3 cas : cas de référence, cas éolien sans et avec l'inertie synthétique

L2EP – EDF R&D – ADEME

22

2.5. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique

❖ Cas où la vitesse du vent est forte (fonctionnement à pleine charge)

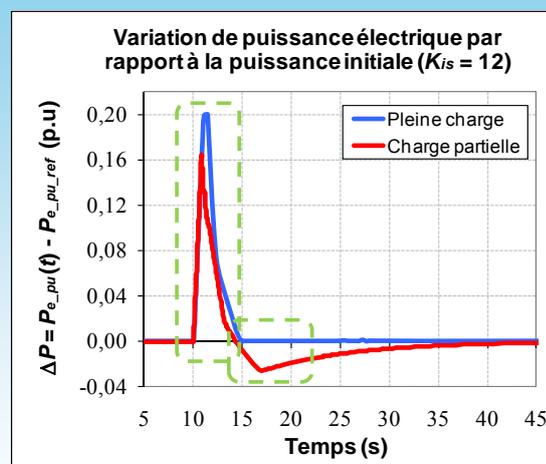


- Augmentation du gain du réglage K_{is}
 - ➔ réduction du creux de fréquence
- Effet de l'augmentation du gain moins évident avec des valeurs importantes de K_{is}
 - ➔ saturation de la P_{max} atteinte

2.5. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique

❖ Cas où la vitesse du vent est faible (fonctionnement en charge partielle)

- Même puissance éolienne produite mais avec un point de fonctionnement initial de 0,33 p.u
 - ➔ 3 fois plus de turbines raccordées

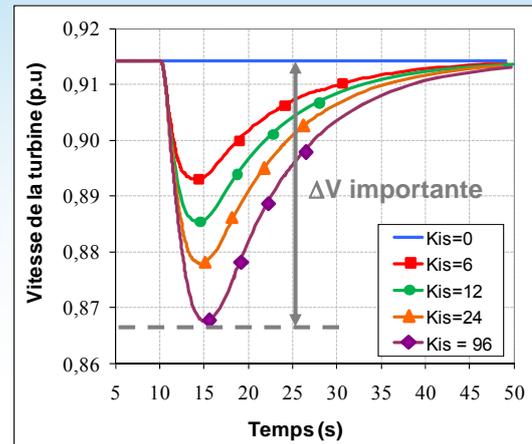
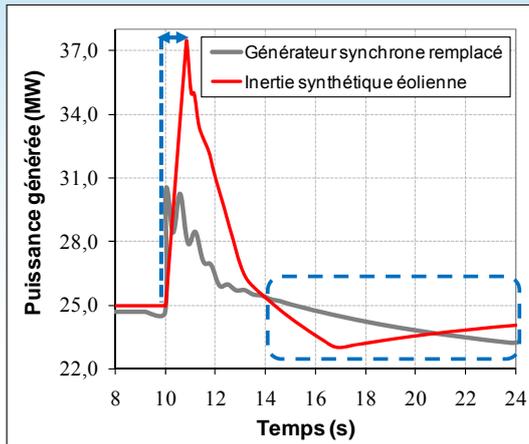


- Inertie synthétique d'une éolienne unitaire moins performante en charge partielle
 - ❑ Extraction de la puissance supplémentaire du vent à pleine charge
 - ➔ plus de puissance injectée avec le même gain
 - ❑ Période de restauration du point optimal en charge partielle

2.5. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique

❖ Cas où la vitesse du vent est faible (fonctionnement en charge partielle)

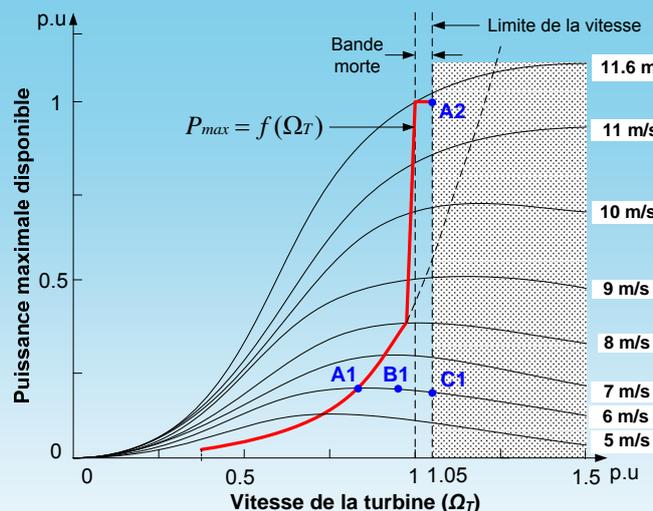
- Réaction instantanée de l'inertie naturelle
 - ➔ inertie synthétique retardée et limitée par $(dP/dt)_{max}$
- Période de la restauration du point optimal différente
- Potentiel important de fourniture de l'inertie synthétique
 - ➔ vitesse au-dessus de la limite (0,7-0,8 p.u) même avec des gains très grands
 - ➔ libération de plus d'énergie cinétique par rapport à une machine synchrone classique pour une H donnée



