

Soirée des doctorants n°3 **Le 29 Janvier 2013**

Modélisation du vieillissement thermique et mécanique des protections externes en EPDM des jonctions rétractables à froid pour liaisons HTA souterraines

Evaluation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes à l'échelle du système électrique : application à un cas insulaire

En ce début d'année, le bureau du chapitre français de l'IEEE PES est heureux de vous proposer une soirée des doctorants qui a pour vocation de permettre à de jeunes chercheurs talentueux de venir présenter leurs travaux. Pour cette soirée à laquelle vous êtes tous chaleureusement conviés, nous donnerons la parole à deux jeunes chercheurs, sur des thèmes très différenciés. Pour la première fois cette année, les exposés seront introduits par les responsables industriels concernés qui viendront expliciter les enjeux et les implications des travaux présentés.

Mouna Ben Hassine nous exposera le résultat de ses recherches sur la modélisation du vieillissement de jonctions de câbles HTA (1-50 kV), élément clé de la rationalisation d'une stratégie de maintenance.

Yé Wang présentera ses études sur l'évaluation les possibilités de participation des éoliennes au réglage de la fréquence. En effet, l'intérêt d'une telle participation augmente fortement avec leur taux de pénétration.

La soirée se prolongera selon la tradition par un pot amical au cours duquel nous pourrions continuer à échanger avec les jeunes conférenciers.

IEEE P&E S

Mardi 29 Janvier 2013

17h30 – 19h30

RTE - Tour Initiale

1 terrasse Bellini

Paris - La Défense

17h30 **Accueil**

Sébastien HENRY

**Président du Bureau IEEE - PES
France**

**Directeur Département Expertise
Système – R&D RTE**

17h40 **Mouna BEN HASSINE**

**PIMM (Arts et Métier ParisTech)
LML (Lille 1)
Renardières (EDF R&D)**

Intro. : Responsable thèse (EDF R&D)

18h35 **Yé Wang**

**L2EP (Ecole Centrale de Lille)
ADEME
EDF R&D**

Intro. : Julien Pestourie (EDF R&D)

19h30 **Pot de l'amitié**

Organisation et Inscriptions

Organisation :

Section France IEEE PES
(Power & Energy Society)
SEE

Inscriptions :

Gratuit
Confirmer votre participation à :
lydie.pendu@rte-france.com

***Soirée des doctorants n°3
Le 29 Janvier 2013***

**Modélisation du vieillissement
thermique et mécanique des
protections externes en EPDM des
jonctions rétractables à froid pour
liaisons HTA souterraines**

Les réseaux souterrains de distribution d'électricité moyenne tension (HTA) ont connu plusieurs mutations importantes. En particulier, depuis une vingtaine d'années, les accessoires de raccordement synthétiques de type « Rétractables à Froid » (RF) ont été introduits en remplacement des premiers accessoires initialement rubanés ou encore thermo-rétractables. En dépit de leur introduction massive dans le réseau français, il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'outil permettant de prédire précisément leur durée de vie. En effet, durant l'exploitation, un vieillissement de nature thermo-chimique, couplé à la légère expansion sur câble, est susceptible de conduire à une diminution de la pression à l'interface câble/accessoire ou encore à une fissuration superficielle du matériau.

Ce travail de thèse a pour objectif d'étudier les protections externes en EPDM (éthylène-propylène-diène monomère) des jonctions RF et de proposer un outil, couplant dans une même modélisation les effets mécaniques et thermo-chimiques, et ayant pour vocation de prédire leur comportement à long terme, et in fine, leur durée de vie.

Dans un premier temps, nous présenterons les travaux dédiés à la prédiction de la diminution de pression. Tout d'abord, l'analyse détaillée de l'effet du vieillissement thermique sur la structure chimique du matériau sera exposée. Ensuite, les conséquences du vieillissement thermo-chimique sur la relaxation viscoélastique des contraintes mécaniques seront discutées. Enfin, les éléments clefs de l'outil de modélisation que nous avons développé seront exposés. Nous montrerons, en particulier, comment l'outil développé réalise une connexion entre la microstructure du matériau, sa cinétique d'altération et le comportement mécanique macroscopique.

IEEE P&E S

Mardi 29 Janvier 2013

17h30 – 19h30

RTE - Tour Initiale

1 terrasse Bellini

Paris - La Défense

Dans un deuxième temps, nous présenterons les travaux dédiés à l'étude du comportement de la protection externe à la fissuration et l'influence du vieillissement sur l'amorçage et la propagation de la fissure, à partir de l'approche de la mécanique de la rupture.

Mouna BEN HASSINE

Mouna Ben Hassine a obtenu son diplôme d'ingénieur en 2010 à l'INSAT (Ecole Nationale des Sciences Appliquées et de Technologie) de Tunis en Tunisie. Elle effectue ensuite un Master 2 Recherche en polymères fonctionnels à l'Université Paris-Est Créteil. Dans le cadre d'une convention CIFRE avec EDF, elle est actuellement en troisième année de thèse, et elle partage son temps entre le Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM) des Arts et Métiers ParisTech, le Laboratoire de Mécanique de Lille (LML) à l'Université Lille 1 Sciences et Technologies, et le site d'EDF R&D des Renardières.



Soirée des doctorants

IEEE – PES France

Modélisation du vieillissement chimique et mécanique des protections externes des jonctions rétractables à froid

Projet CRAFF « Composants de Réseau de distribution –
Anticiper la Fin de vie et améliorer la Fiabilité »



Mouna BEN HASSINE

29 Janvier 2013

Encadrants de thèse



Directeurs de thèse

Xavier COLIN
ARTS et METIERS ParisTech,
Laboratoire Procédés et
Ingénierie en Mécanique et
Matériaux (PIMM).

Moussa NAÏT ABDELAZIZ
Université Lille 1,
Laboratoire de Mécanique
de Lille (LML).

Co-directeur de thèse

Fahmi ZAÏRI
Université Lille 1,
Laboratoire de Mécanique de Lille (LML).

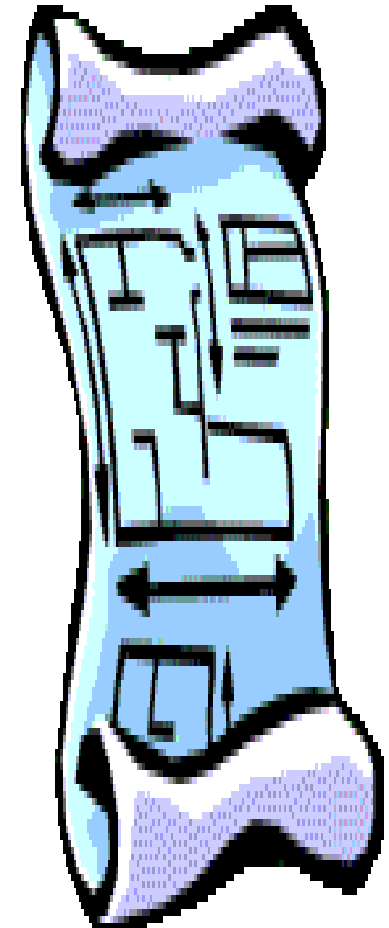
Thèse CIFRE avec EDF R&D des Renardières

Christophe TOURCHER,
EDF R&D,
Laboratoire des Matériaux
Electriques (LME).

Gregory MARQUE,
EDF R&D,
Matériaux et Mécanique
des Composants (MMC).



- *Contexte de l'étude,*
- *Objectifs et approche,*
- *Impact du vieillissement thermique :*
 - *Structure chimique,*
 - *Comportement mécanique :*
 - *Défaillance par relaxation (perte de pression),*
 - *Défaillance par rupture (endommagement),*
- *Conclusions,*
- *Perspectives.*



Contexte de l'étude

Problématique



- L'une des **problématiques** les plus importantes d'ERDF :

Etude du vieillissement des liaisons électriques en vue de la prédiction de leur durée de vie.

- Depuis quelques années, ERDF s'intéresse également aux accessoires électriques dont les **jonctions** qui servent à raccorder les câbles électriques.

- La dernière génération de **jonctions** utilisées par ERDF sont **rétractables à froid (RF)** :

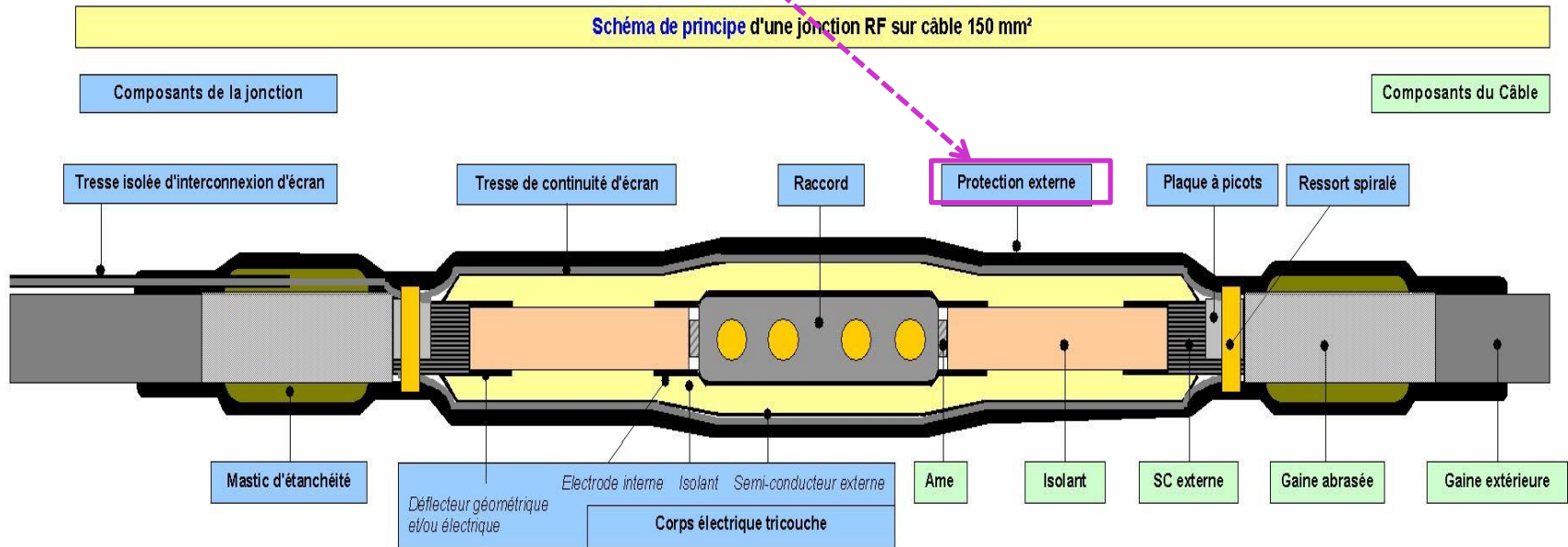
- Technologie relativement **récente (20 ans)** sur laquelle EDF a peu de connaissance,
- 30 000-40 000 jonction RF/an : les **plus nombreux** (1 jonction /300 m en liaison neuve),
- Technologie très confidentielle côté « fabricants »,
- Peu de défaillances sur le réseau, mais durée de vie inconnue...

Matériau d'étude



• Schéma de principe :

EPDM (éthylène-propylène-diène monomère)



• Principe de fonctionnement :

1. Tubes pré-expansés sur support,
2. Retrait du support,
3. Rétraction des composants sur les câbles HTA à T_{ambiante} .



Tube de protection externe en cours de « dézippage »

Problématique



Vieillessement ?

Modification de la structure et/ou de la composition

Physique : Evolution du matériau **en absence** de modification de la structure chimique,

- Configuration spatiale des chaînes moléculaires (relaxation interne de volume, post cristallisation...),
- Phénomène de transport (migration d'adjuvant, pénétration du solvant)...

Chimique : Evolution du matériau **avec** modification de la structure chimique,

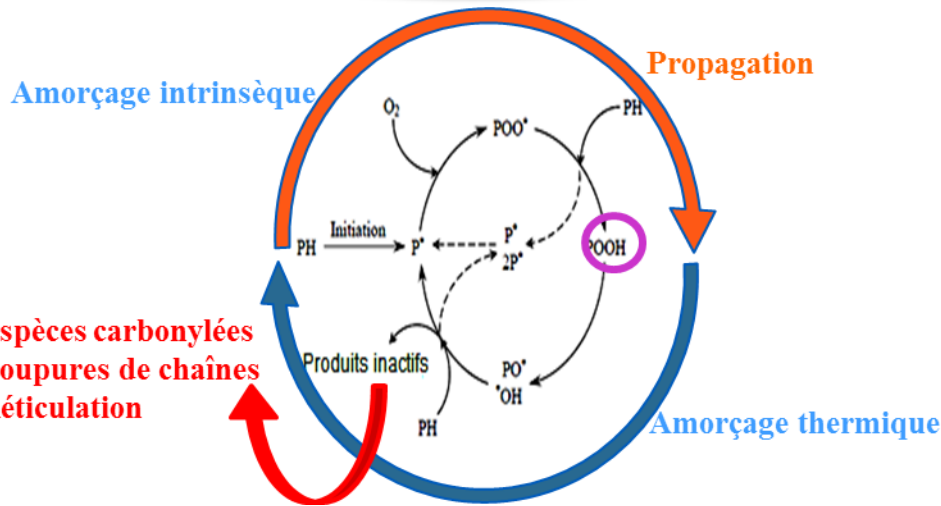
- Réactions d'oxydation et d'hydrolyse (Coupures statistiques du squelette),
- Réactions de dépolymérisation,
- Réactions de post réticulation...

Objectifs et approche

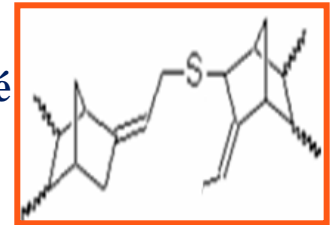
Méthodologie



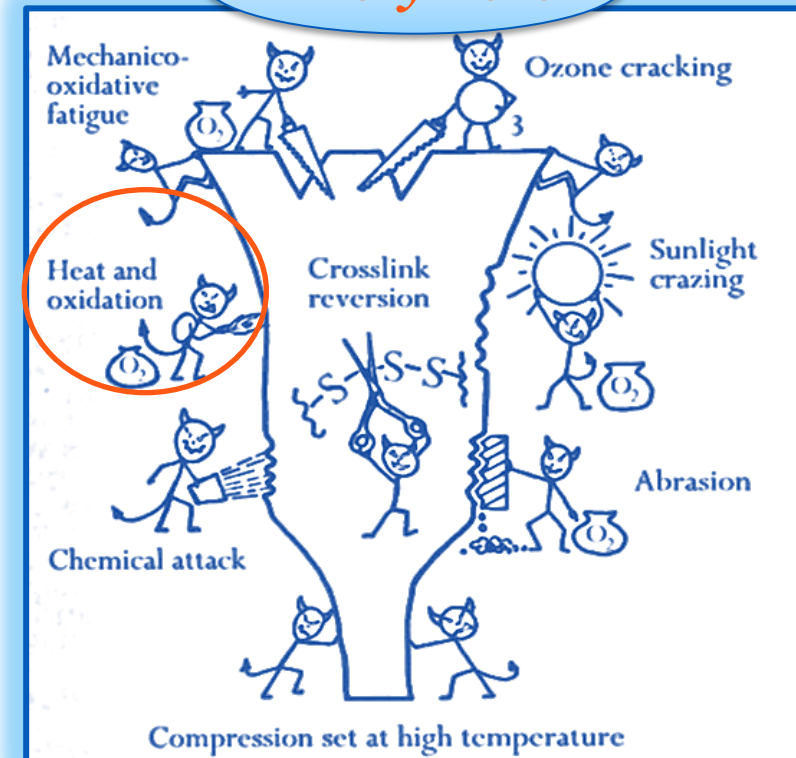
Thermo-oxydation



EPDM vulcanisé au soufre



Polymère



Modification de la structure chimique :
fragilisation



Impact sur l'intégrité mécanique



Impact sur la durée de vie

Objectifs et approche

Méthodologie



Etude de la dégradation
chimique (*Température + O₂*)

Durée de vie des jonctions en
absence de sollicitation mécanique

*Modèle cinétique
de dégradation chimique
(matrice élastomérique)*

*Modèle cinétique
de relaxation
(matériau industriel)*

Etude du *couplage* :
Vieillessement chimique sous sollicitation mécanique

Durée de vie des jonctions dans les conditions réelles de fonctionnement (Cycle de charge-décharge, température,...)

*Modèle cinétique
de dégradation chimique sous sollicitation mécanique*

Détermination d'un critère de fin de vie

Structure chimique de la gomme

Démarche



Vieillissement thermique de films minces en étuve ventilée,

Caractérisation par IR et rhéométrie à l'état fondu :
Détermination de la cinétique d'oxydation et des coupures de chaînes EPDM,

Intégration de la cinétique de dégradation dans la modélisation du matériau industriel,



FTIR-IR : Produits d'oxydation (-C=O et -OH)

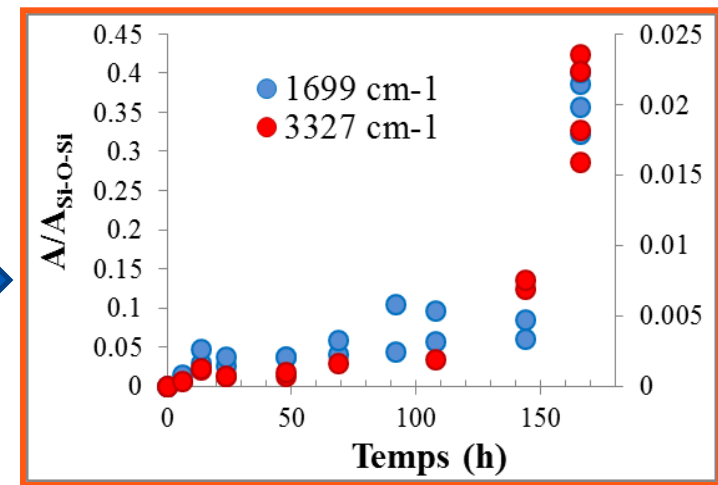
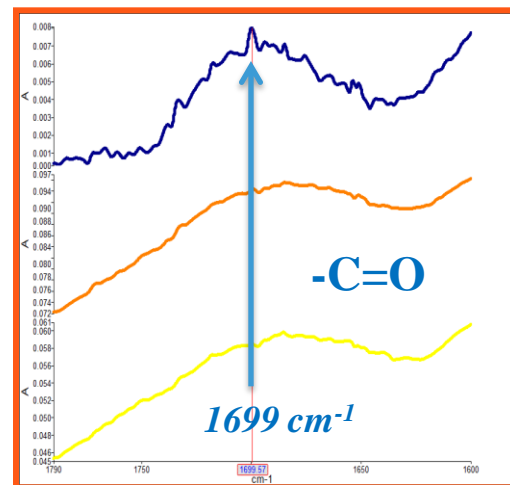
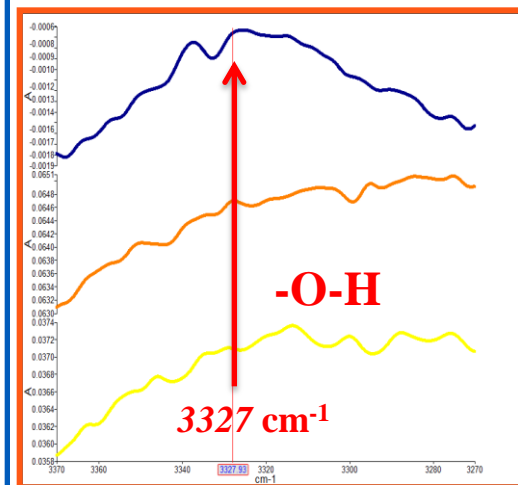
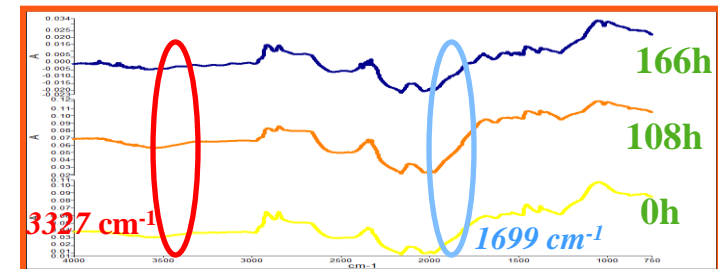
Principe :