2.6. Principe du réglage primaire et implantation

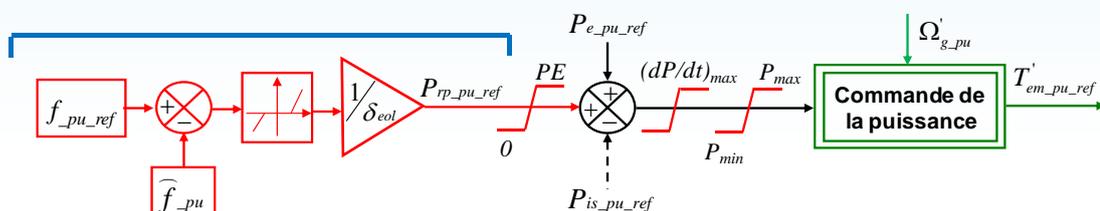
❖ Constitution de la réserve

- Fonctionnement à pleine charge (point A2) : effacement de la production éolienne par augmentation de l'angle d'orientation des pales
- Fonctionnement en charge partielle (point A1) : réserve constituée par augmentation de la vitesse mécanique et de l'angle de calage (A1 → B1 → C1)



❖ Implantation du réglage primaire

- Libération de la réserve selon un statisme comme les groupes conventionnels



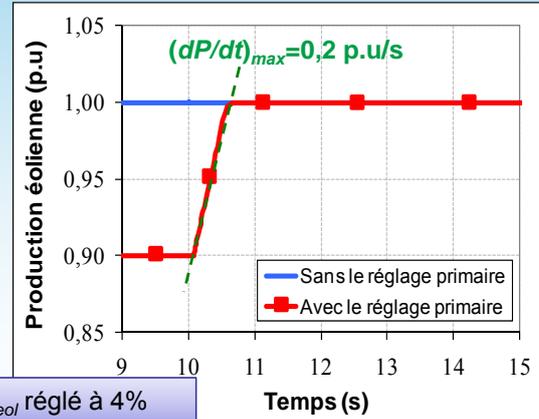
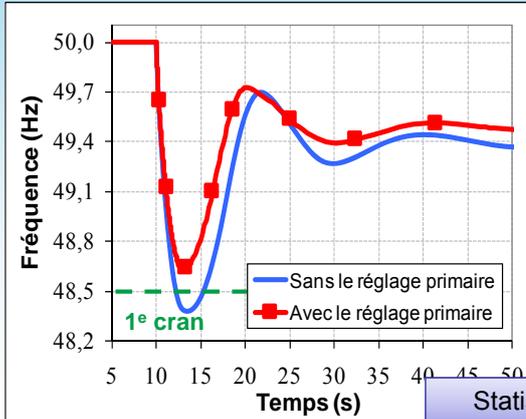
2.7. Analyse de la contribution dans un système électrique

❖ Application au réseau de Guadeloupe

- Délestages constatés aux cas de 20,2% et 29,2% de taux de pénétration sans la participation des éoliennes
- Placement de réserve sur les éoliennes à vitesse variable

Exemple illustratif : taux de 29,2%

	Sans le réglage primaire éolien	Avec le réglage primaire éolien
Réserve sur les groupes Diesel	25,2 MW	22,7 MW
Réserve sur les éoliennes	0 MW	2,5 MW

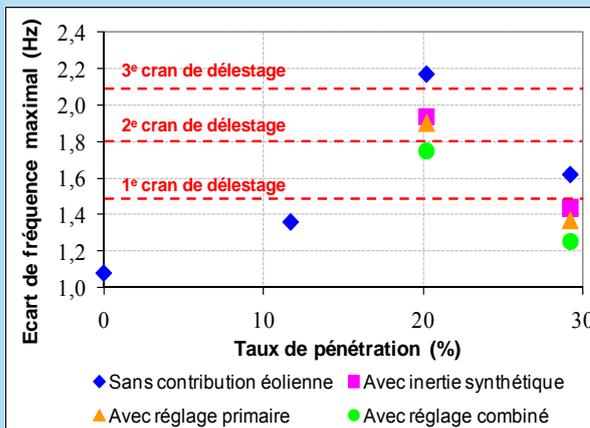


- Un cran de délestage évité avec la participation des éoliennes
 - ➔ dynamique très rapide de la libération de réserve (la totalité sous 1s)

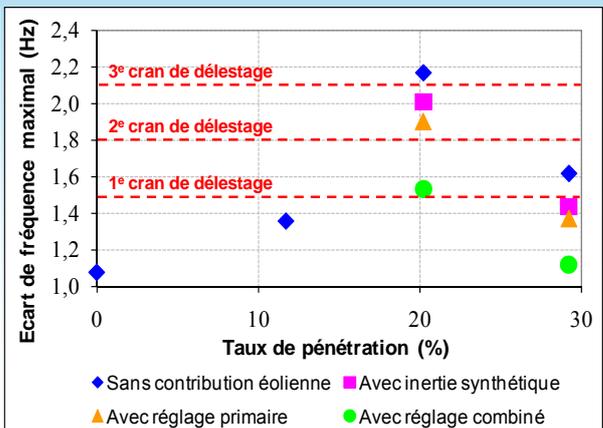
2.7. Analyse de la contribution dans un système électrique

❖ Bilan des contributions et potentiel du réglage combiné

- Paramètres des réglages
 - ➔ $K_{is}=12$ m/s et $(dP/dt)_{max}=0,2$ p.u/s pour l'inertie synthétique et $\delta_{eol}=4\%$ pour le réglage primaire
- Amélioration du comportement en fréquence avec le réglage combiné
- Contribution plus marquée du réglage combiné en charge partielle

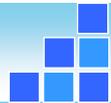


Fonctionnement à pleine charge



Fonctionnement en charge partielle

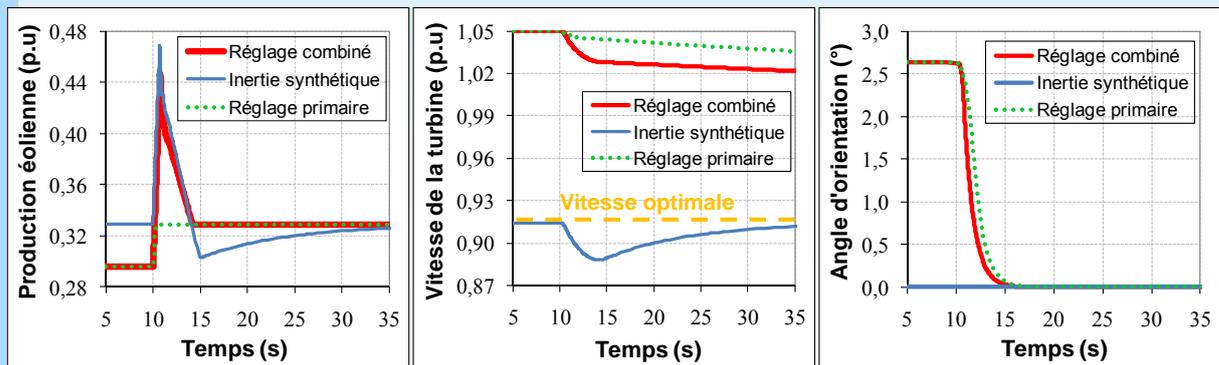
2.7. Analyse de la contribution dans un système électrique



❖ Comportement dynamique de l'éolienne fonctionnant en charge partielle et fournissant le réglage combiné

- Réglage primaire activé
 - ➔ augmentation de la vitesse initiale (une part de réserve stockée sous forme d'énergie cinétique)
- Si f diminue
 - ➔ diminution de la vitesse de la turbine (inertie synthétique)
 - ➔ point de fonctionnement plus proche au point optimal
 - ➔ pas de réduction de la puissance éolienne après contribution inertielle
 - ➔ meilleur comportement

Exemple illustratif : cas de 29,2%



L2EP – EDF R&D – ADEME

29

Impact EnR – Performances dynamiques – Analyses statistiques – Conclusions



3

Impact de l'intermittence sur le potentiel du réglage primaire des éoliennes

L2EP – EDF R&D – ADEME

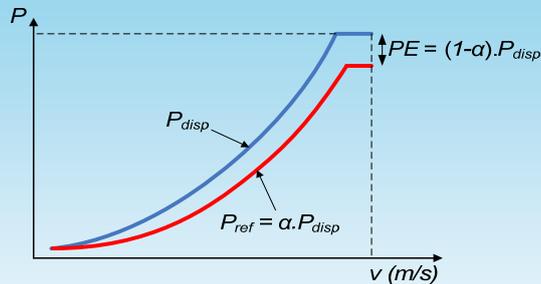
30

3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée

❖ Définition des stratégies de placement

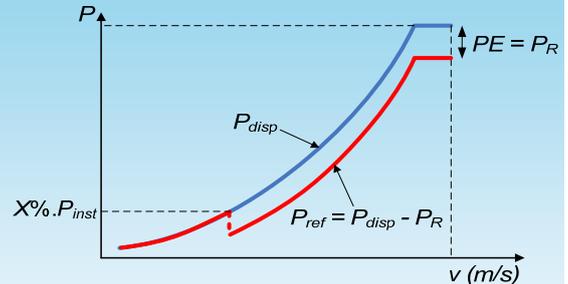
➤ Stratégie proportionnelle :