Analyse qualitative de la surface :

fonctions carbonyles (-C=O) et hydroxyles (-OH)

→ Bandes caractéristiques de vibration des liaisons

Résultats à 170°C :





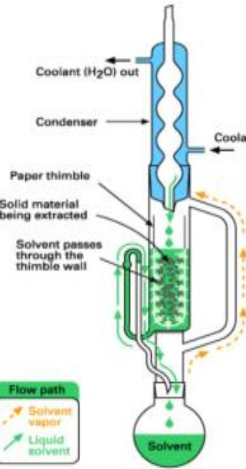
Essais de gonflement en Soxhlet : Densité de réticulation

Principe : Gonflement par un solvant,

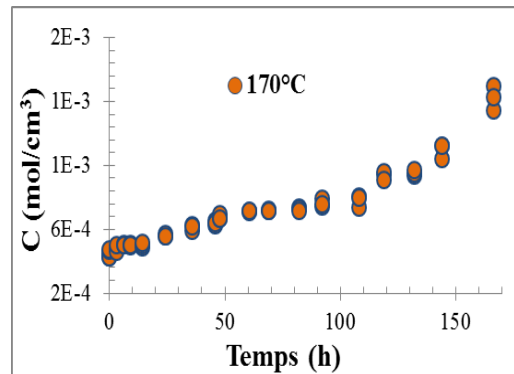
Flory-Rhener :

$$C = - \frac{V_{pol} + \mu \times V_{pol}^2 + \ln(1 - V_{pol})}{V_0 \times (V_{pol}^{\frac{1}{3}} - V_{pol}^{\frac{1}{2}})} \quad (\text{mol/cm}^3)$$

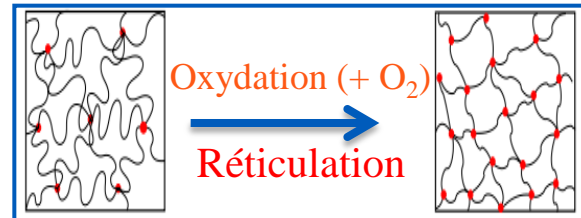
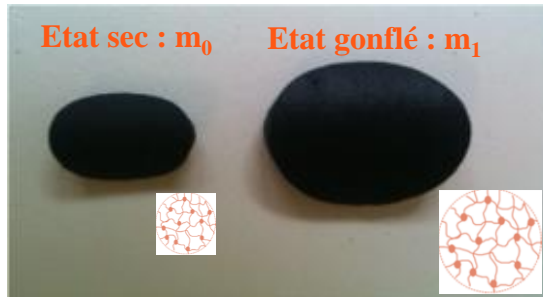
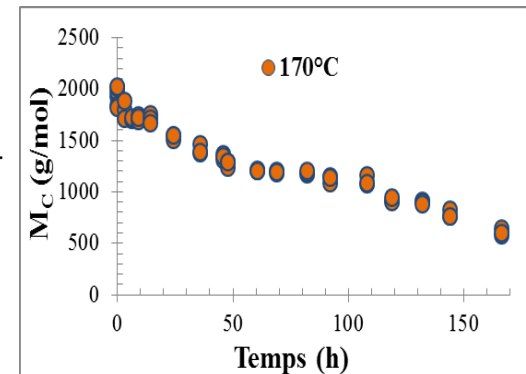
- C : concentration en chaîne élastiquement actives
- μ : Paramètre d'interaction élastomère-solvant
- V₀ : Volume molaire du solvant (mol.cm⁻³),
- V_{pol} : Fraction volumique de l'élastomère.



Résultats :



$$M_c = \frac{\rho_{pol}}{C}$$



Comportement mécanique



- ❑ **Défaillance par relaxation**

(perte de pression)

- ❑ **Défaillance par rupture**

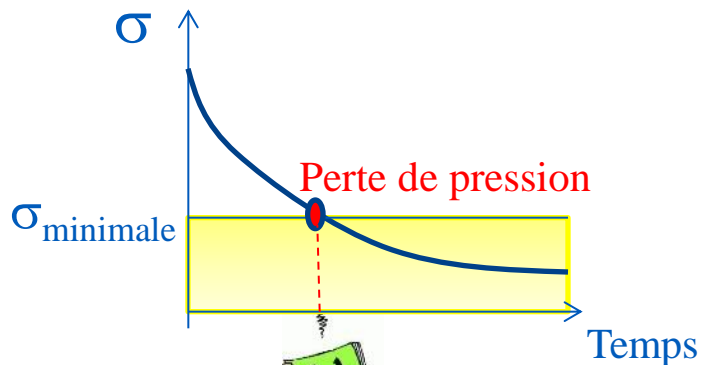
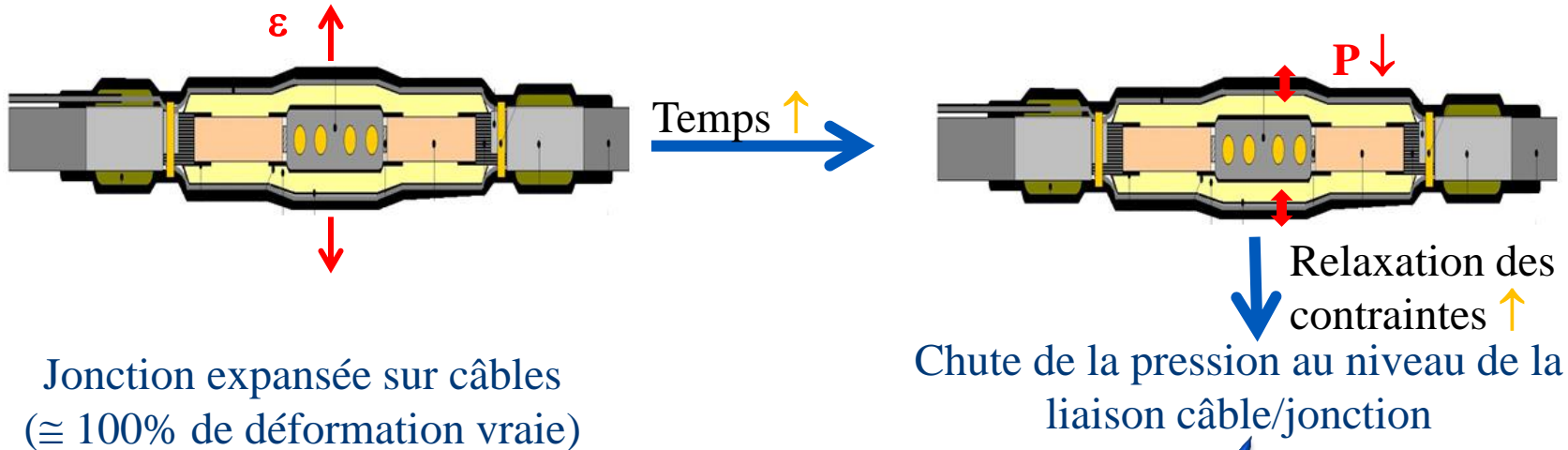
(endommagement)



*Montage de vieillissement
thermique*

Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Objectif



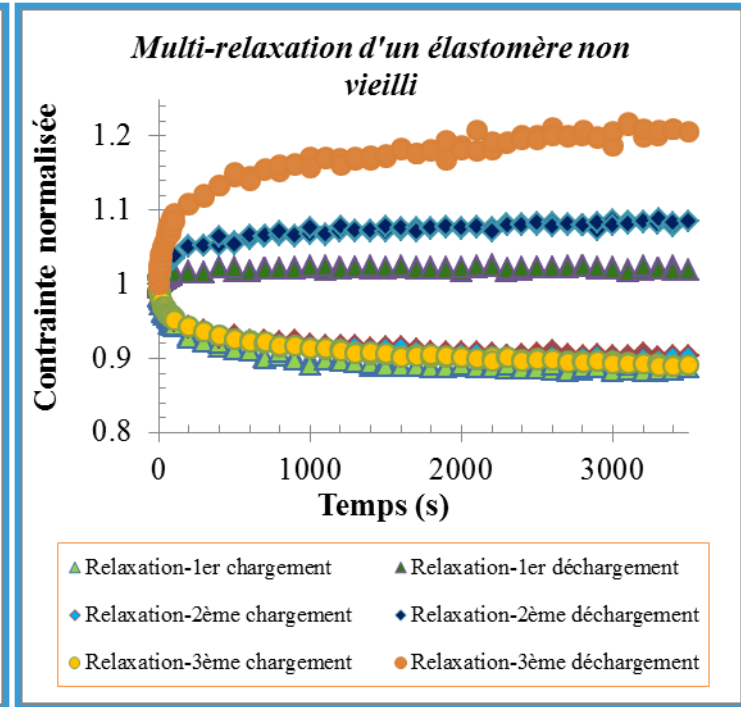
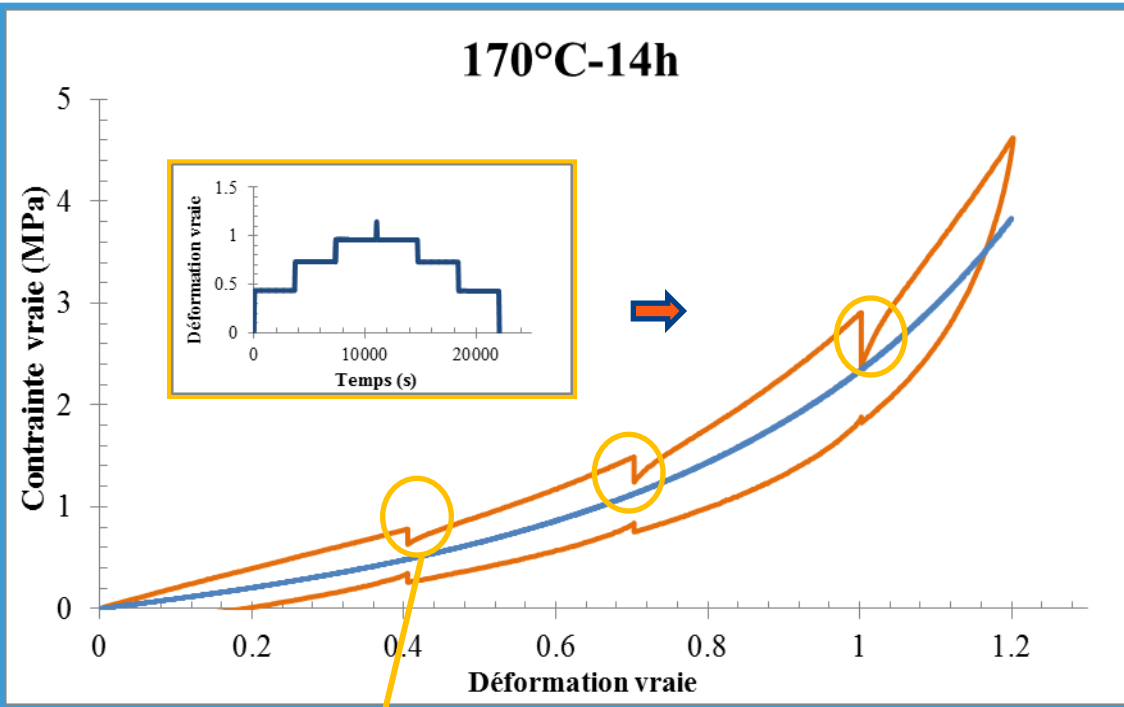
Prédire la durée de vie en considérant comme critère la contrainte interfaciale minimale.

Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : *Essais de multi-relaxation*



□ Réponse visco-élastique en grandes déformations :

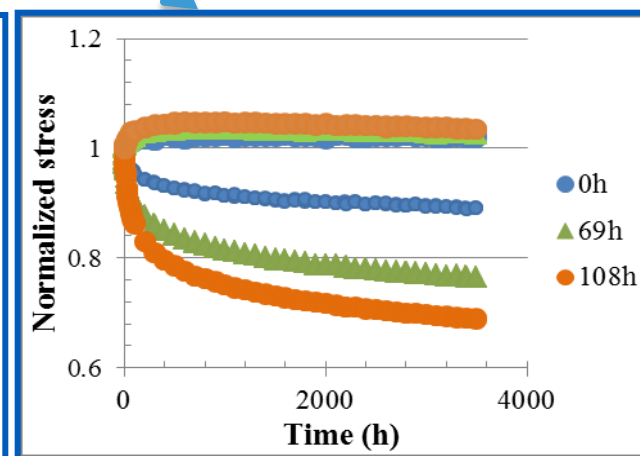
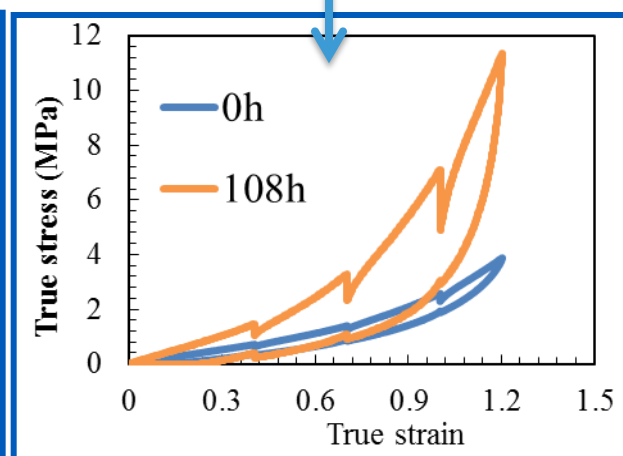
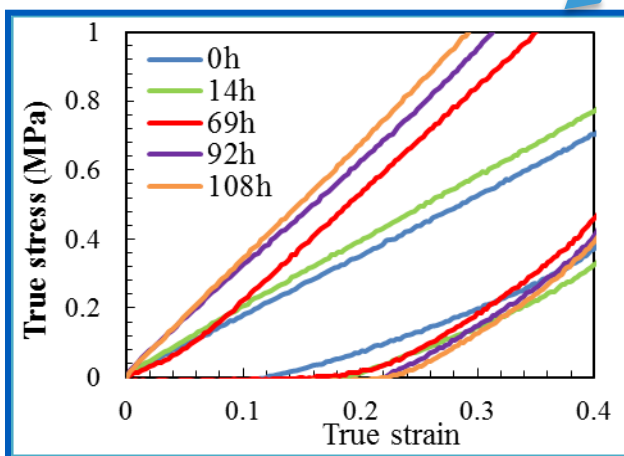
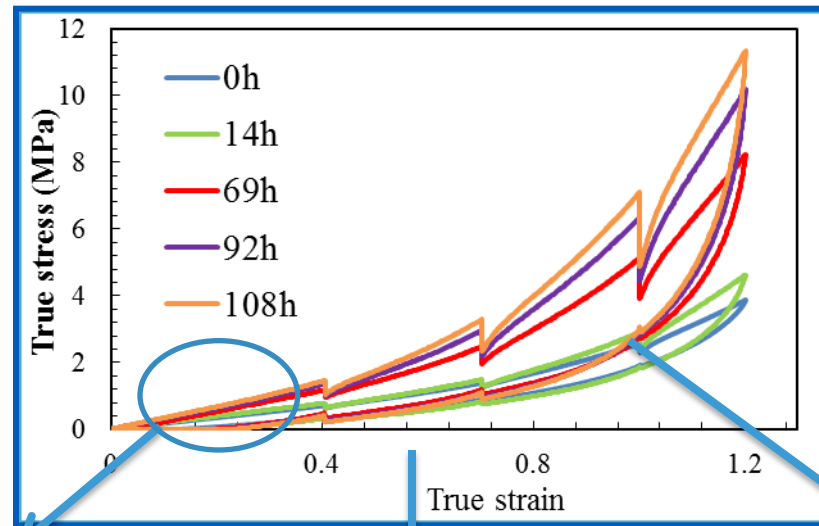


RELAXATION DES CONTRAINTES

- Viscosité évolue de manière non-linéaire avec la déformation.
- Accentuée lors du déchargement.

Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : *Essais de multi-relaxation*



☐ Déformation rémanente avec le temps d'exposition.

☐ Dissipation avec le temps d'exposition.

☐ Relaxation avec le temps d'exposition.

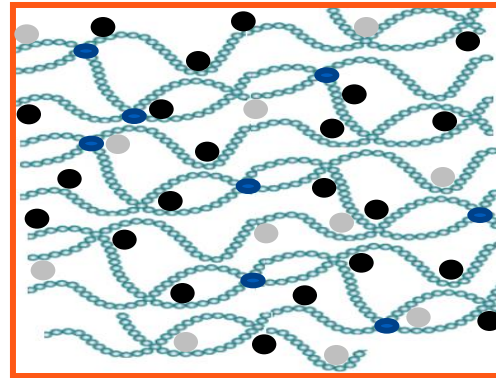
Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Mécanisme de dégradation de l'EPDM

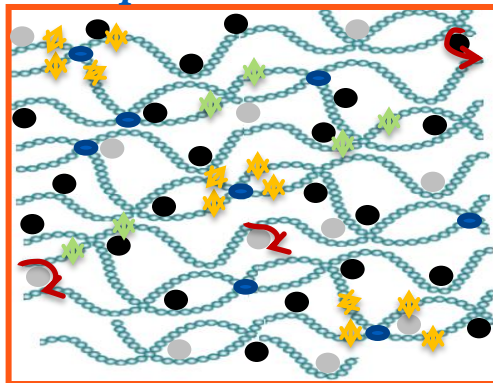


Réseau macromoléculaire

- Interactions chaînes/chaînes,
- Enchevêtrements de chaînes,
- Interactions charges/chaînes.

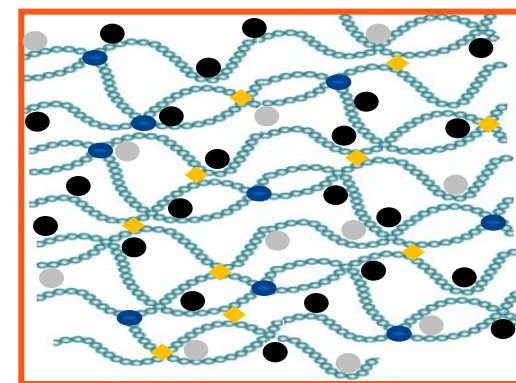


Coupure des chaînes



- Reliées aux nœuds soufrés,
- Enchevêtrées,
- Liées à la charge.

Réticulation des chaînes



- Doubles liaisons entre elles,
- Double liaison avec un macroradical,
- Combinaison des macroradicaux.