Affectation d'une proportion $(1-\alpha)$ du productible de la ferme éolienne à la puissance de réserve



➤ Stratégie « bande constante » :

Affectation d'un volume constant de réserve en MW (P_R) à partir d'une certaine puissance ($X\% \cdot P_{inst}$)



➔ Puissance effacée (PE) différente selon la stratégie

	Stratégie proportionnelle	Stratégie « bande constante »
Avantages	✓ Facilité d'implémentation	✓ Bonne maîtrise du volume de puissance effacée
Inconvénient	× Volume de réserve instantanée variable sur un pas de placement	× Discontinuité de la production dans le temps

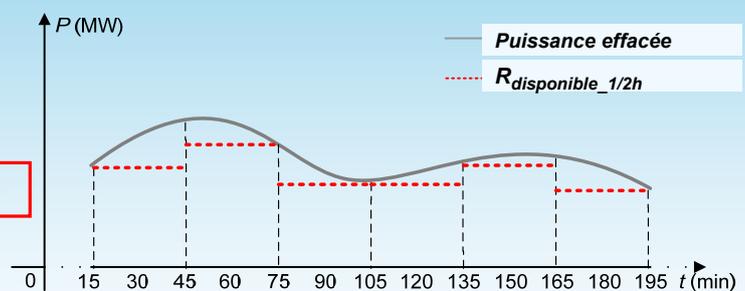
3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée

❖ Mesure de la réserve instantanée disponible pour le gestionnaire

- Règle actuelle du placement de la réserve
 - ➔ délai de préavis (J-1) et pas de placement (1/2h)
- Prise en compte du critère du temps de maintien de 15min de la réserve
 - ➔ obligation de retenir la valeur minimale de la puissance effacée (PE) sur un pas de placement

➔ Réserve instantanée disponible sur un pas de dispatching (τ) :

$$R_{disponible_\tau} = \text{MIN} (PE[T_0, T_0 + \tau])$$

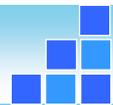


❖ Pour le producteur éolien

- Productible effacé \geq réserve instantanée disponible
 - ➔ MWh effacés « inutiles » ($MWh_{eff, inutile}$)
- Définition d'un indicateur d'efficacité
 - ➔ mesurer la qualité du placement

$$\eta = \left(1 - \frac{MWh_{eff, inutile}}{MWh_{eff, total}} \right) \times 100\%$$

3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée

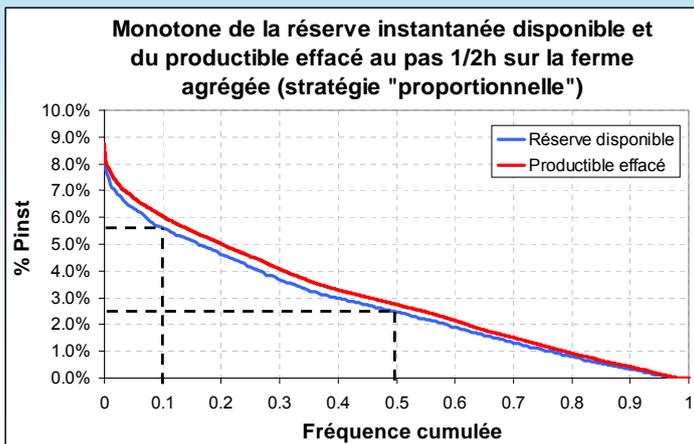


❖ Application aux fermes éoliennes sur le réseau de Guadeloupe

- Données disponibles : relevés de production au pas 15min (01/01/11 – 31/03/11) de 3 fermes éoliennes
- « Ferme agrégée » : l'ensemble de 3 fermes

❖ Application de la stratégie « proportionnelle »

- Effacement de **10% du productible** et placement de la réserve **au pas 1/2h**



	Stratégie "proportionnelle"	
Fréquence cumulée	50%	10%
$R_{disponible_1/2h}$ (% P_{inst})	> 2,5%	> 5,5%
100 MW d'éolien installé	> 2,5 MW	> 5,5 MW

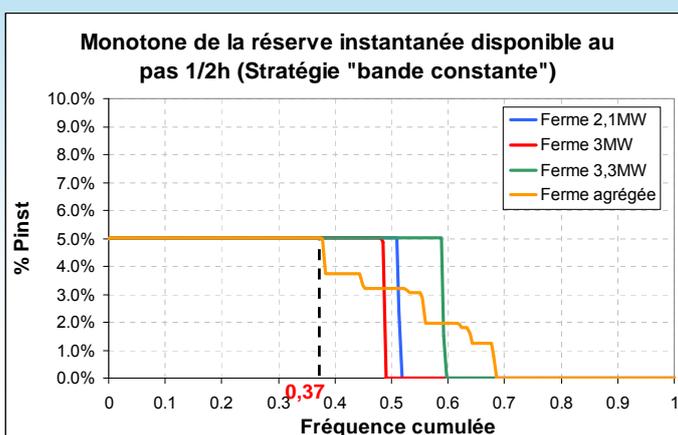
Potentiel de réserve instantanée intéressant !

3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée



❖ Application de la stratégie « bande constante »

- Prélèvement d'un **volume constant égal à 5% de P_{inst}** quand la production est supérieure ou égale à 0,2 p.u.
 - ➔ production effacée sur la ferme agrégée : 542 MWh (« proportionnelle ») v.s. 539 MWh (« bande constante »)
- Réserve constituée au périmètre de 3 fermes agrégées :
 - ➔ nombre discret d'états de réserve ($R_{disponible_1/2h} = 0.05P_{inst}$ ou 0 sur chaque ferme)

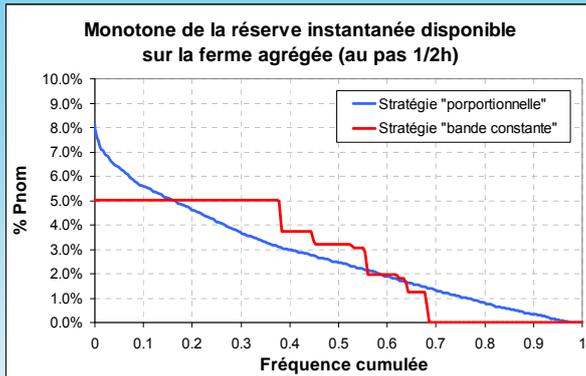


	Stratégie "bande constante"	
Fréquence cumulée	50%	37%
$R_{disponible_1/2h}$ (% P_{inst})	> 3,0%	5,0%
100 MW installé	> 3 MW	5 MW

Potentiel de réserve instantanée intéressant !

3.2. Potentiel de placement en permanence

❖ Les éoliennes à vitesse variable participent en permanence à la réserve



➤ Définition de la réserve moyenne $R_{moyenne}$

$$R_{moyenne} = \frac{\sum R_{disponible_t} \times \tau}{Durée\ totale}$$

τ : pas de placement

$R_{disponible_t}$: réserve disponible sur le pas

Durée totale : 3 mois

	Production effacée	Réserve moyenne	Efficacité
Stratégie "proportionnelle"	542 MWh	2,7% .P _{inst}	91%
Stratégie "bande constante"	539 MWh	2,7% .P _{inst}	91%

- Efficacité quasi identique à l'échelle de quelques fermes
- **Utilité de la participation éolienne à faible production ?**

3.2. Potentiel de placement au delà du taux critique

❖ Les éoliennes participent uniquement lorsque le taux de pénétration critique est dépassé

❖ Méthodologie pour identifier les intervalles de temps

- $C(t)$: consommation + pertes
- τ_c : taux éolien instantané critique
- Règle de sécurité

Si $P_{eolien}(t) > C(t) \cdot \tau_c$, alors la participation à la réserve est obligatoire !

- $P_{eolien}(t) = PF(t) \cdot [P_{inst_vf} + P_{inst_vv}] > C(t) \cdot \tau_c$

$PF(t)$: Point de fonctionnement du parc éolien

P_{inst_vf} : puissance installée des éoliennes à vitesse fixe

P_{inst_vv} : puissance installée des éoliennes à vitesse variable

- Définition du Point de Fonctionnement critique du parc global $PF_c(t)$:

$$PF(t) > \frac{C(t) \cdot \tau_c}{P_{inst_vf} + P_{inst_vv}} \times 100\% = PF_c(t)$$

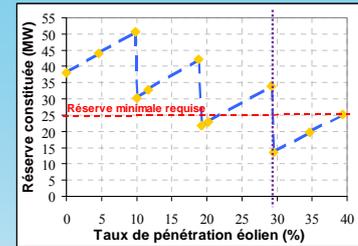
Obligation de participation à la réserve pendant la période où le point de fonctionnement du parc dépasse PF_c