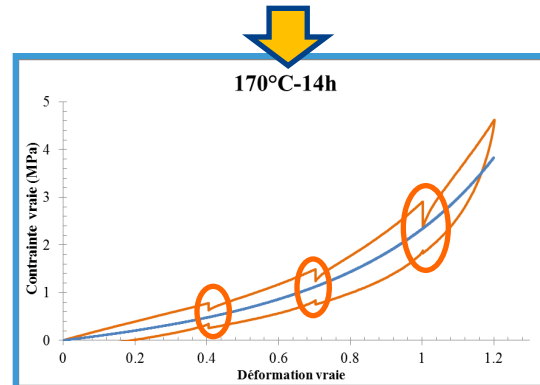
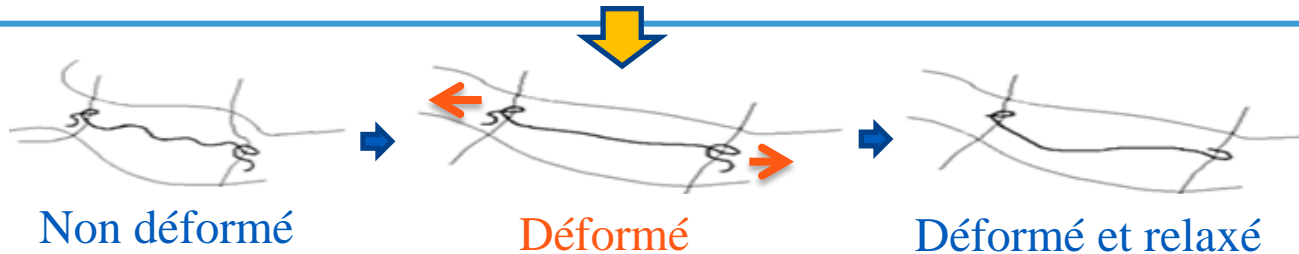
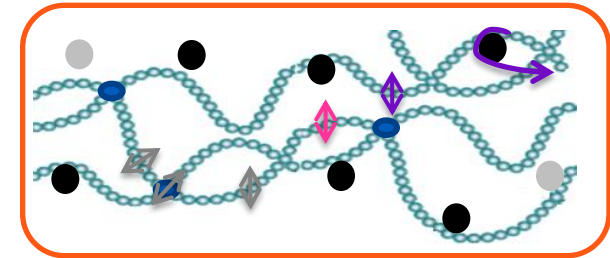
Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Mécanisme de dégradation de l'EPDM



Coupures des chaînes ⇔ Relaxation des contraintes

- Coupures de chaînes élastiquement actives de part et d'autres des nœuds de réticulation,
- Coupures de chaînes enchevêtrées et désenchevêtrement,
- Coupures des interactions et décohéson entre les chaînes élastiquement actives et les charges.



Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Modélisation



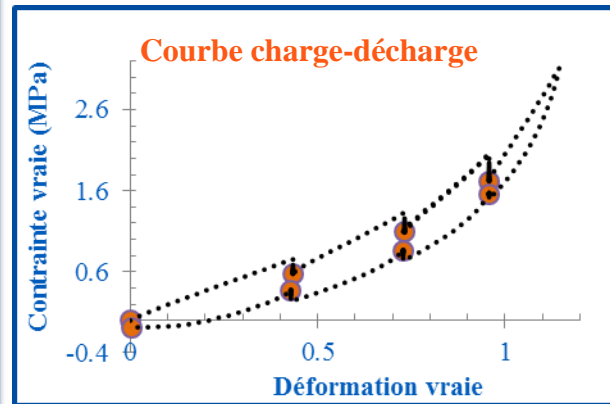
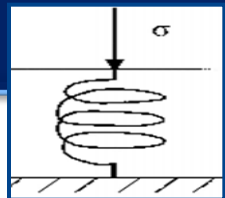
Choix du modèle

Evolution non-linéaire de la contrainte en fonction de la déformation

+

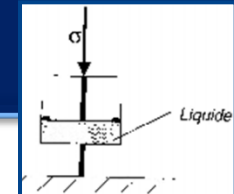
Faible déformation rémanente

→ Composante élastique non linéaire appelée aussi hyperélastique



Forte hystérésis observée lors du cycle charge/décharge

→ Composante visqueuse



Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Modélisation

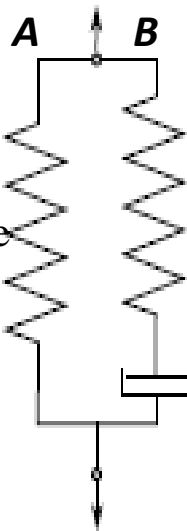


Représentation rhéologique de type Zener

Réponse d'équilibre (réversible)

Déviaton à l'équilibre (irréversible)

Ressort non-linéaire



Ressort non-linéaire

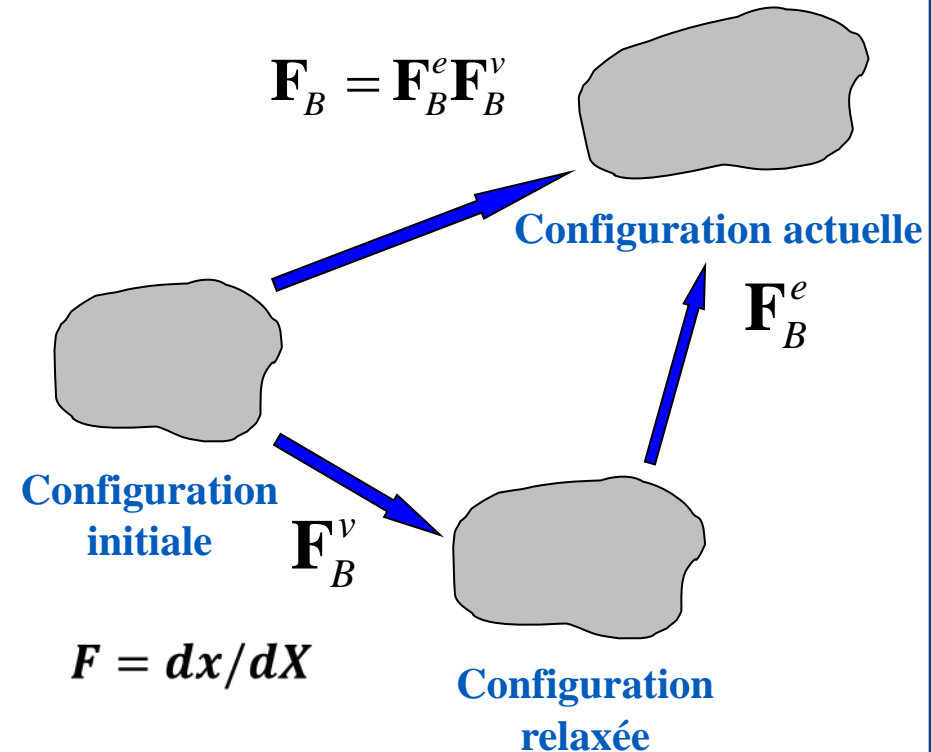
Amortisseur visqueux

$$T = T_A + T_B$$

$$F_A = F_B = F$$

Cinématique en visco-élastique

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{F}_B^e \mathbf{F}_B^v$$



$$F = dx/dX$$

Hypothèses :

incompressible, homogène et isotrope.

Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Modélisation



Ressorts hyperélastiques

$$T_A = C_{rA} \sqrt{N_A} \frac{(\lambda_i^A)^2 - (\lambda_{chain}^A)^2}{\lambda_{chain}^A} L^{-1} \left(\frac{\lambda_{chain}^A}{\sqrt{N_A}} \right)$$

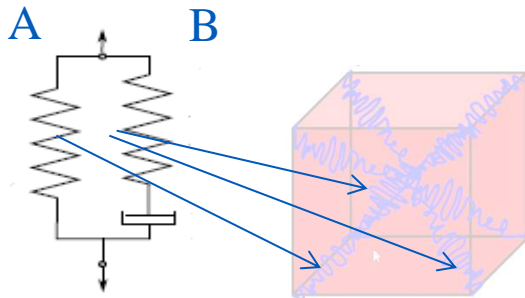
$$T_B = C_{rB} \sqrt{N_B} \frac{(\lambda_i^{Be})^2 - (\lambda_{chain}^{Be})^2}{\lambda_{chain}^{Be}} L^{-1} \left(\frac{\lambda_{chain}^{Be}}{\sqrt{N_B}} \right)$$

Amortisseurs visqueux

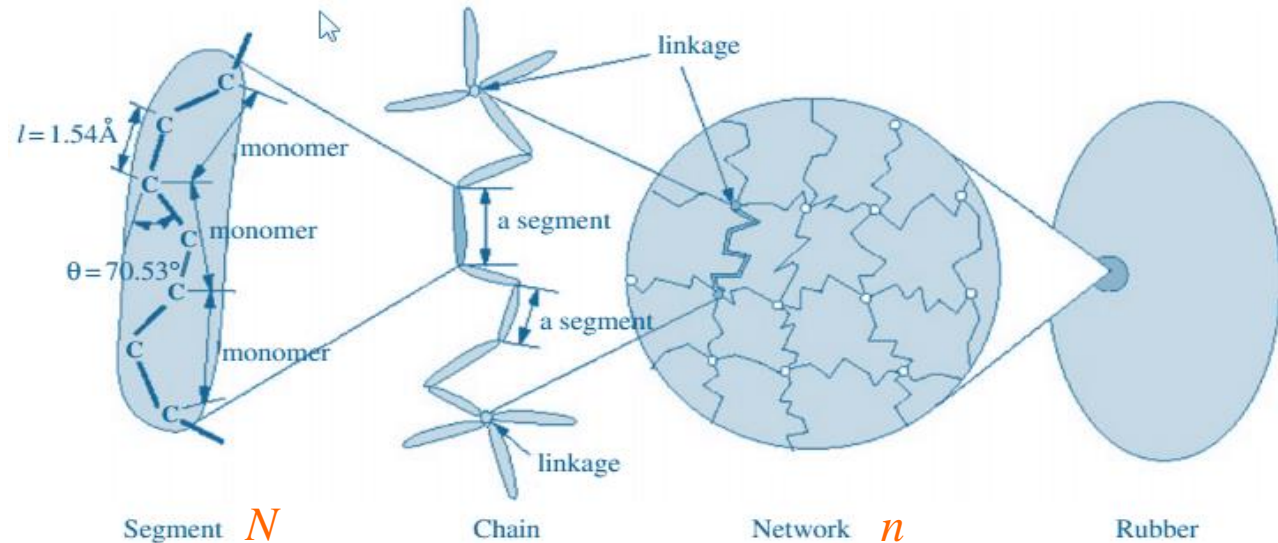
$$\dot{\gamma}_B = C \left[\frac{1}{\lambda_{chain}^{Bp}} \right]^d \tau_B^m$$

\swarrow \searrow

$\dot{\gamma}_B^v$ loading $\dot{\gamma}_B^v$ unloading

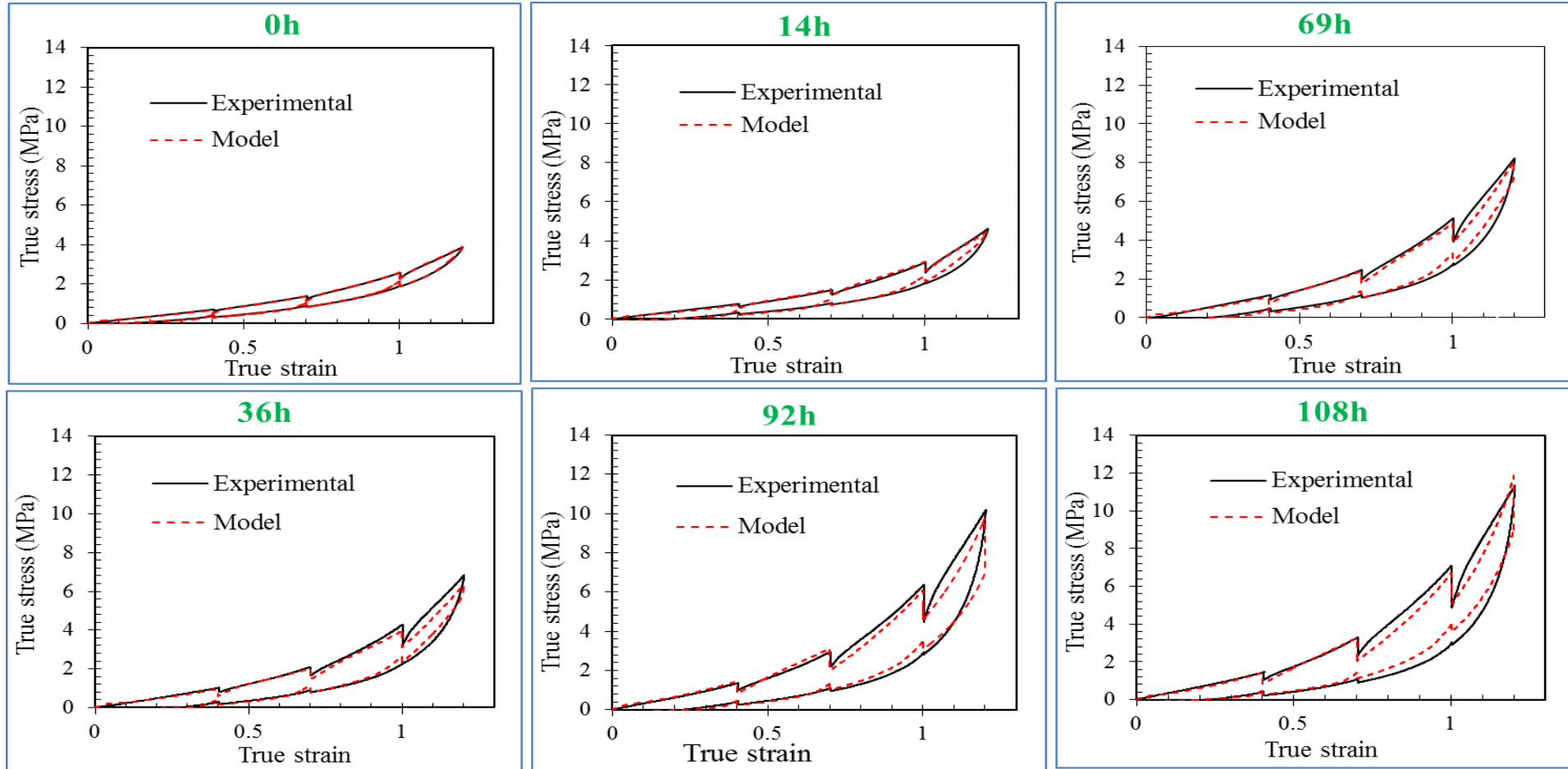


Modèle à 8 chaînes

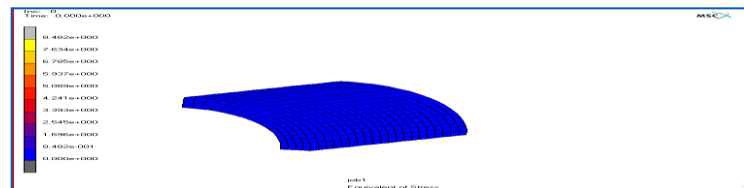


Comportement mécanique

Défaillance par relaxation : Expérience/Modélisation



Bon accord



Comportement mécanique

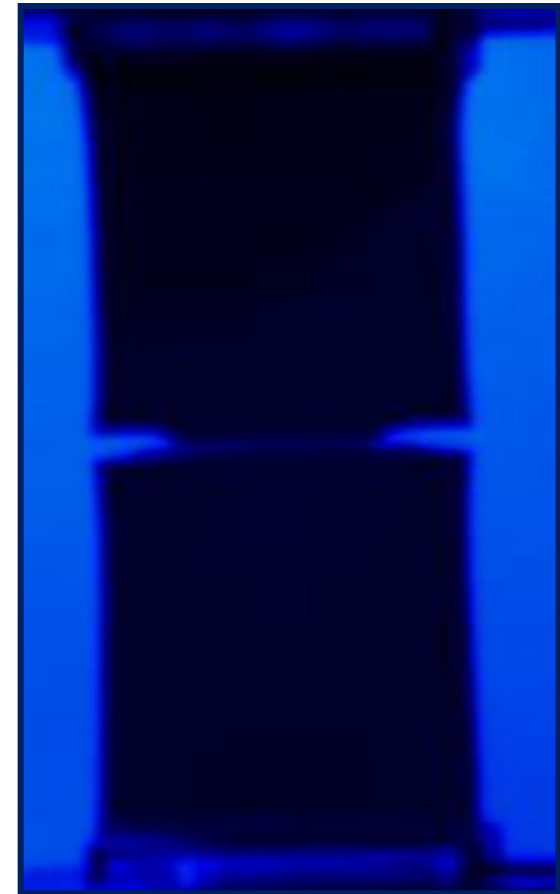


- ❑ Défaillance par relaxation

(perte de pression)

- ❑ Défaillance par rupture

(endommagement)



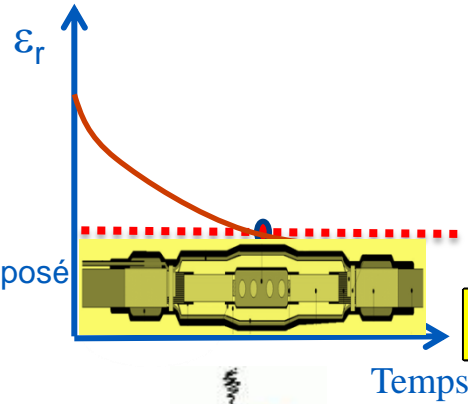
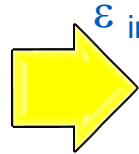
*Eprouvette de type
« DENT »*

Comportement mécanique

Défaillance par rupture : *Objectif*

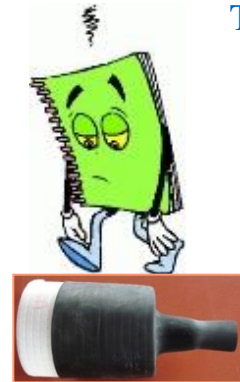


Traction uniaxiale sur éprouvette saine
 $\epsilon_r = f(\text{Temp}, \text{tps})$



Critère de fin de vie
 Allongement à la rupture critique

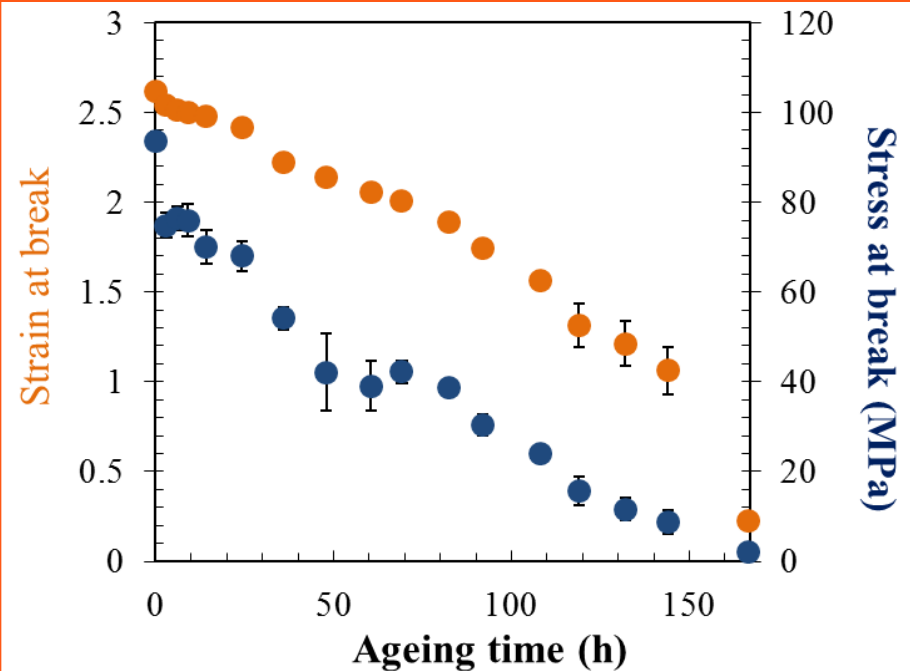
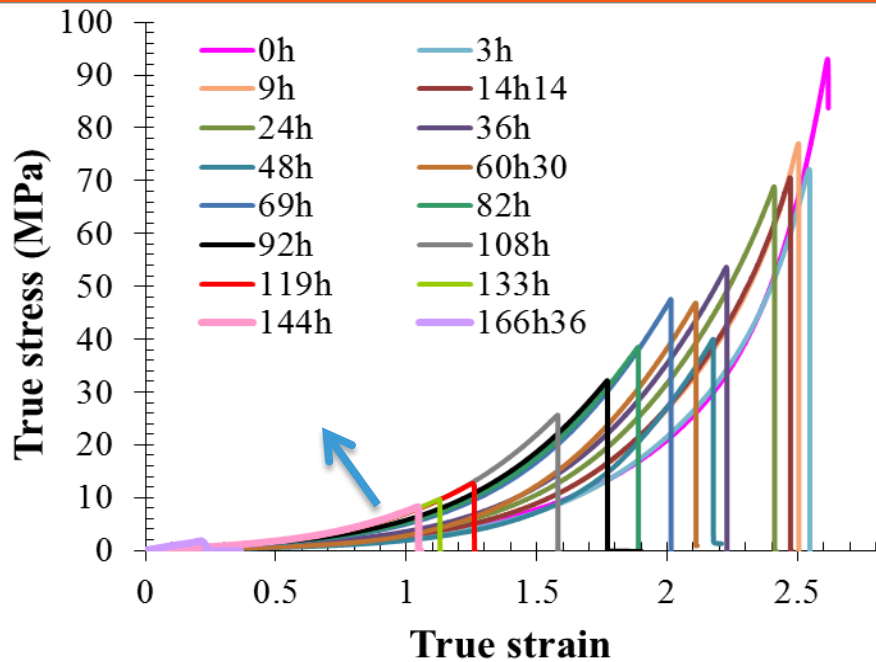
Approche « mécanique de la rupture » :
 Energie de déchirement
 $J(\text{Temp}, \text{tps}) \rightarrow a^{th} \rightarrow \epsilon_r$



Prédire la durée de vie en considérant comme critère l'allongement à la rupture critique.

Comportement mécanique

Défaillance par rupture : Traction uniaxiale : ϵ_r et σ_r

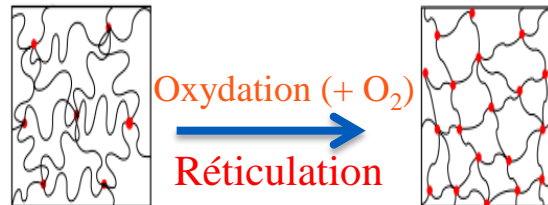


➔ Module caoutchoutique ($C_r = nK\theta$),

➔ Durcissement.

➔ Allongement à la rupture (ϵ_r),

➔ Contrainte à la rupture (σ_r).



Comportement mécanique

Défaillance par rupture : mécanique de la rupture



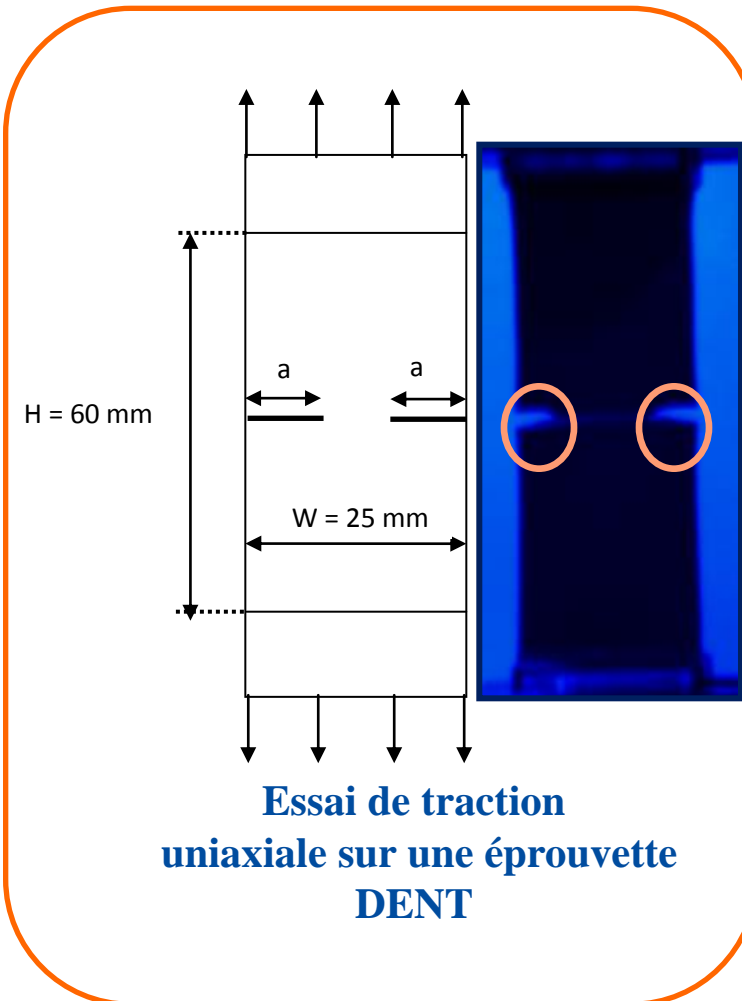
- Energie de déchirement pour une éprouvette « DENT » :

$$J = 4kW_0 a$$

- Relation avec la microstructure :

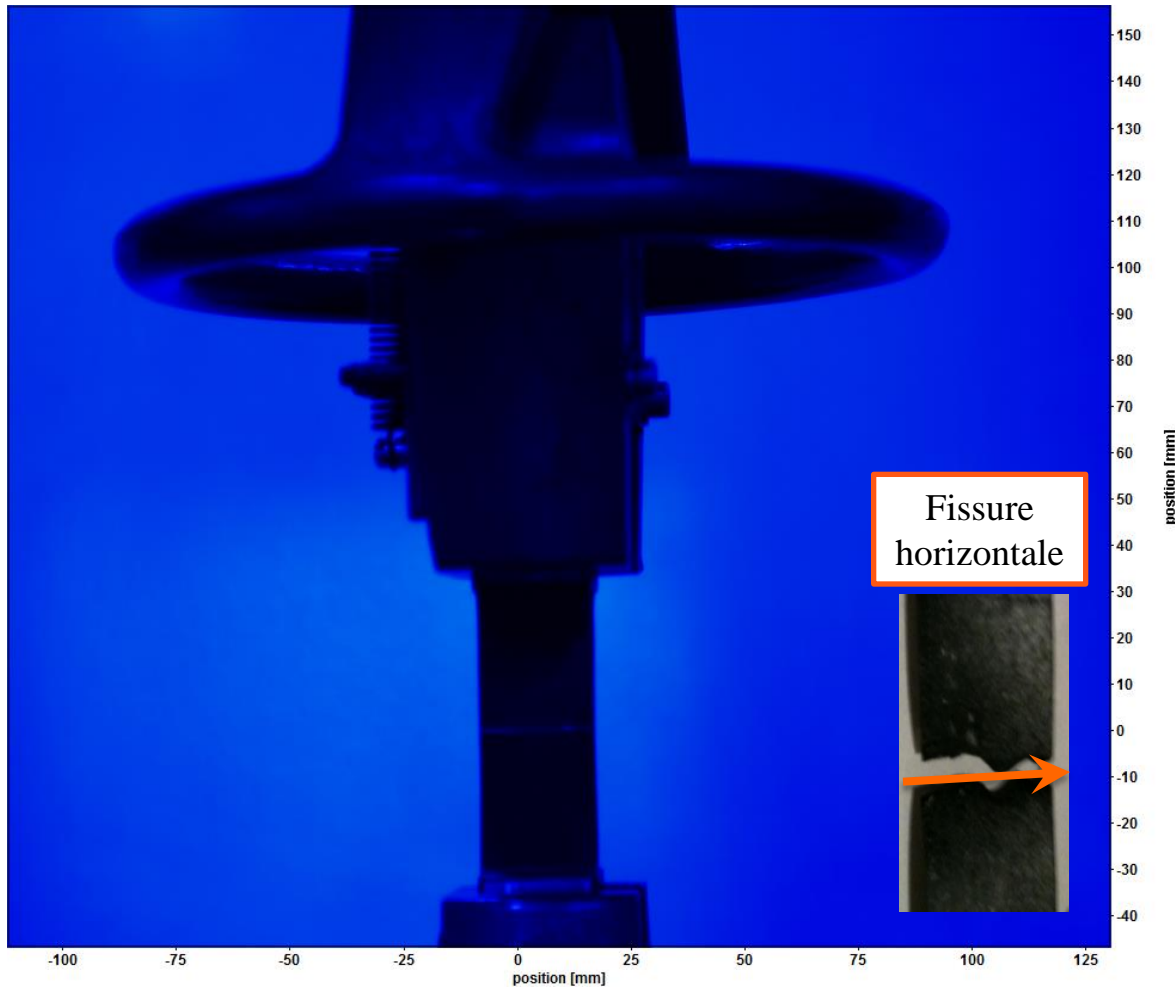
$$J = \alpha M_c^{1/2}$$

- ➔ Effet du vieillissement sur des éprouvettes initialement pré-fissurées : suivi de J_c .



Comportement mécanique

Défaillance par rupture : mécanique de la rupture



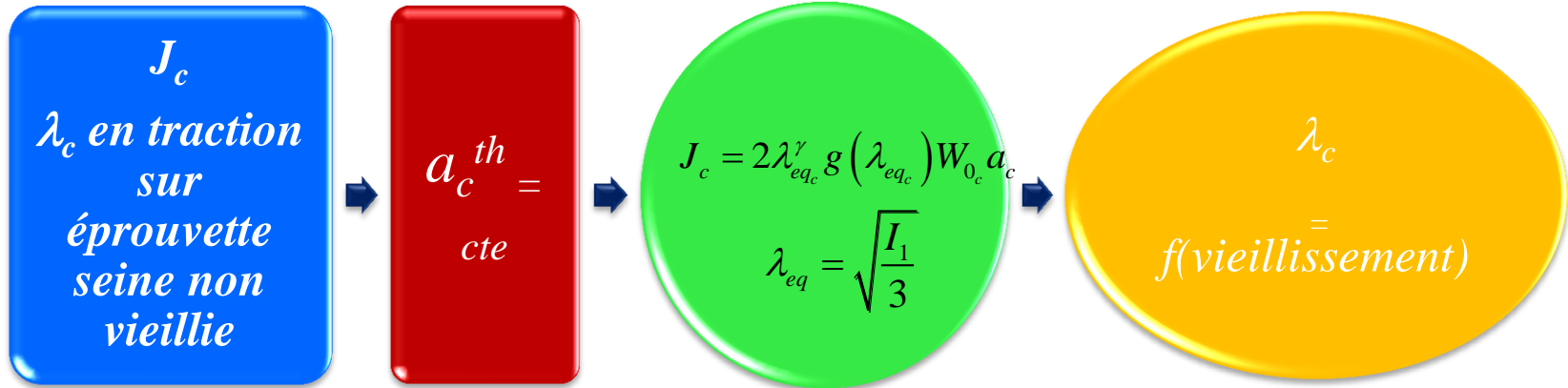
Éprouvette
vieille
580h-150°C

Comportement mécanique

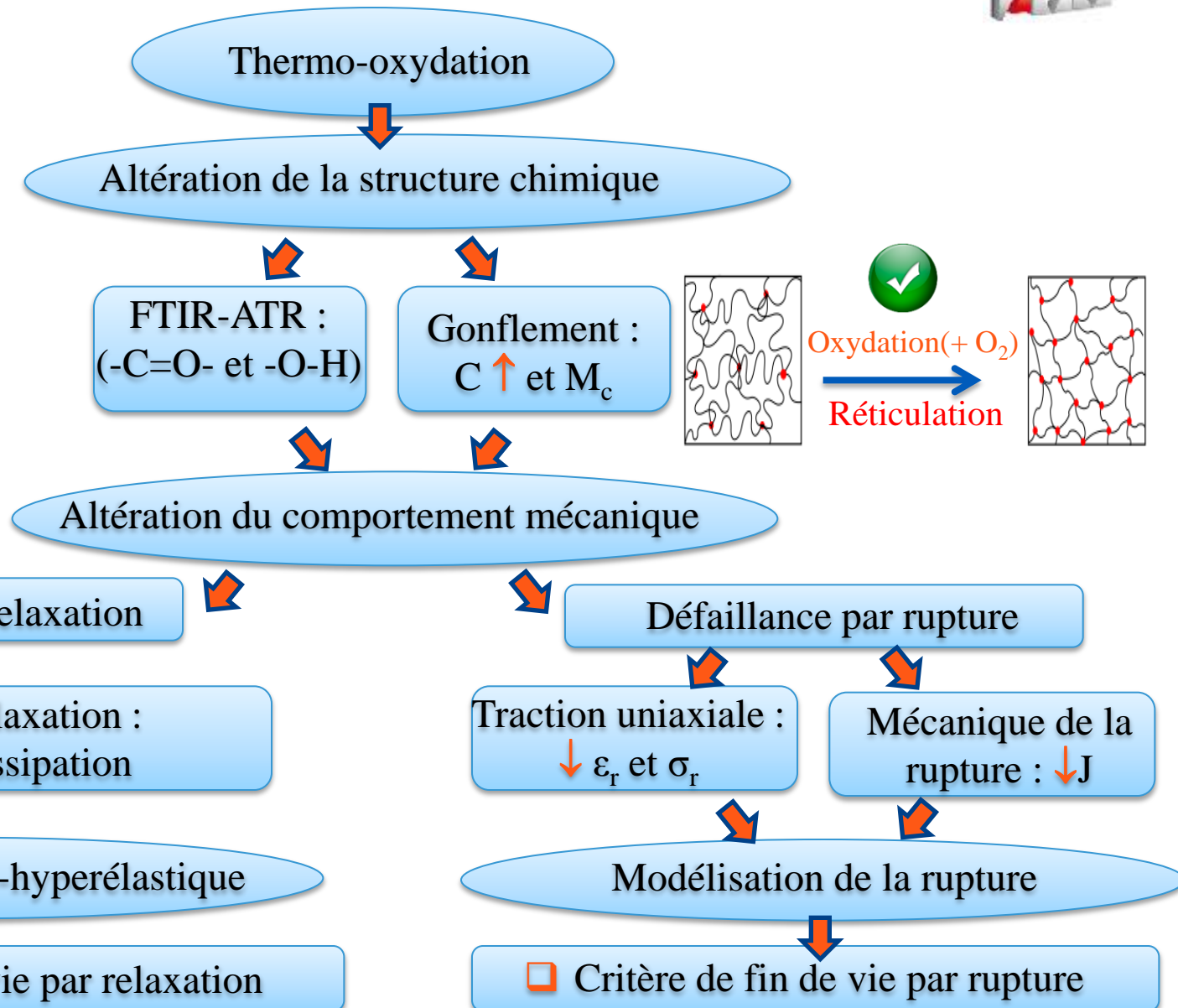
Défaillance par rupture : mécanique de la rupture



Concept du défaut intrinsèque



*Corrélation directe
 entre J et λ_c*



Merci pour votre attention



Des questions?

Des commentaires?

***Soirée des doctorants n°3
Le 29 Janvier 2013***

**Evaluation de la performance des
réglages de fréquence des éoliennes
à l'échelle du système électrique :
application à un cas insulaire**

L'intégration croissante de la production éolienne ne participant pas au réglage de fréquence induit de nouvelles difficultés dans la gestion des systèmes électriques. Ces problèmes sont d'autant plus significatifs que le réseau est plus faible. Il apparaît que l'insertion massive des éoliennes ne pourra se poursuivre qu'à condition qu'elles puissent participer au réglage de fréquence comme le font les producteurs classiques. Dans ce contexte, la présente thèse vise à évaluer la performance et la fiabilité du service de réglage de fréquence rendu par les éoliennes à l'échelle du système électrique. Les études sont appliquées sur un réseau insulaire.

D'abord, l'impact d'un fort taux de pénétration de la production éolienne sur l'allocation de la réserve primaire et sur le comportement dynamique du réseau est caractérisé. Il est montré que la participation des éoliennes au réglage de fréquence est techniquement indispensable pour le maintien de la sûreté du système électrique à partir d'un certain taux de pénétration instantané « critique ».

Deux solutions permettant aux éoliennes de contribuer au réglage de fréquence sont ensuite étudiées par simulations dynamiques. La performance d'une inertie émulée est caractérisée en considérant l'impact du point de fonctionnement initial des éoliennes et des paramètres du contrôleur. La contribution de la réserve éolienne à l'amélioration de la performance dynamique du système est ensuite identifiée. Le potentiel de la combinaison des deux réglages est également exploré.

IEEE P&E S

Mardi 29 Janvier 2013

17h30 – 19h30

RTE - Tour Initiale

1 terrasse Bellini

Paris - La Défense

Afin d'évaluer le potentiel et la fiabilité de la réserve éolienne, la dernière partie de ce travail est consacrée aux études statistiques prenant en compte la variabilité et l'incertitude de la prévision de la production. Deux stratégies du placement de réserve sont proposées et comparées. Des méthodologies ont également été développées pour caractériser le potentiel de la réserve éolienne instantanée et le placement de réserve en pratique. L'impact des erreurs de prévision sur le potentiel du réglage primaire des éoliennes est mis en évidence. Enfin l'énergie réglante d'une ferme et la plage de réglage du système éolien sont caractérisées.

Yé Wang

Ye WANG a obtenu son diplôme d'ingénieur à l'Ecole Centrale de Lille en 2009. Dans la même année il a réalisé un master recherche à l'Université Lille 1.

Il a commencé en octobre 2009 sa thèse dans le laboratoire L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille). Ce projet de recherche a été cofinancé par EDF R&D et ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Il a soutenu sa thèse le 20 novembre 2012.

Son domaine de recherche concerne l'analyse de la dynamique du système électrique, l'étude sur les réseaux insulaires et l'intégration des énergies renouvelables.



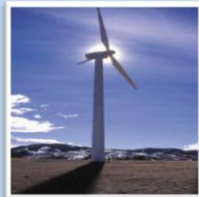
Thèse 2009 – 2012

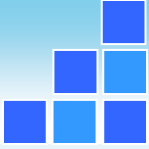


Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire

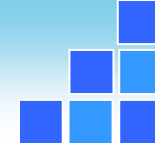
Soirée des doctorants – IEEE PES Bureau France – le 29 janvier 2013

- Docteur : **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@edf.fr

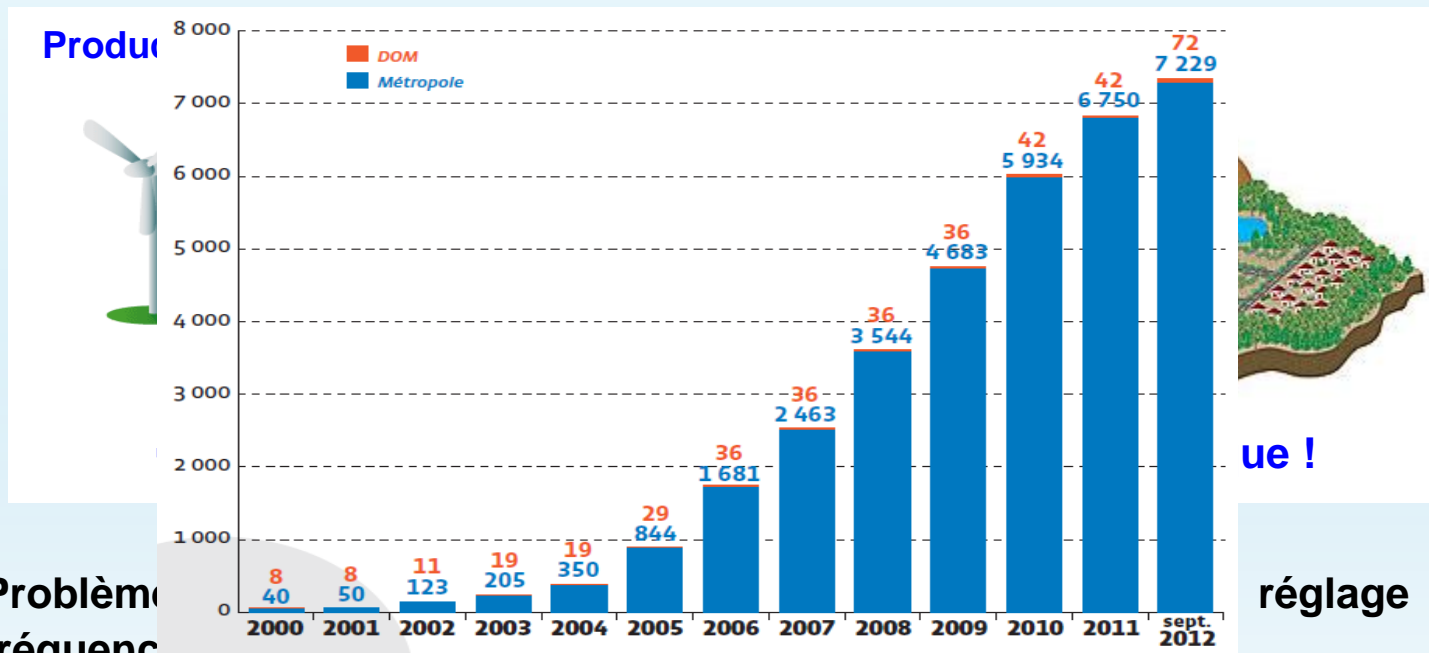




Avant-propos



❖ Développement de l'éolien

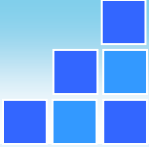


❖ Problème de fréquence

- Évolution des réglementations et des référentiels techniques

❖ Exigence de la participation au réglage 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)

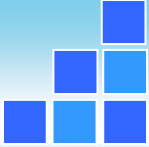


- ❖ **De nombreux travaux de recherche existants sur l'implantation du réglage de fréquence sur les éoliennes à vitesse variable**

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
G.C. Tarnowski (DTU, Danemark)	D. Marin
R.G. de Almeida et J.A. Peças Lopes (<i>INESC, Portugal</i>)	G2ELAB
M. O'Malley (<i>UCD, Irlande</i>)	A. Teninge
...	