- Hypothèse simplificatrice : PF_c d'une seule ferme égale à PF_c du parc global

3.2. Comparaison des stratégies de placement

❖ Application numérique pour le réseau de Guadeloupe

- Etude du cas extrême pour la sécurité
 - ➔ $C(t)$ fixé à 140 MW (conso. minimale)
- $\tau_c=29\%$ (précédemment identifié) et $P_{inst_vt}=27$ MW
- Avec 50MW d'éoliennes à vitesse variable : $PF_c=52,7\%$
Avec 70MW d'éoliennes à vitesse variable : $PF_c=41,8\%$



❖ Comparaison des deux stratégies en terme de volume de réserve

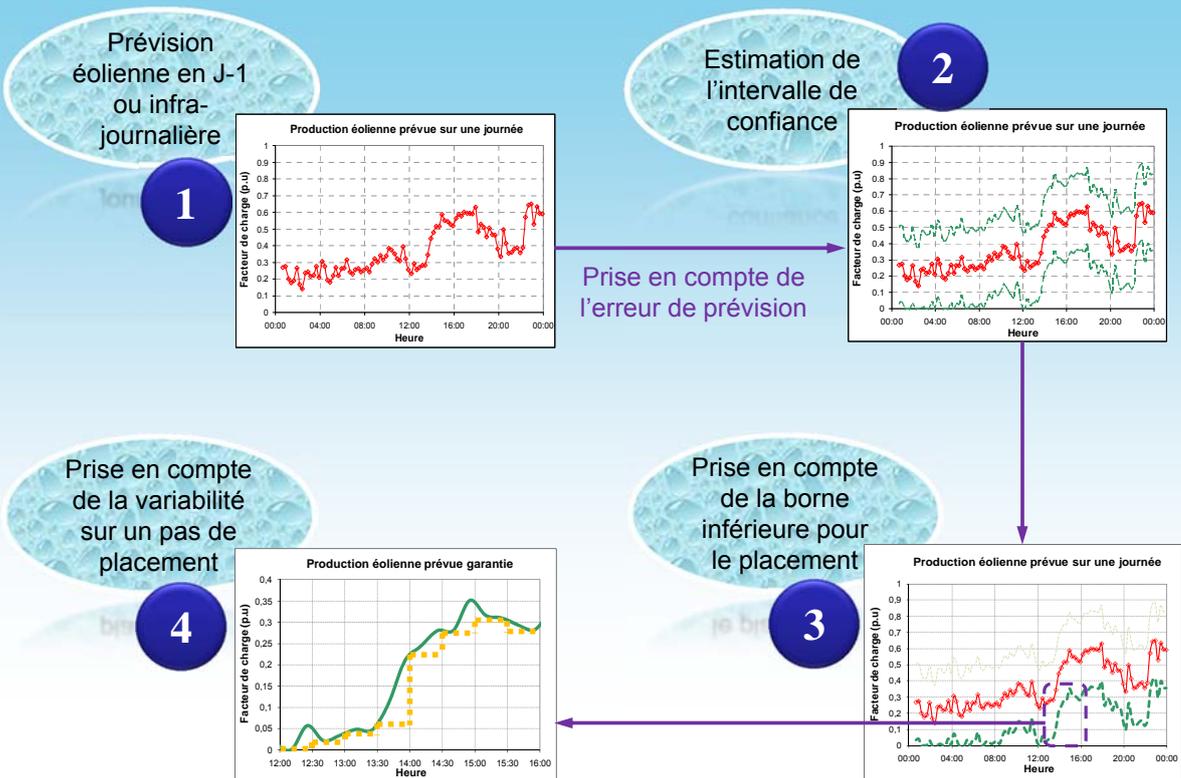
	Stratégie du placement	Production effacée	Volume de réserve moyenne	Efficacité
50MW d'éoliennes à vitesse variable	Proportionnelle	225 MWh	0,9%. P_{inst}	74,5%
	Bande constante	221 MWh	0,9%. P_{inst}	75,1%
70MW d'éoliennes à vitesse variable	Proportionnelle	318 MWh	1,4%. P_{inst}	80,6%
	Bande constante	315 MWh	1,4%. P_{inst}	81,3%

**Efficacité identique
(en temps réel)
des deux stratégies,
peu importe la période du
placement de la réserve**

- Etudes basées sur deux cas particuliers et des hypothèses simplificatrices
 - ➔ dégager uniquement les tendances !