- ❖ **Problématiques des études dans la littérature**

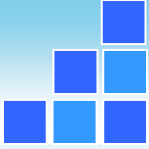
- Concentrées sur la faisabilité technique
 - ➔ performances du service rendu par un moyen de production intermittente ?
- Portées à l'échelle de l'installation d'une production
 - ➔ valeur du réglage de fréquence vue du système électrique ?



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



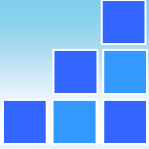
- ❖ **Cas d'étude de référence : un réseau du type « système insulaire »**
 - Taille limitée
 - ➔ mise en évidence plus rapide des problématiques
 - Perspectives de développement important des filières EnR



1

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

1.1. Rappel de quelques principes de fonctionnement du système électrique



❖ Règles générales pour définir un plan de production

- Production = consommation + pertes
- Suffisamment de réserve tournante pour couvrir le risque N-1
- Respect des minimum et maximum techniques de chaque groupe raccordé

❖ 2 types de production sur les réseaux insulaires

- Groupes participant au réglage de fréquence
 - ❑ Groupes thermiques et hydrauliques
 - ❑ Réserve constituée = $P_{nominale} - P_{produite}$
- Groupes qui ne participent pas au réglage de fréquence
 - ❑ Différentes productions EnR fatales (PV, éolien, etc.)
 - ❑ Contrat d'obligation d'achat

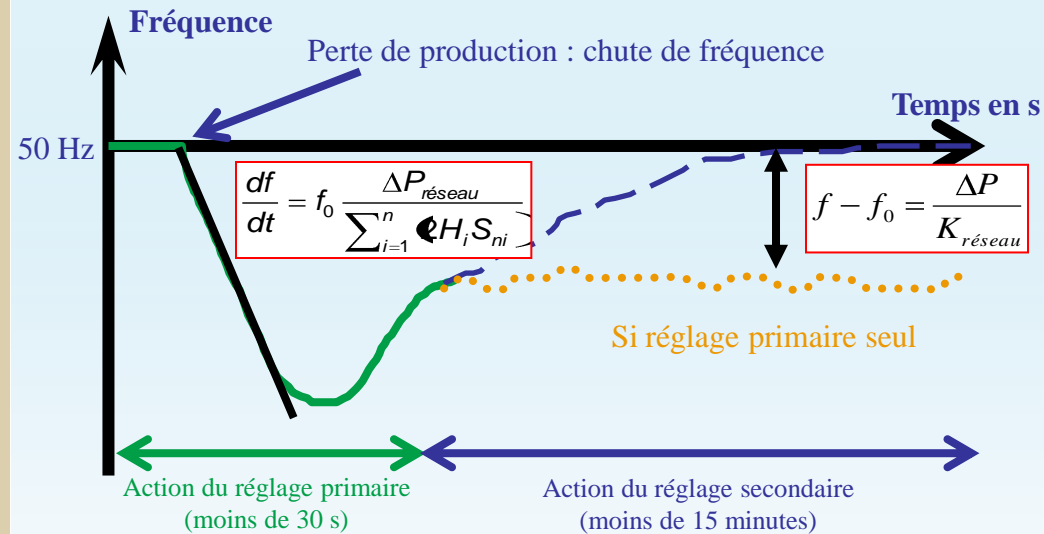
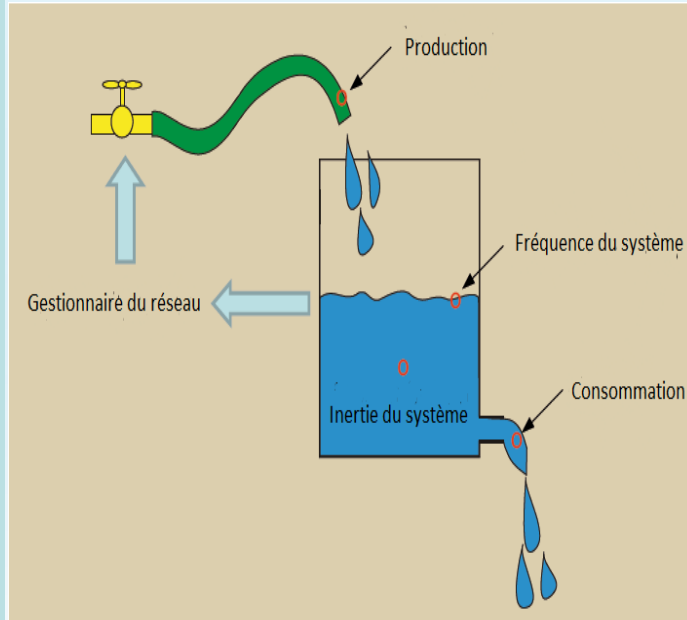


1.1. Rappel de quelques principes de fonctionnement du système électrique



❖ Service système : réglage de la fréquence

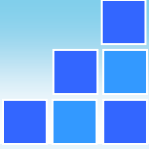
➤ La fréquence est l'image de l'équilibre production consommation












Deux composantes du réglage primaire de fréquence :

- contribution inertielle
- réserve tournante

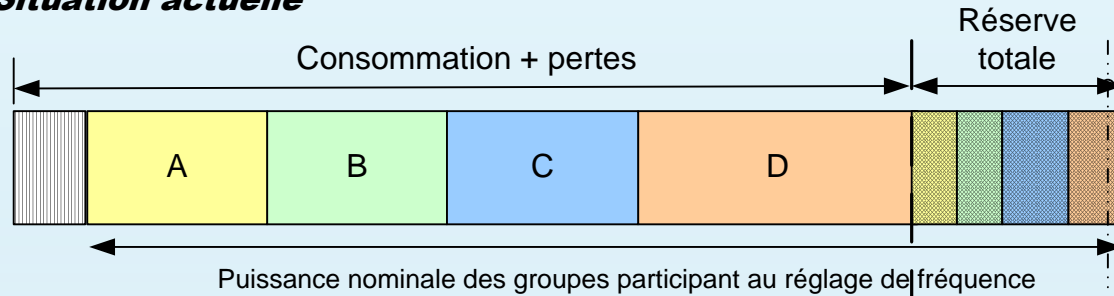
1.2. Impact statique sur le placement de la réserve



-  : Production renouvelable passive
-     : Production des groupes participant au réglage de fréquence
-     : Réserve primaire répartie sur chaque groupe participant

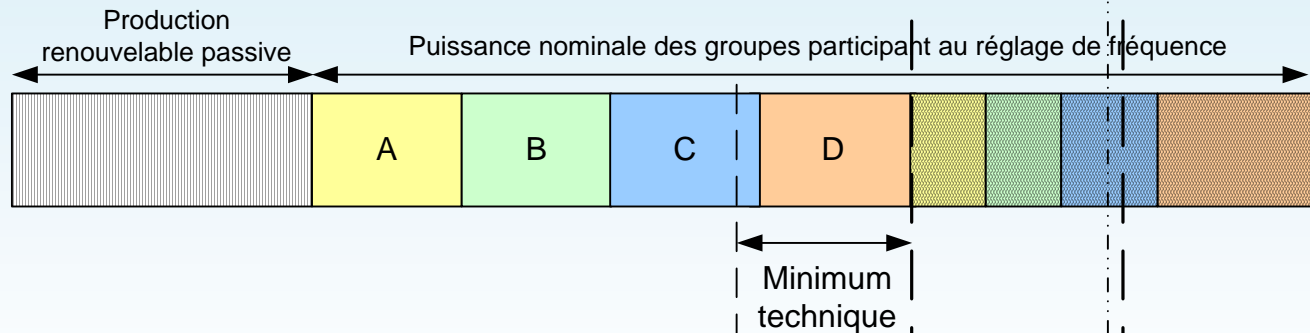
Taux de pénétration faible

(a) Situation actuelle

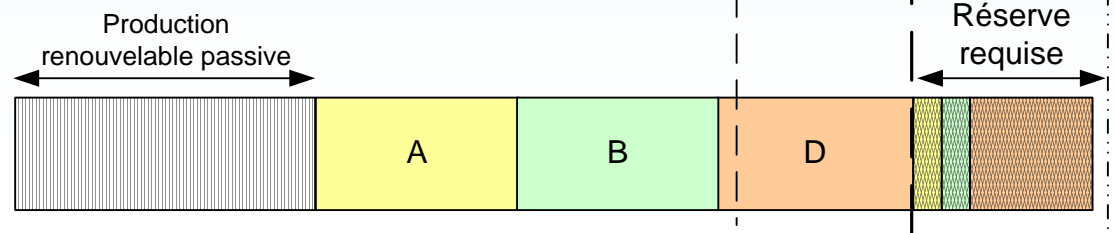


Taux de pénétration important

(b) Diminution de la production conventionnelle



(c) Déconnexion d'un groupe conventionnel



1.3. Impact dynamique sur l'inertie du système



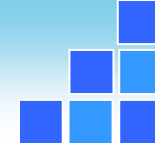
❖ Intégration des EnR fatales ne contribuant pas à l'inertie

- 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

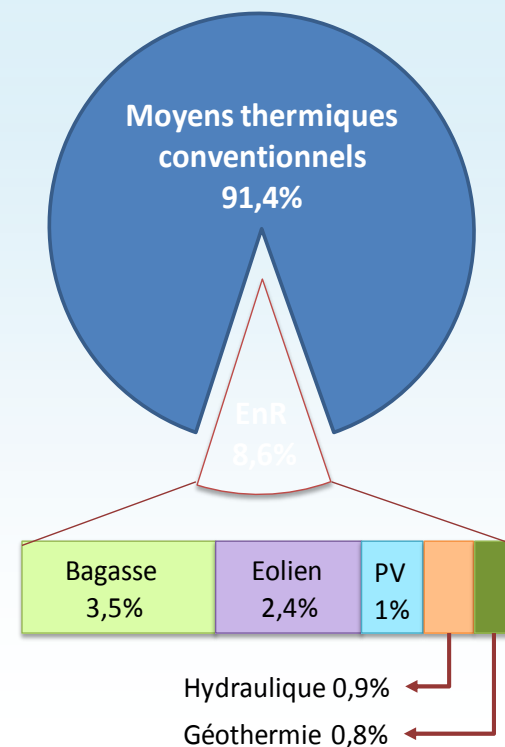
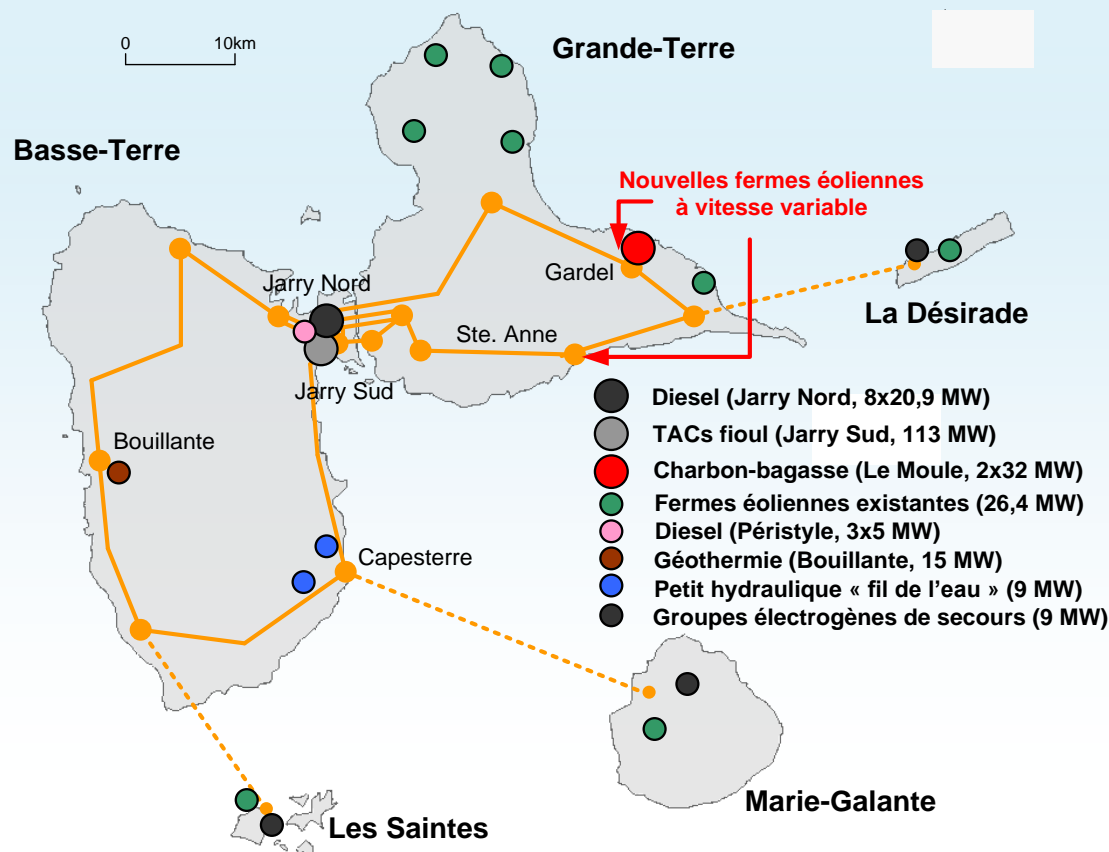
- Remplacement des alternateurs synchrones classiques en cas d'un fort taux de pénétration
 - ➔ **Baisse de l'inertie**
- Ecart de fréquence plus marqués en transitoire
 - ➔ **Risque plus important de délestage sur les réseaux insulaires**

1.4. Présentation de l'étude de cas

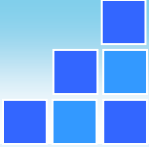


❖ Présentation du réseau de Guadeloupe (caractéristiques de 2010)

- 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



1.4. Présentation de l'étude de cas



❖ Description des scénarii simulés

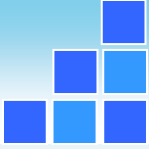
- Scénario de base : mis au point à partir de télémesures (11,7% de taux éolien)
- Incident dimensionnant : perte du plus gros groupe (21,3 MW) sur un creux de consommation (138,4 MW)
- A fort taux de pénétration : remplacement des groupes Diesel par les éoliennes futures

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

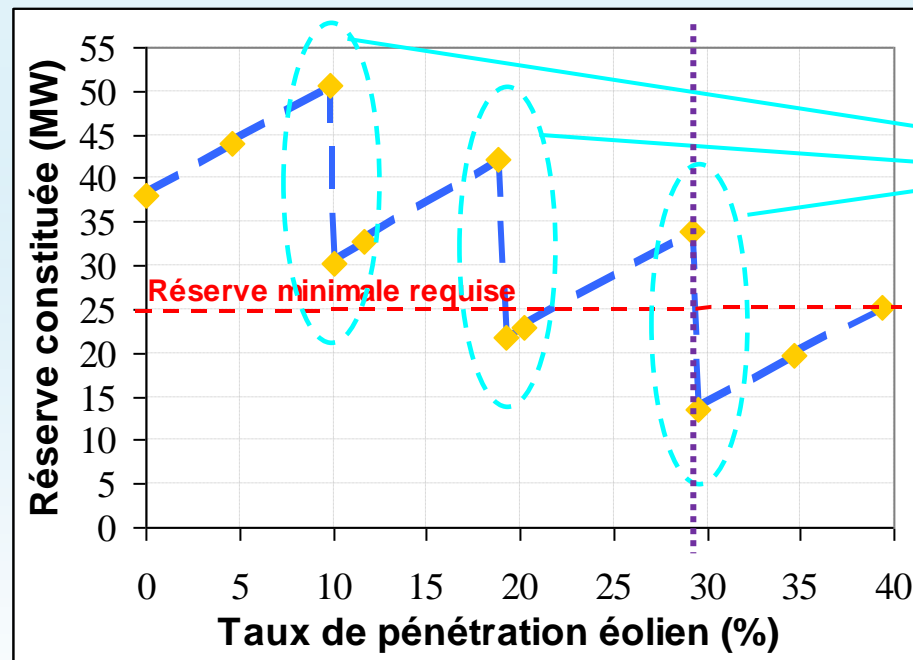
- Charges purement impédantes → choix pessimiste
- Vitesse du vent constante → variabilité faible à l'échelle de temps considérée

1.4. Présentation de l'étude de cas



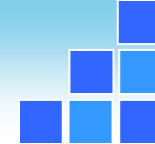
❖ Difficultés pour la constitution de la réserve minimale

- 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



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

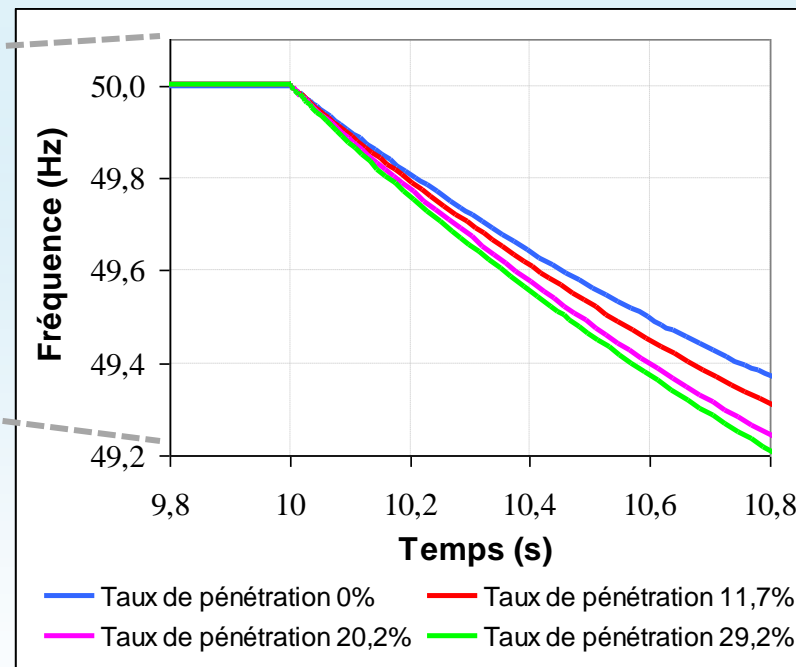
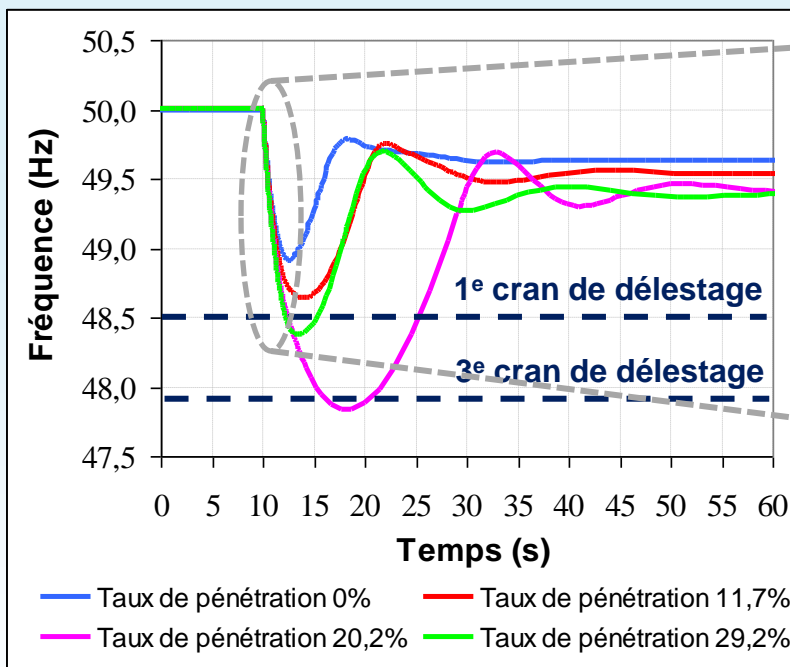
1.4. Présentation de l'étude de cas



❖ Contrainte dynamique due à la diminution de l'inertie

➤ 4 Points de fonctionnement simulés :

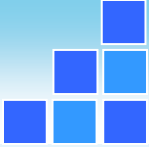
- ➔ Taux de pénétration de 0% (cas de référence)
- 11,7% (cas actuel)
- 20,2% (cas où la réserve est minimale)
- 29,2% (taux critique statique)



➤ Diminution de 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)**

1.5. 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 ?

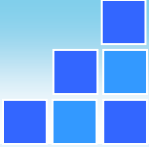
$$R_{min} = MAX(PCN_{max}, VAR_{15min}(EOL))$$

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

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

➔ Il faut caractériser la variabilité éolienne 15min

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



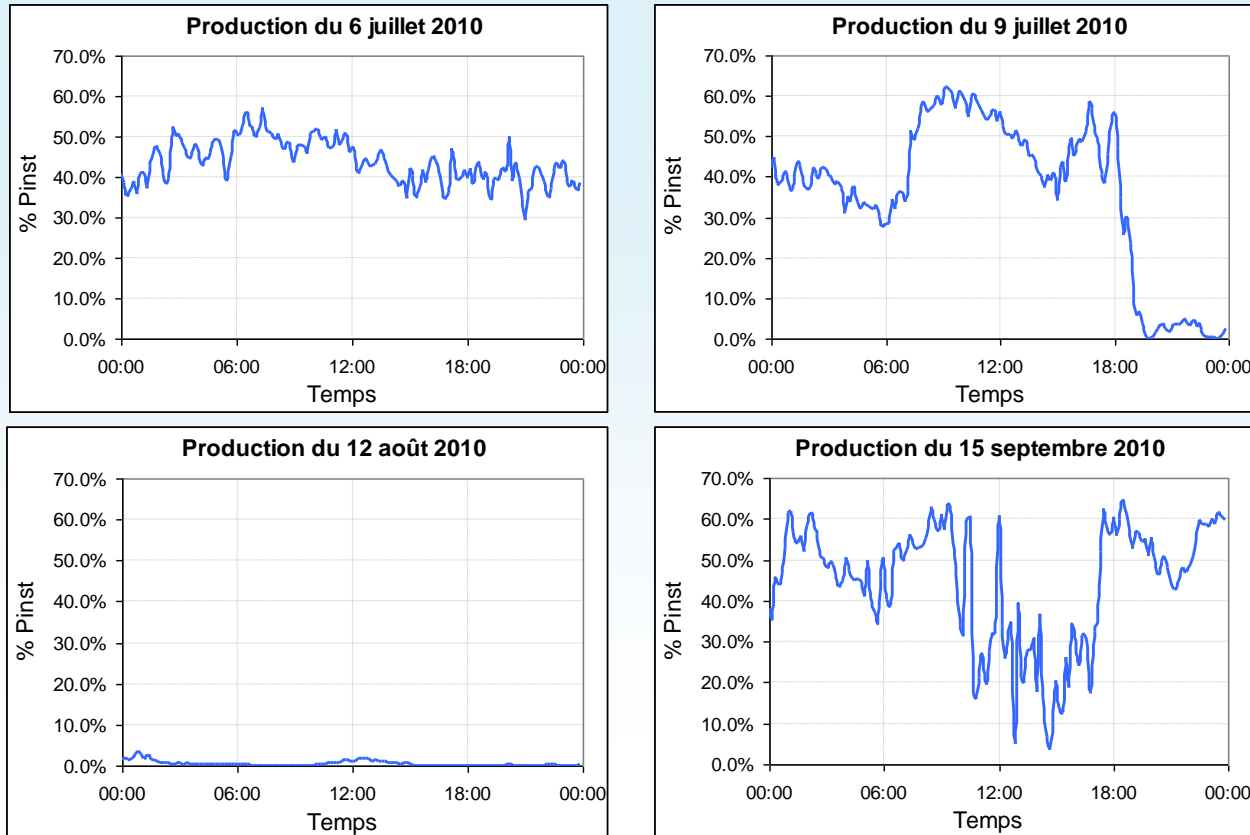
❖ Données disponibles sélectionnées

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

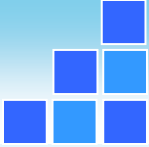
Données limitées

➔ dégager des tendances et définir des méthodologies

❖ Variabilité de la production éolienne globale

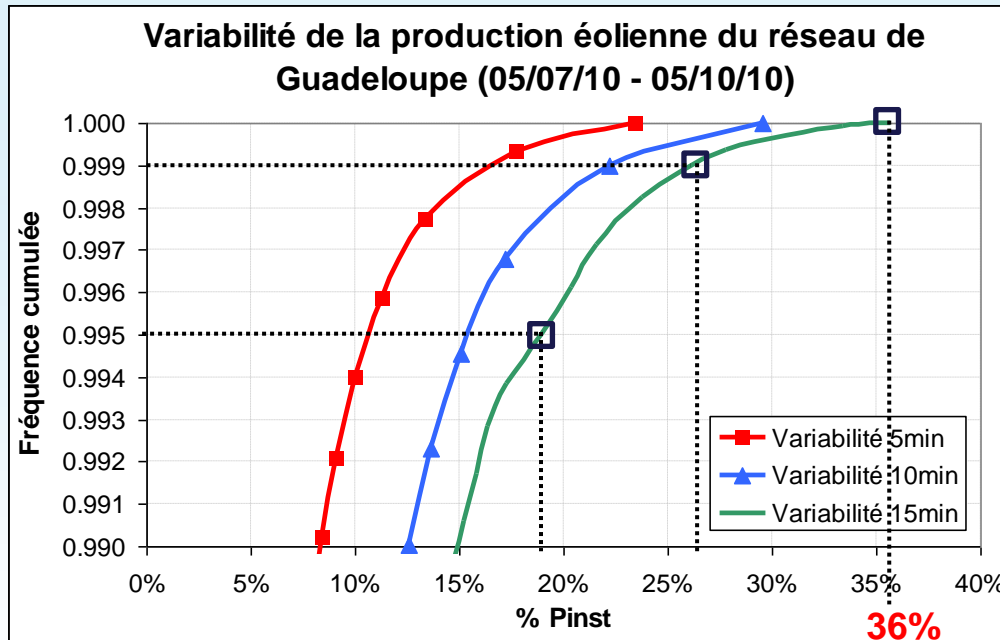


1.5. Impact de la variabilité éolienne sur le minimum requis de réserve primaire



❖ 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}

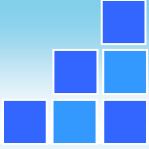


❖ Par convention :

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

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

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



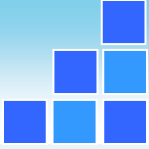
❖ Impact sur la réserve primaire minimale requise

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

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

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

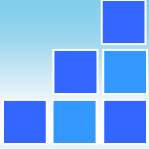
- Variation non négligeable de la production éolienne dans les 15 minutes après l'incident de la perte d'un groupe
 - ➔ aléa du type ni « N-1 » ni « N-2 »



2

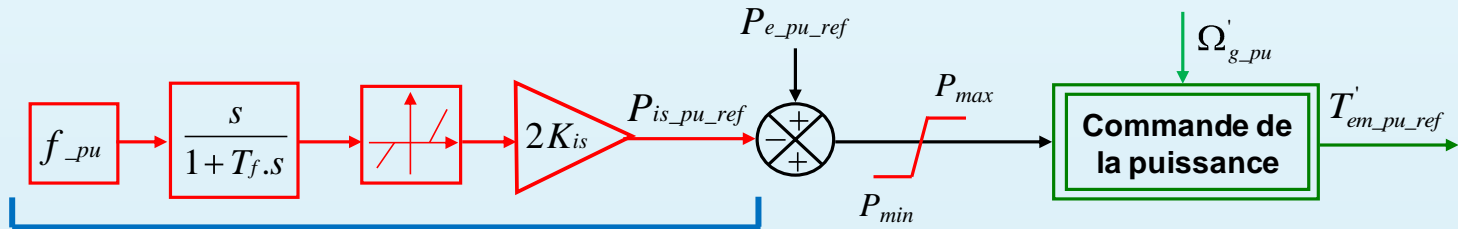
***Performances dynamiques des
réglages de fréquence des éoliennes***

2.1. Principe de l'inertie synthétique et problématiques



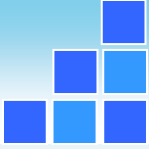
❖ Principe et travaux existants

- Rétablissement artificiel du lien « vitesse éolienne – fréquence »



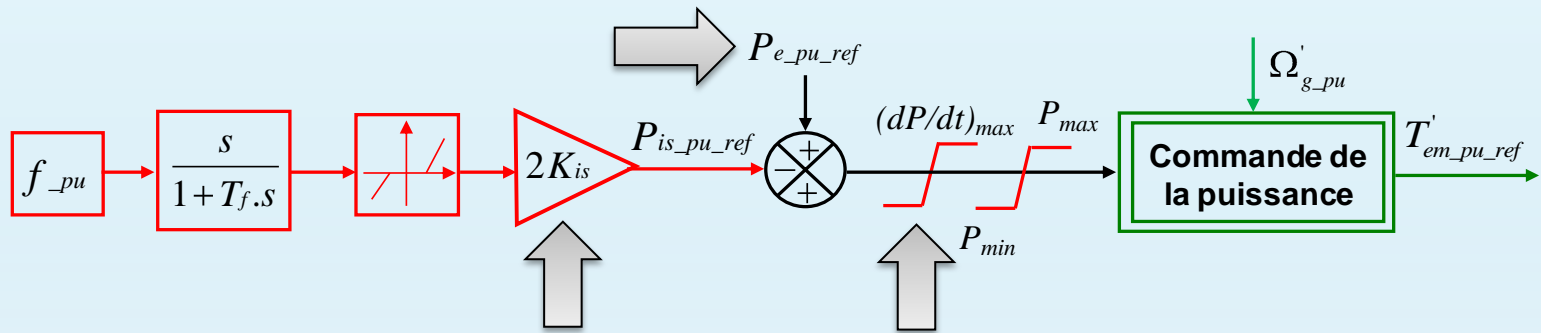
- Introduction d'une consigne de l'inertie synthétique $P_{is_pu_ref}$ proportionnelle à (df/dt)
- Fourniture de puissance additionnelle par extraction de l'énergie cinétique stockée
➔ pas besoin de dégrader la production éolienne
- Capacité de la fourniture de l'inertie synthétique prouvée
➔ facteurs impactant la performance ?

2.2. Implémentation d'une inertie synthétique



❖ Apports principaux des travaux de la thèse

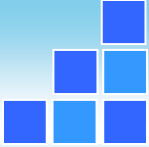
➤ Caractérisation approfondie de la performance dynamique de l'inertie synthétique



➤ Facteurs clés :

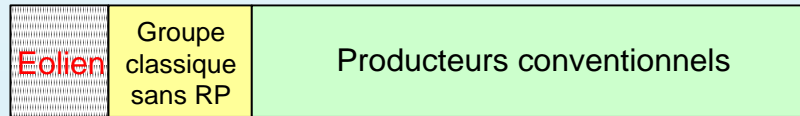
- ❑ Point de fonctionnement initial de la turbine éolienne
 - ➔ Impact sur le comportement dynamique de l'éolienne
- ❑ Gain du réglage inertiel $K_{is} \neq$ constante d'inertie de l'éolienne
 - ➔ Impact sur la quantité de puissance additionnelle injectée en cas d'incident
- ❑ Limitation de la variation temporelle de la puissance électrique $(dP/dt)_{max}$:
 $\leq 0,2-0,4$ p.u/s (donnée constructeur)
 - ➔ Impact sur la dynamique de la réponse inertielle

2.3. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique



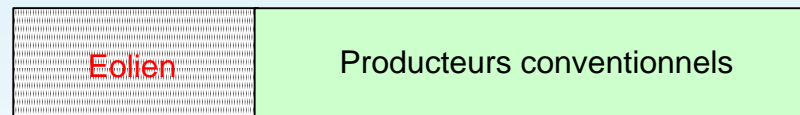
❖ Scénarii de simulation pour les études sur l'inertie synthétique

- 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%

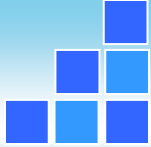
- Remplacement de ce groupe (25 MW) par les éoliennes futures pour une même puissance



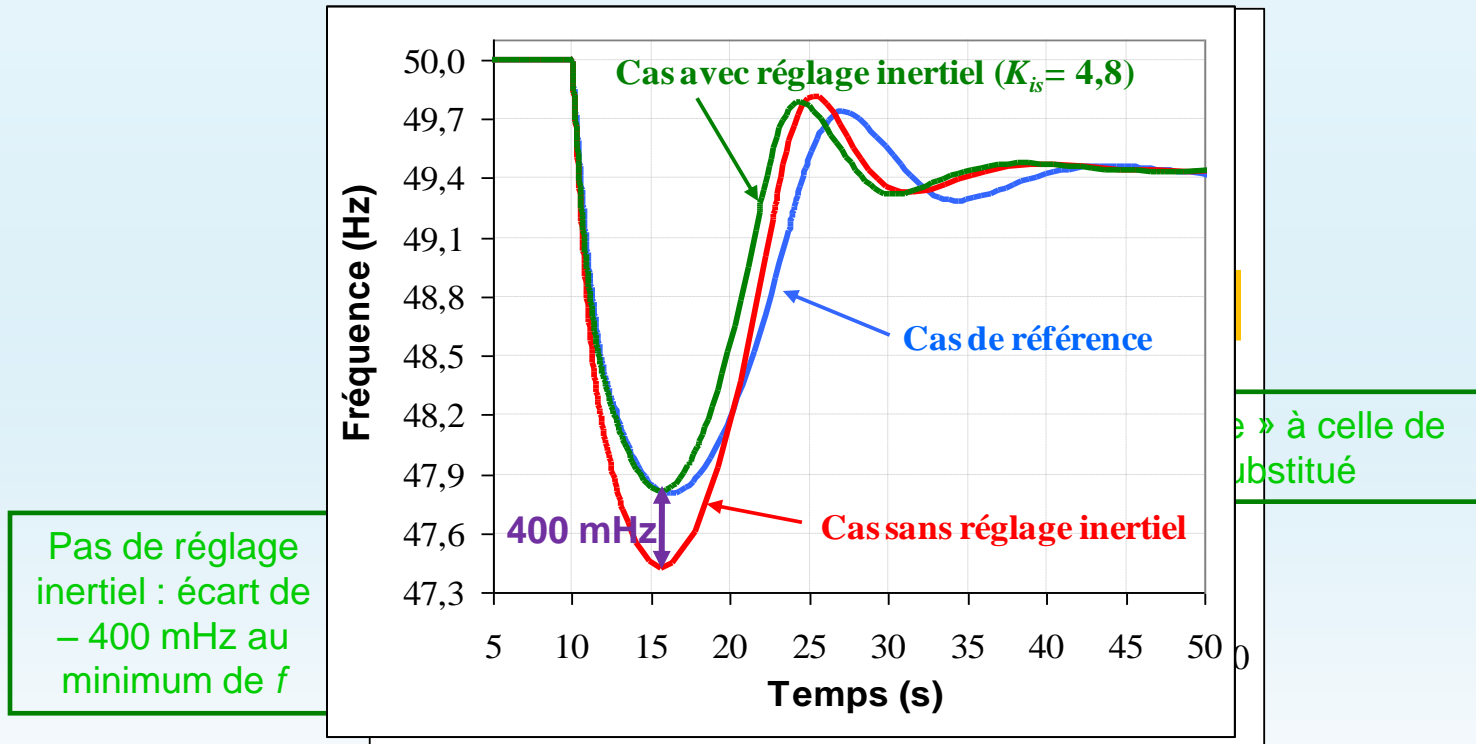
Cas éolien : taux éolien 29,5%

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

2.3. Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique



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



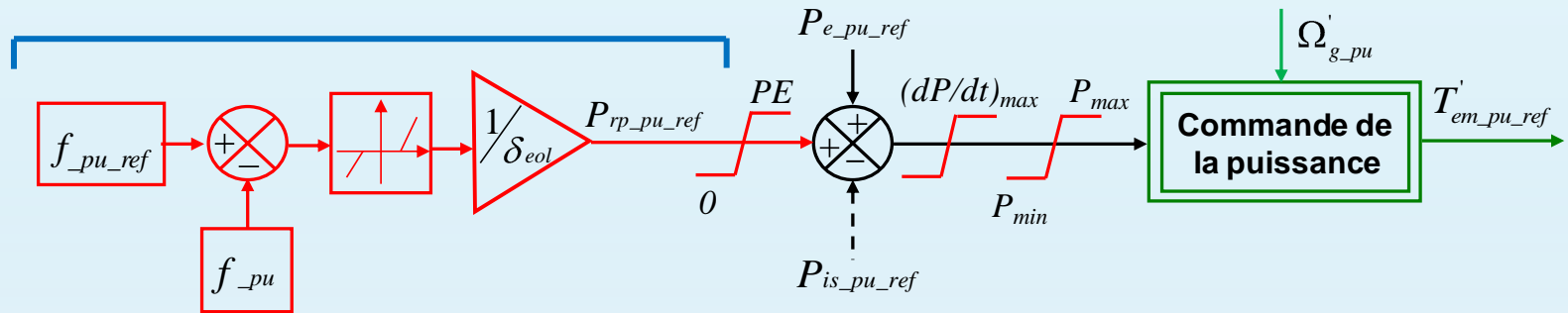
- Augmentation du gain du réglage K_{is}
 - ➔ réduction du creux de fréquence
- Effet de l'augmentation du gain moins évident avec des valeurs importantes de K_{is}
 - ➔ saturation de la limitation en P_{max} atteinte

2.4. Principe du réglage primaire et implantation



❖ Implantation du réglage primaire

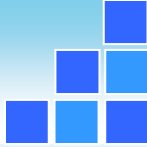
- Libération de la réserve selon un statisme comme les groupes conventionnels



❖ Différences par rapport à l'inertie synthétique

- Consigne du réglage primaire ($P_{rp_pu_ref}$) proportionnelle à la variation de fréquence
- Effacement de la production éolienne nécessaire