3.3. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve

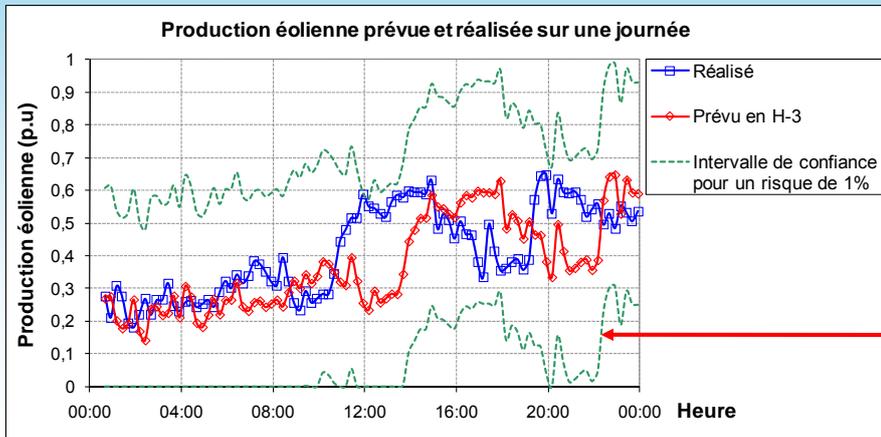
❖ Méthodologie retenue pour le placement de la réserve



3.3. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve

❖ Prise en compte d'une prévision infrajournalière

- Manque de donnée de la courbe de prévision J-1
 - ➔ étude de l'allocation de la réserve en H-3 et H-1
- Application de la méthode de prévision par persistance en caractérisant la variabilité éolienne 3h ou 1h
 - ➔ écart type de l'erreur de prévision très important



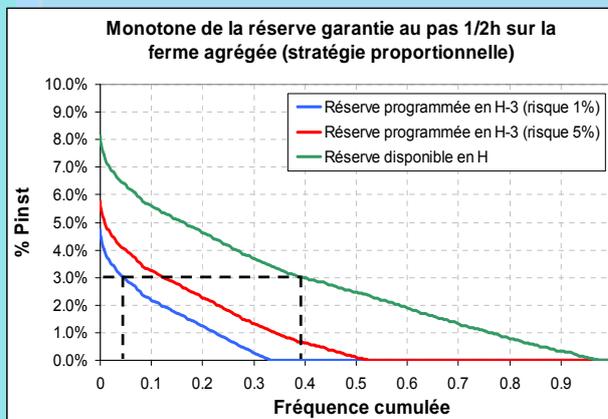
Considération de la production correspondante à la borne inférieure comme « prévision éolienne garantie »

- Largeur de l'intervalle de confiance dépendante du critère de fiabilité retenu
- Intervalle de confiance à 1% permettant de couvrir 99% de l'aléa de prévision H-3

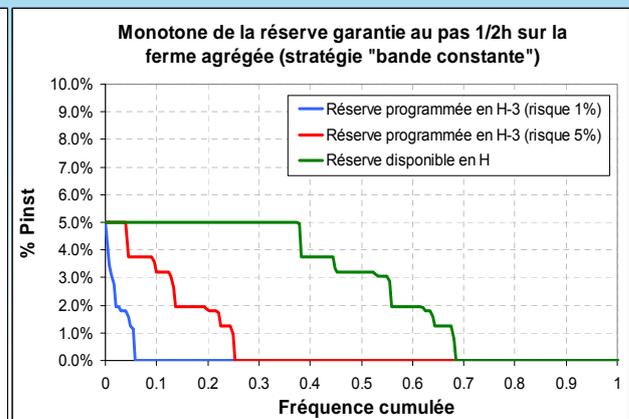
3.3. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve

❖ Résultats et discussions

- Écart significatif du volume de réserve entre le prévu et le disponible
- Très peu de réserve garantie avant le temps réel H avec la stratégie « bande constante » :
 - ➔ nécessité de faire une prévision de production pour chaque ferme
 - ➔ erreurs plus grandes

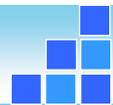


	Réserve en H-3 (risque 1%)	Réserve en H-3 (risque 5%)	Réserve en H
$R_{moyenne} (\% P_{inst})$	0,5%	1%	2,7%



	Réserve en H-3 (risque 1%)	Réserve en H-3 (risque 5%)	Réserve en H
$R_{moyenne} (\% P_{inst})$	0,1%	0,7%	2,7%

3.3. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve



❖ Résultats et discussions

- Impact de la variabilité moins important que les erreurs de prévision sur la programmation de la réserve éolienne
- Bonne prédiction de la production nécessaire pour la mise en œuvre du réglage primaire des éoliennes

	Réserve en H-3 (risque 1%)	Réserve en H-3 (risque 5%)	Réserve en H-1 (risque 1%)	Réserve en H-1 (risque 5%)	Réserve en H
$R_{moyenne} (\%P_{inst})$ (stratégie proportionnelle)	0,5%	1,0%	1,0%	1,5%	2,7%
$R_{moyenne} (\%P_{inst})$ (stratégie "bande constante")	0,1%	0,7%	0,4%	1,1%	2,7%

Résultats obtenus basés sur une prévision par la méthode par persistance → meilleure prévision envisageable en pratique !