2.5. Analyse de la contribution dans un système électrique

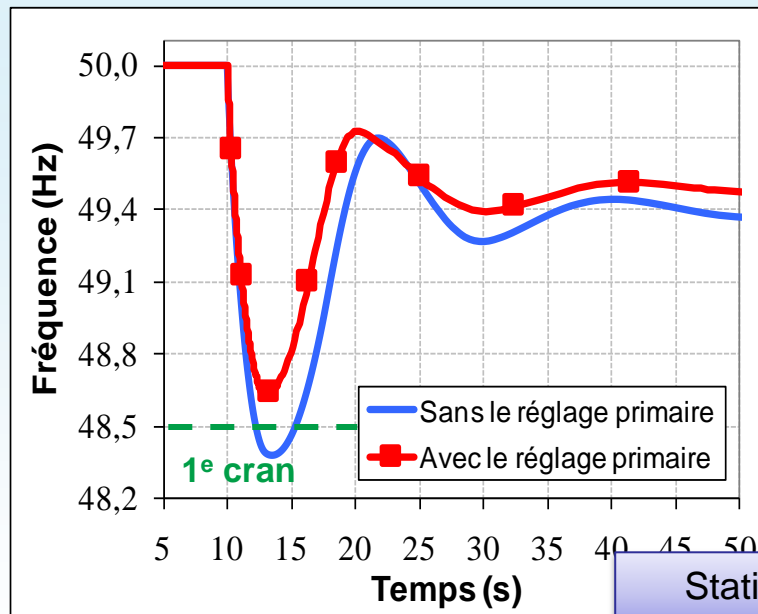


❖ Application au réseau de Guadeloupe

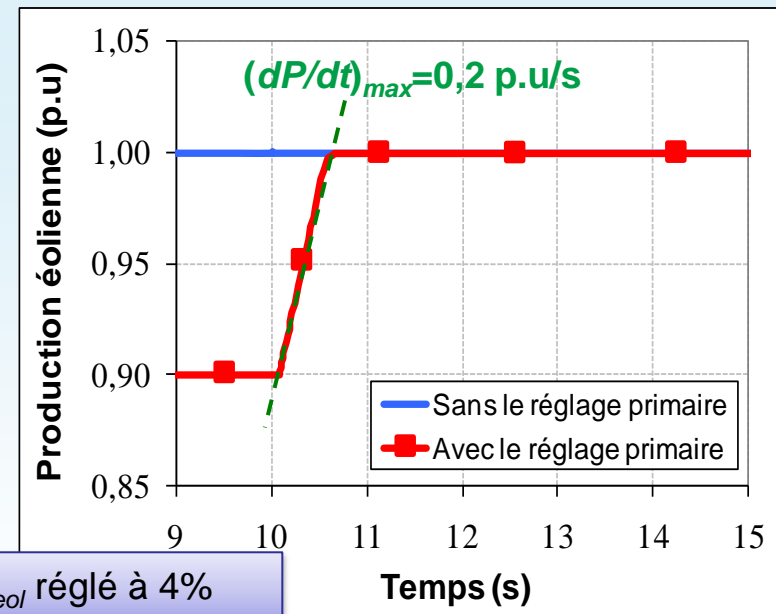
- Délestages constatés aux cas de 20,2% et 29,2% de taux de pénétration sans la participation des éoliennes
- Placement de réserve sur les éoliennes à vitesse variable

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



Statisme δ_{eol} réglé à 4%



- Un cran de délestage évité avec la participation des éoliennes

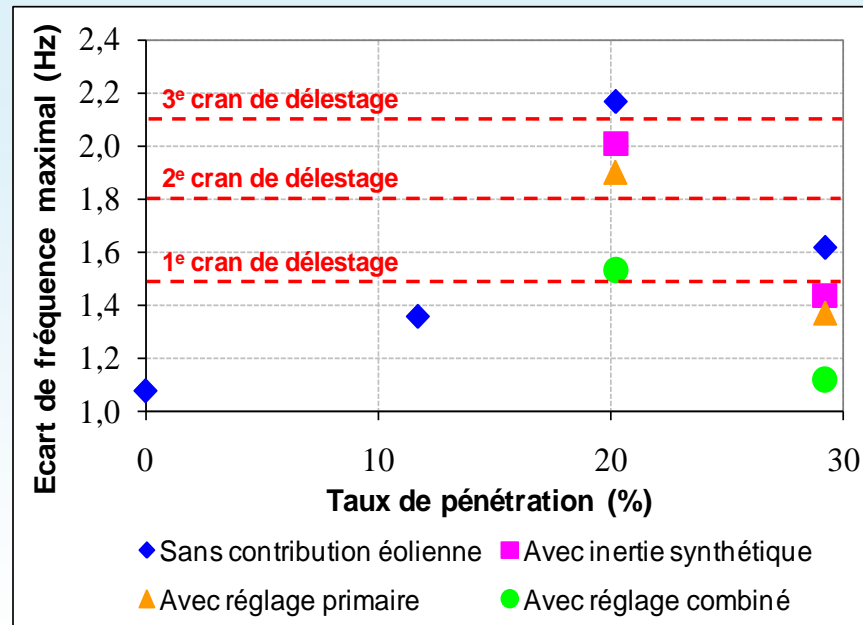
➔ dynamique très rapide de la libération de réserve (la totalité sous 1s)

2.5. Analyse de la contribution dans un système électrique

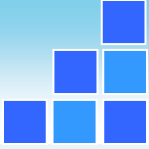


❖ Bilan des contributions et potentiel du réglage combiné

- 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 (application simultanée des deux réglages)



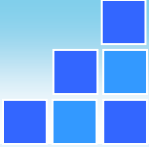
Fonctionnement en charge partielle



3

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

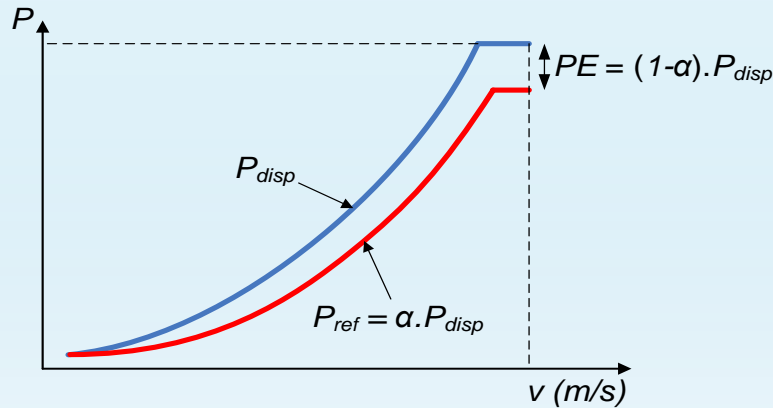
3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée



❖ Définition des stratégies de placement

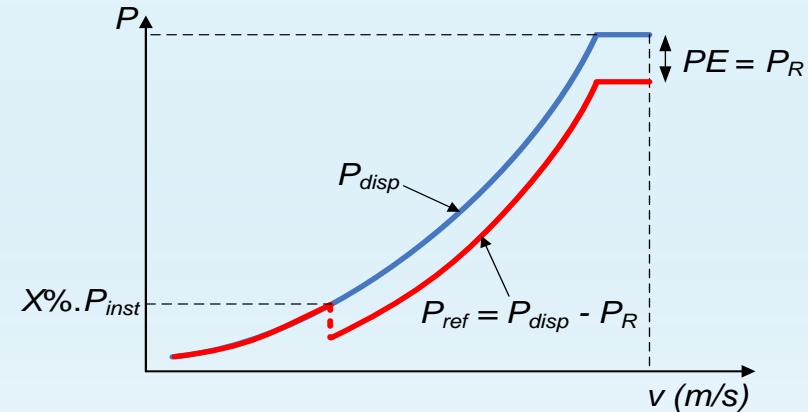
➤ Stratégie proportionnelle :

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



➤ Stratégie « bande constante » :

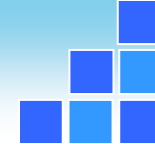
Affectation d'un volume constant de réserve en MW (P_R) à partir d'une certaine puissance ($X\% \cdot P_{inst}$)



➔ **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

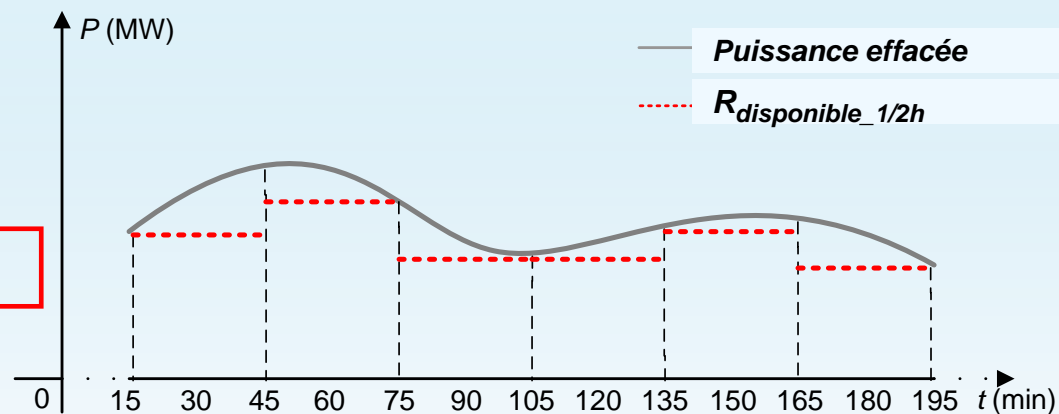


❖ Mesure de la réserve instantanée disponible pour le gestionnaire

- 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) :

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

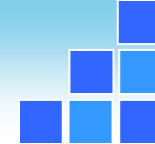


❖ Pour le producteur éolien

- Productible effacé \geq réserve instantanée disponible pendant le pas
 - ➔ 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

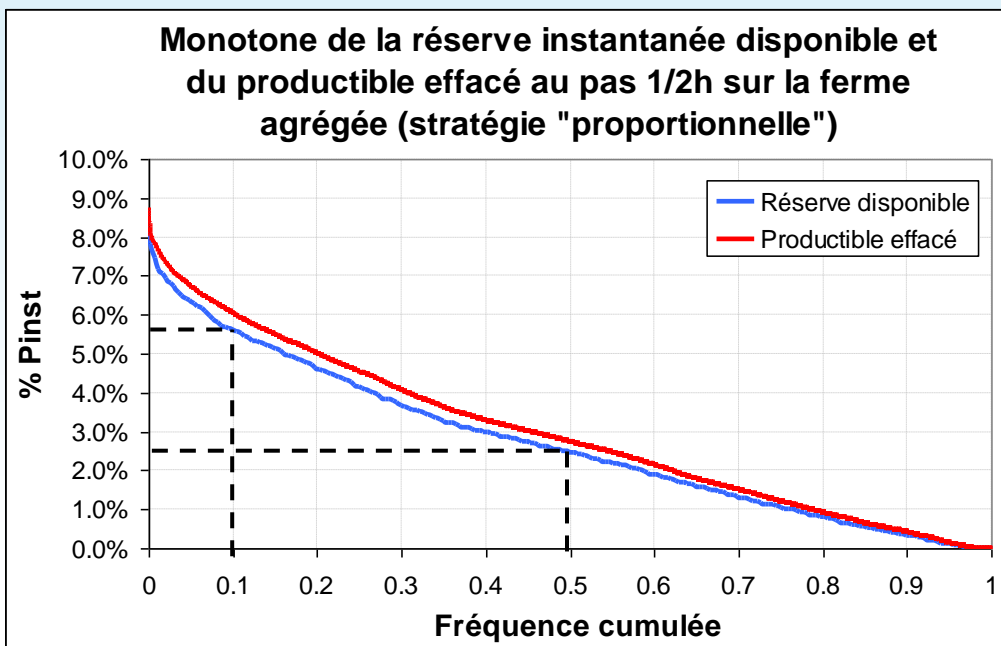


❖ Application aux fermes éoliennes sur le réseau de Guadeloupe

- 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 »

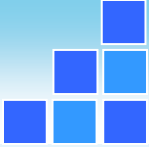
- Effacement de **10% du productible** et placement de la réserve **au pas 1/2h**



	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

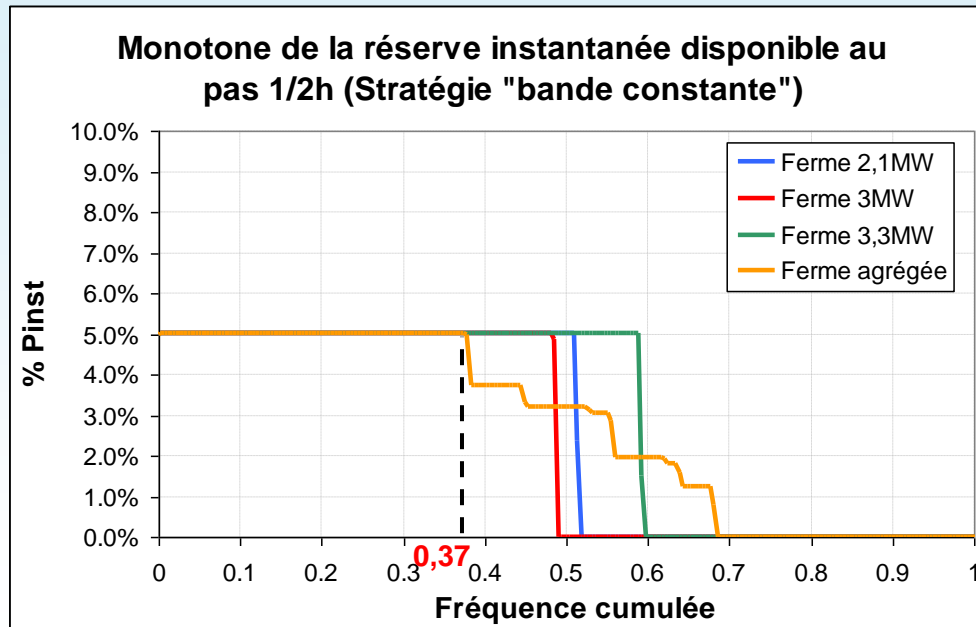
Potentiel de réserve instantanée intéressant !

3.1. Potentiel de placement de la réserve instantanée



❖ Application de la stratégie « bande constante »

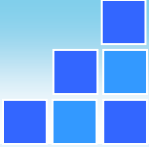
- Prélèvement d'un **volume constant égal à 5% de P_{inst}** quand la production est **supérieure ou égale à 0,2 p.u.**
 - ➔ production effacée sur la ferme agrégée : 542 MWh (« proportionnelle ») v.s. 539 MWh (« bande constante »)
- Réserve constituée au périmètre de 3 fermes agrégées :
 - ➔ nombre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



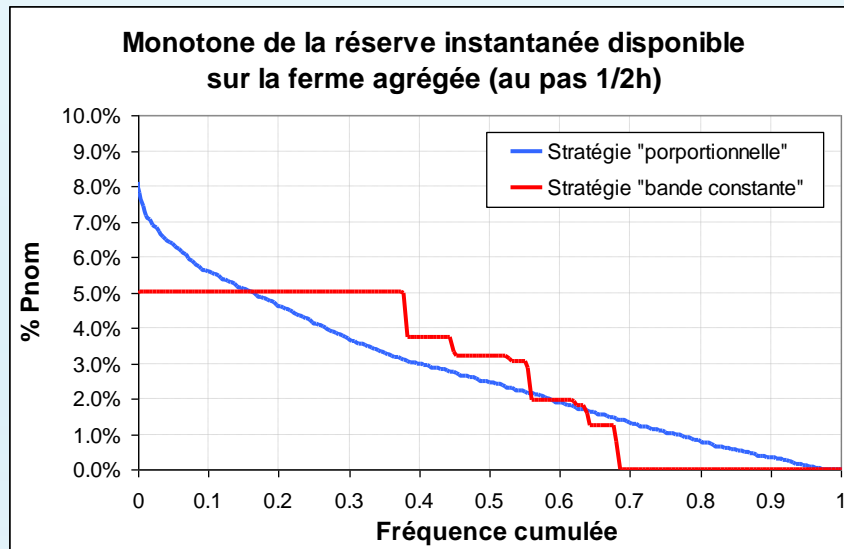
	Stratégie "bande constante"	
Fréquence cumulée	50%	37%
$R_{disponible_1/2h}$ (% P_{inst})	> 3,0%	5,0%
100 MW installé	> 3 MW	5 MW

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

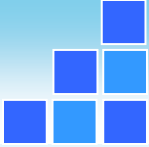
$R_{disponible_t}$: réserve disponible sur le pas

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 vitesse de vent ?**

3.3. 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 !

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

$PF(t)$: 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

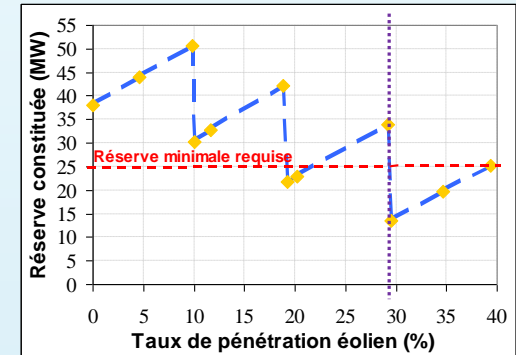
- Hypothèse simplificatrice : PF_c d'une seule ferme égale à PF_c du parc global de l'île

3.4. 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 $P_{inst_vf}=27$ MW
- Avec 50MW d'éoliennes à vitesse variable : $PF_c=52,7\%$
 Avec 70MW d'éoliennes à vitesse variable : $PF_c=41,8\%$



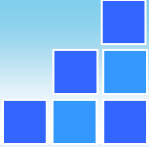
❖ Comparaison des deux stratégies en terme de volume de réserve

	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 !

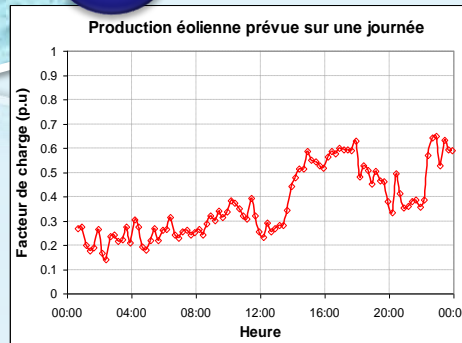
3.5. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve



❖ Méthodologie retenue pour le placement de la réserve

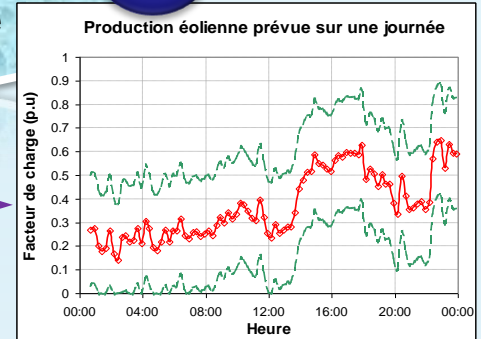
Prévision éolienne en J-1 ou infra-journalière

1



Estimation de l'intervalle de confiance

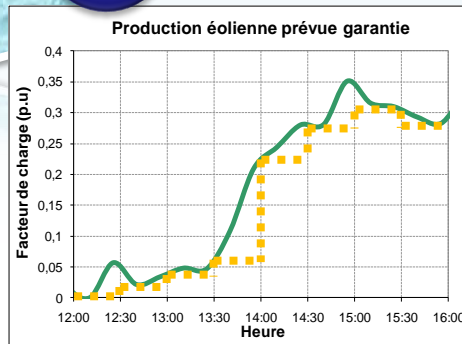
2



Prise en compte de l'erreur de prévision

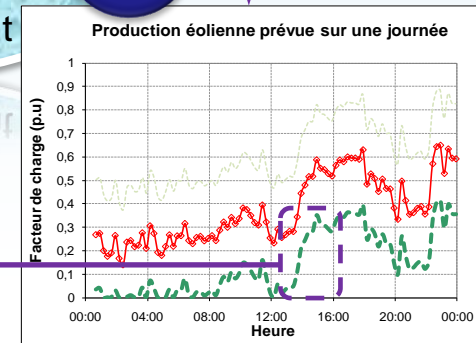
Prise en compte de la variabilité sur un pas de placement