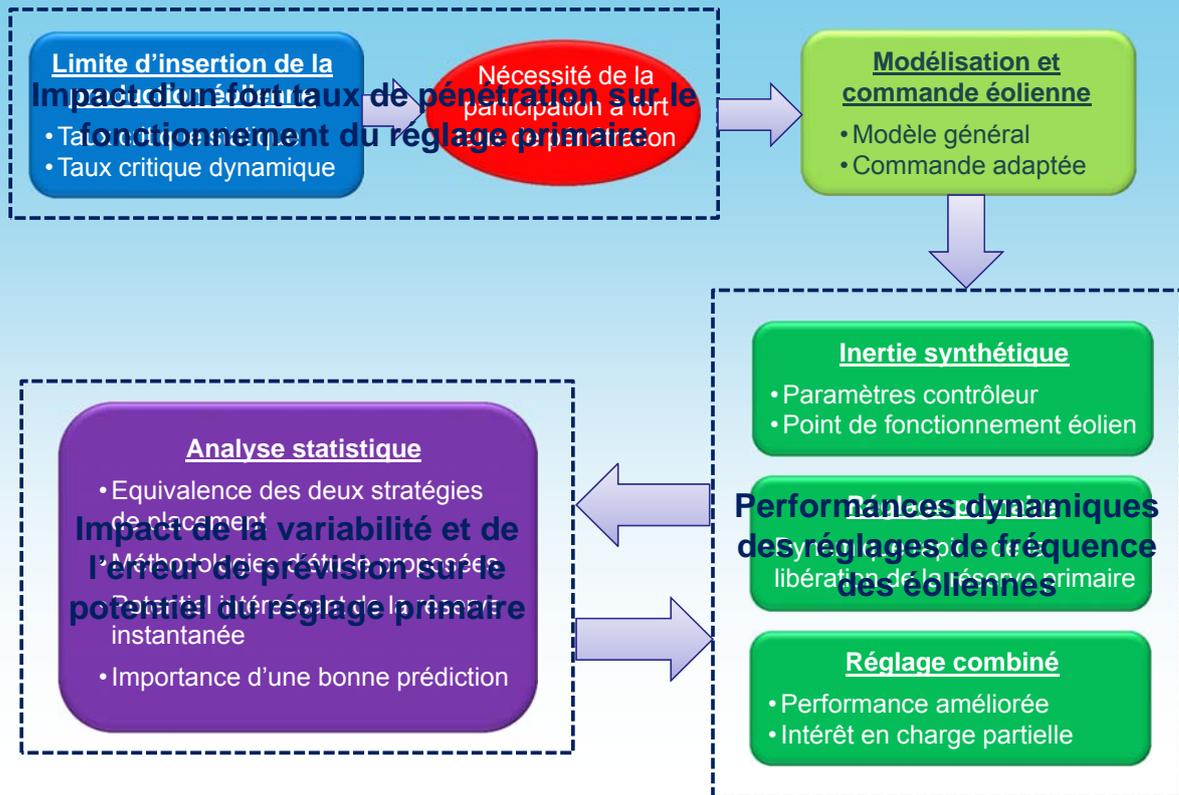


4

Conclusions & perspectives



4.1. Conclusion générale



4.2. Quelques perspectives de poursuite

- ❖ **Expérimentation sur la plateforme « Energies Réparties » du L2EP**
 - Mise en œuvre expérimentale des réglages de fréquence des éoliennes sur un simulateur temps réel
 - ➔ extension de la validité des résultats
 - Travail en cours en s'appuyant sur le travail d'un post-doc
- ❖ **Analyses statistiques approfondies**
 - Application des méthodologies proposées sur des données plus larges et plus précises
 - Affinage des études (répartition de la réserve au niveau des turbines, agrégation de l'inertie synthétique, etc.)
- ❖ **Couplage éolien / stockage**
 - Perfectionnement du placement par réduction de l'erreur de prévision
 - Possibilité de multiservices (fourniture de réserve, lissage de production, etc.)



Merci de votre attention !



Ye WANG

L2EP – EDF R&D – ADEME

45