4

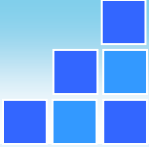


Prise en compte de la borne inférieure pour le placement

3

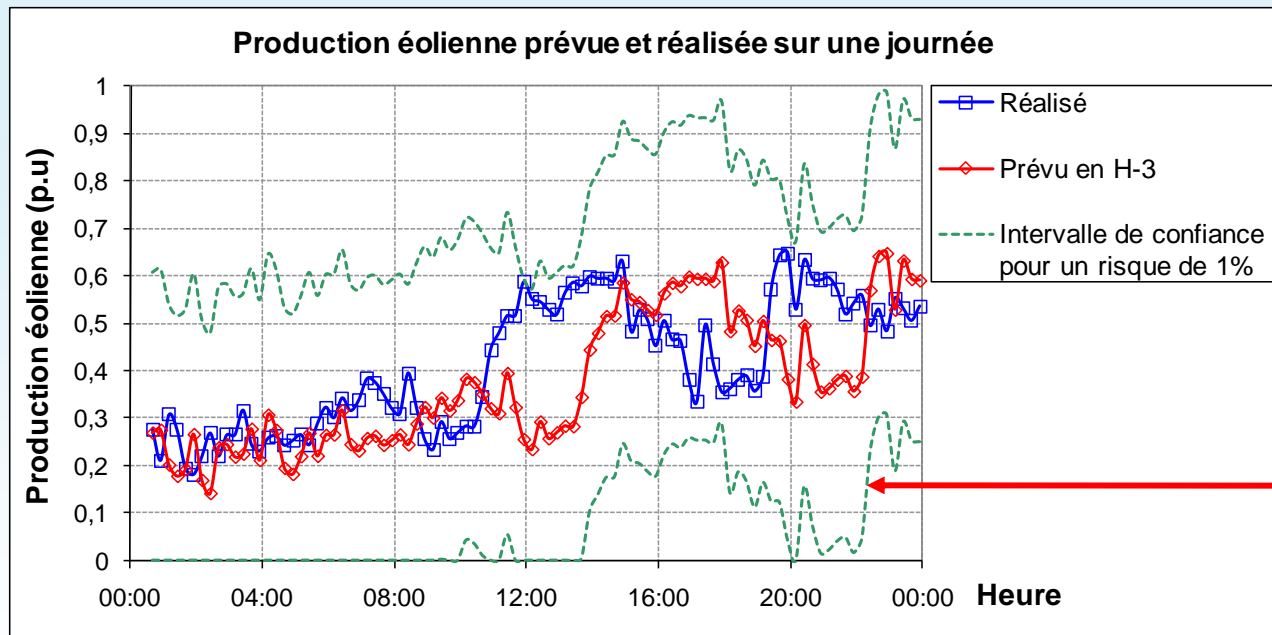


3.5. Prise en compte de l'erreur de prévision pour le placement de la réserve



❖ Prise en compte d'une prévision intrajournalière

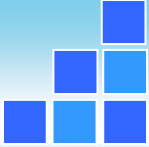
- Manque de donnée de la courbe de prévision J-1
 - ➔ étude de l'allocation de la réserve en H-3 et H-1
- Application de la méthode de prévision par persistance en caractérisant la variabilité éolienne 3h ou 1h
 - ➔ écart type de l'erreur de prévision très important



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

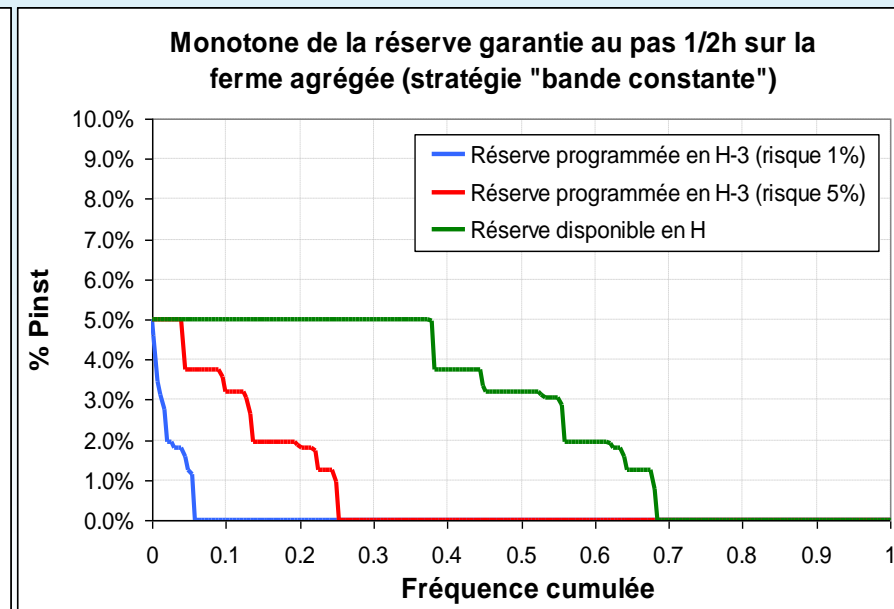
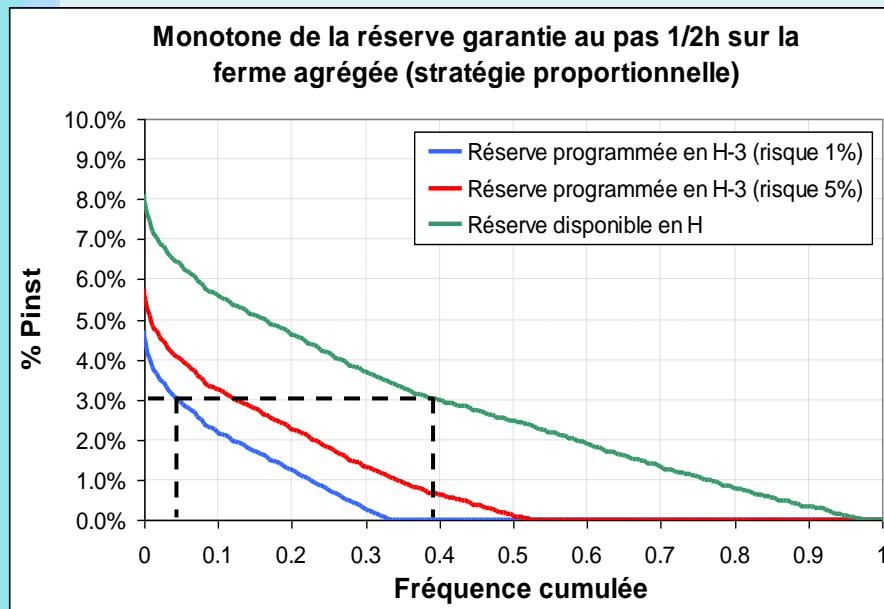
- Largeur de l'intervalle de confiance dépendante du critère de fiabilité retenu
- Intervalle de confiance à 1% permettant de couvrir 99% de l'aléa de prévision H-3

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



❖ Résultats et discussions

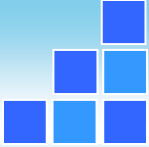
- Écart significatif du volume de réserve entre le prévu et le disponible
- Très peu de réserve garantie avant le temps réel H avec la stratégie « bande constante » :
 - ➔ nécessité de faire une prévision de production pour chaque ferme
 - ➔ erreurs plus grandes



	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%

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

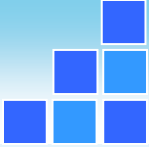


❖ Résultats et discussions

- 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%

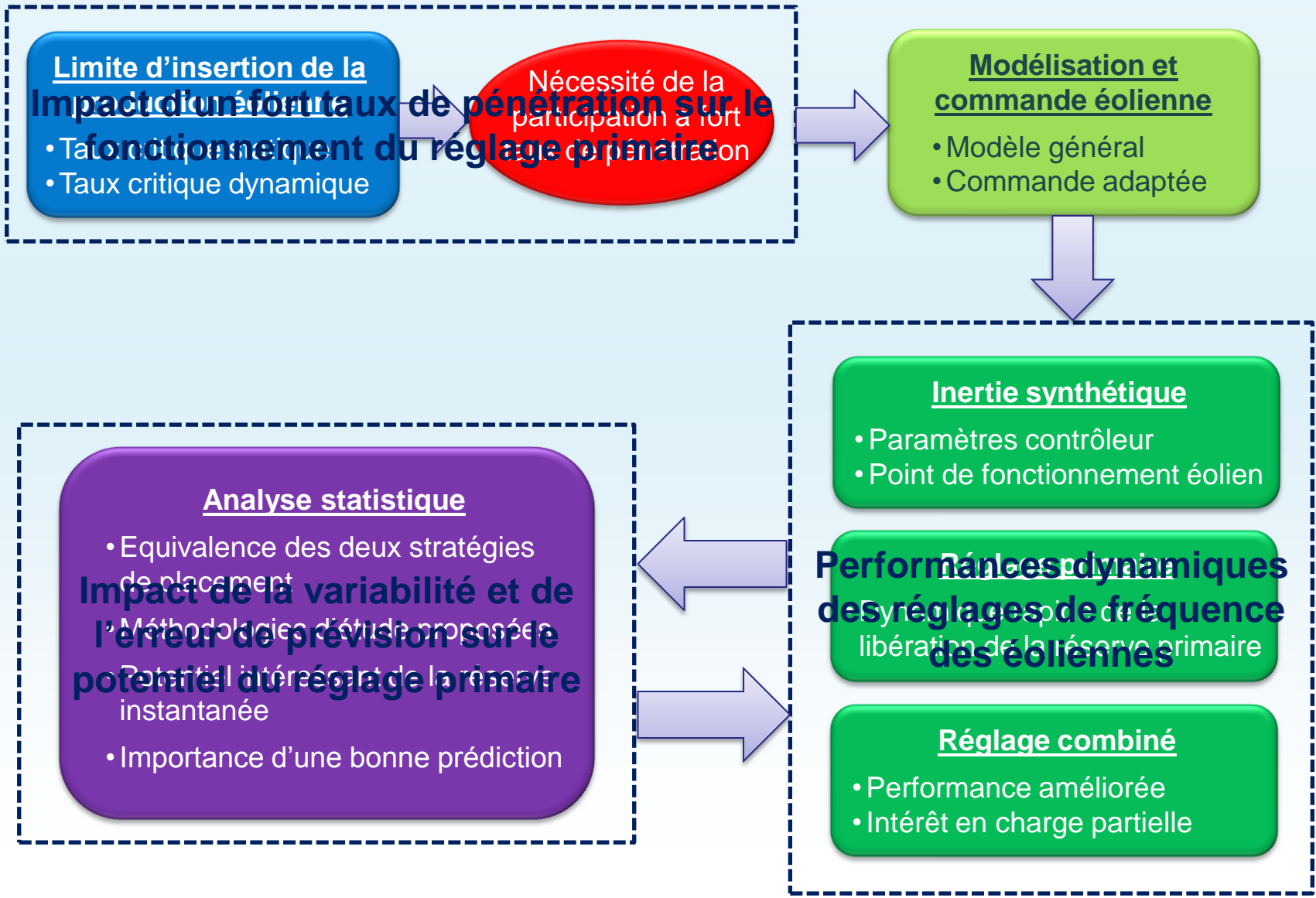
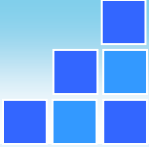
**Résultats obtenus basés sur une prévision par la méthode par persistance
➔ meilleure prévision envisageable en pratique !**



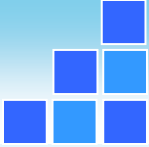
4

Conclusions & perspectives

4.1. Conclusion générale



4.2. Quelques perspectives de poursuite



❖ **Expérimentation sur la plateforme « Energies Réparties » du L2EP**

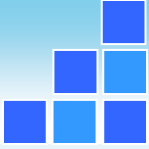
- Mise en œuvre expérimentale des réglages de fréquence des éoliennes sur un simulateur temps réel
 - ➔ extension de la validité des résultats
- Travail en cours en s'appuyant sur le travail d'un post-doc

❖ **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.)

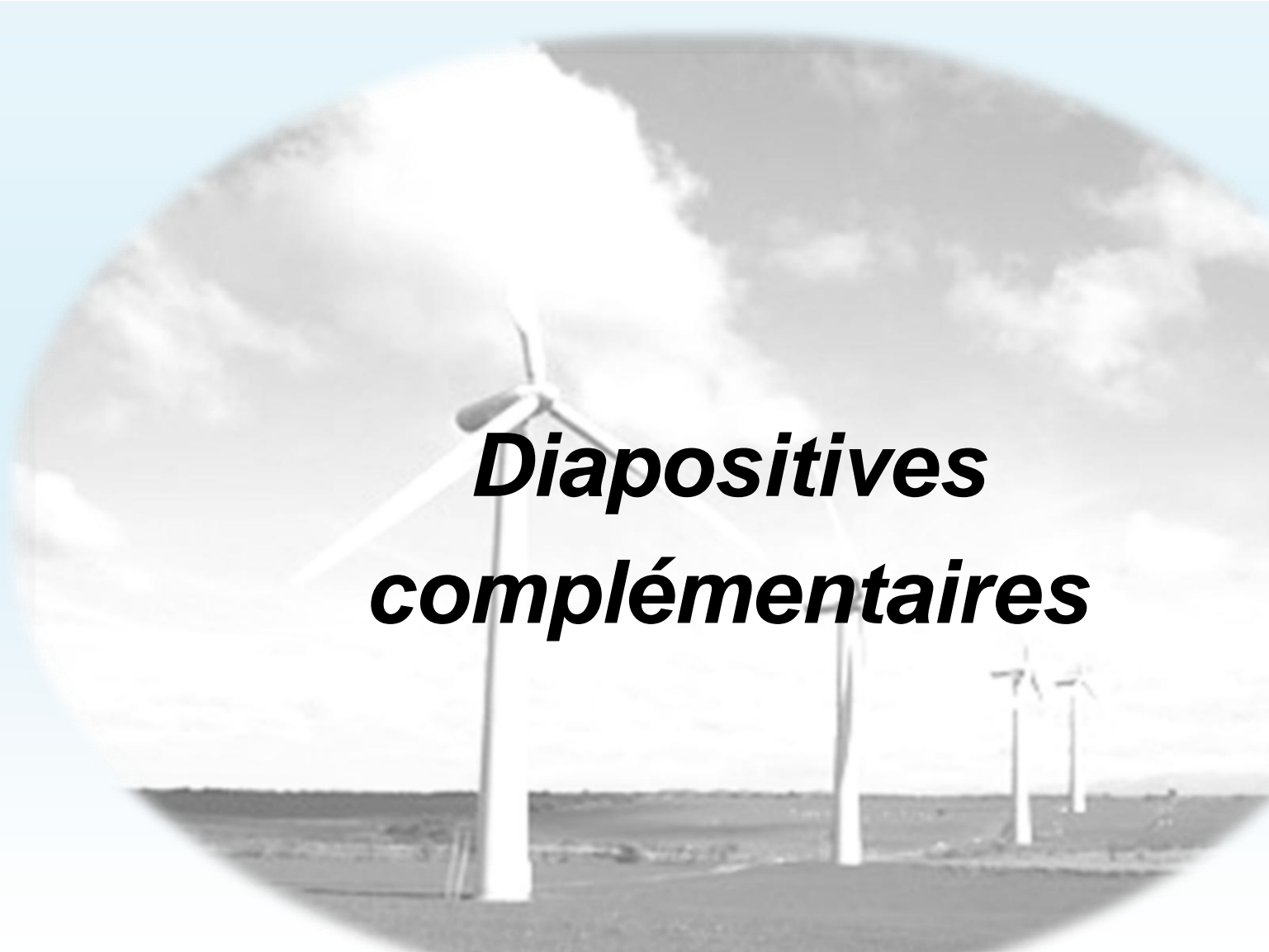
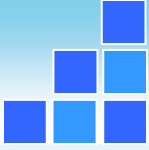
❖ **Couplage éolien / stockage**

- Perfectionnement du placement par réduction de l'erreur de prévision
- Possibilité de multiservices (fourniture de réserve, lissage de production, etc.)



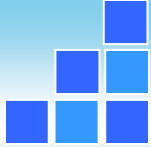
Merci de votre attention !



A circular inset image showing a wind farm with several white wind turbines on a flat, open landscape under a cloudy sky. The text is overlaid on this image.

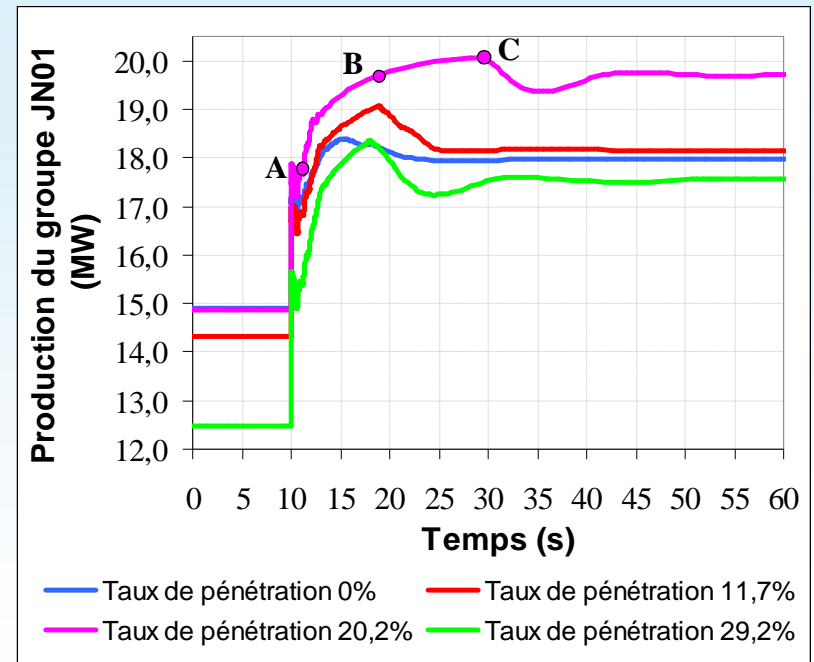
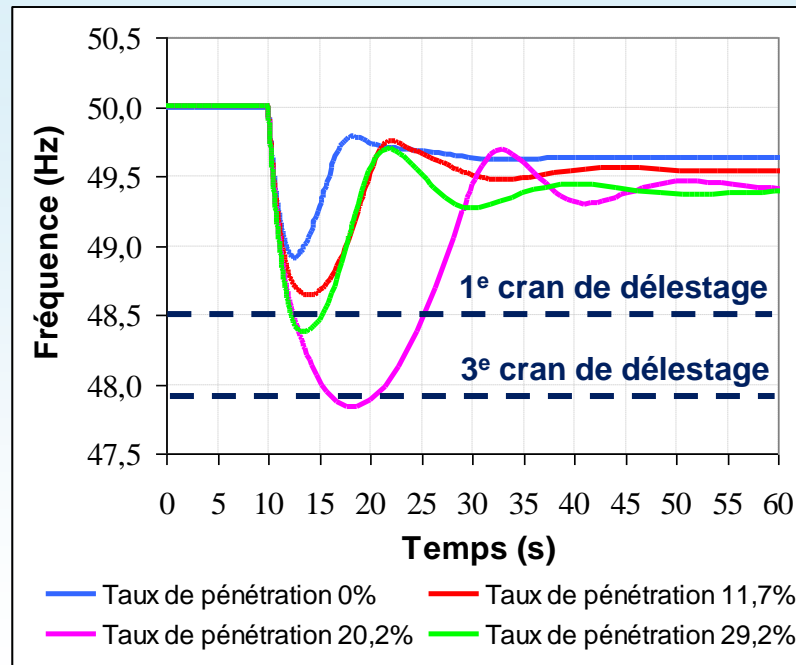
Diapositives complémentaires

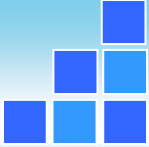
Cas particulier de 20% de taux de pénétration



❖ Problème lié à la non linéarité du système électrique

- Délestage au 3^e cran pour le taux de 20,2% et au 1^e cran pour le taux de 29,2%
- Cas particulier de 20% : réserve constituée minimale
 - ➔ Sollicitation plus forte des groupes à Jarry Nord
 - ➔ Dynamique de libération de la réserve plus lente (régulation non linéaire de la vitesse)





❖ Proportionnalité entre la variabilité maximale 15min et la puissance installée

$$\text{VAR}_{15\text{min}}(EOL) = k_{15\text{min}} \cdot P_{\text{inst}}$$

➤ $k_{15\text{min}} = 36\%$ (Guadeloupe) après l'analyse du relevé de production éolienne actuelle

➤ Dans le futur avec plus d'éoliennes installées

➔ $P_{\text{inst}} \uparrow$

➔ Effet de foisonnement plus marqué

➔ $k_{15\text{min}} \downarrow$

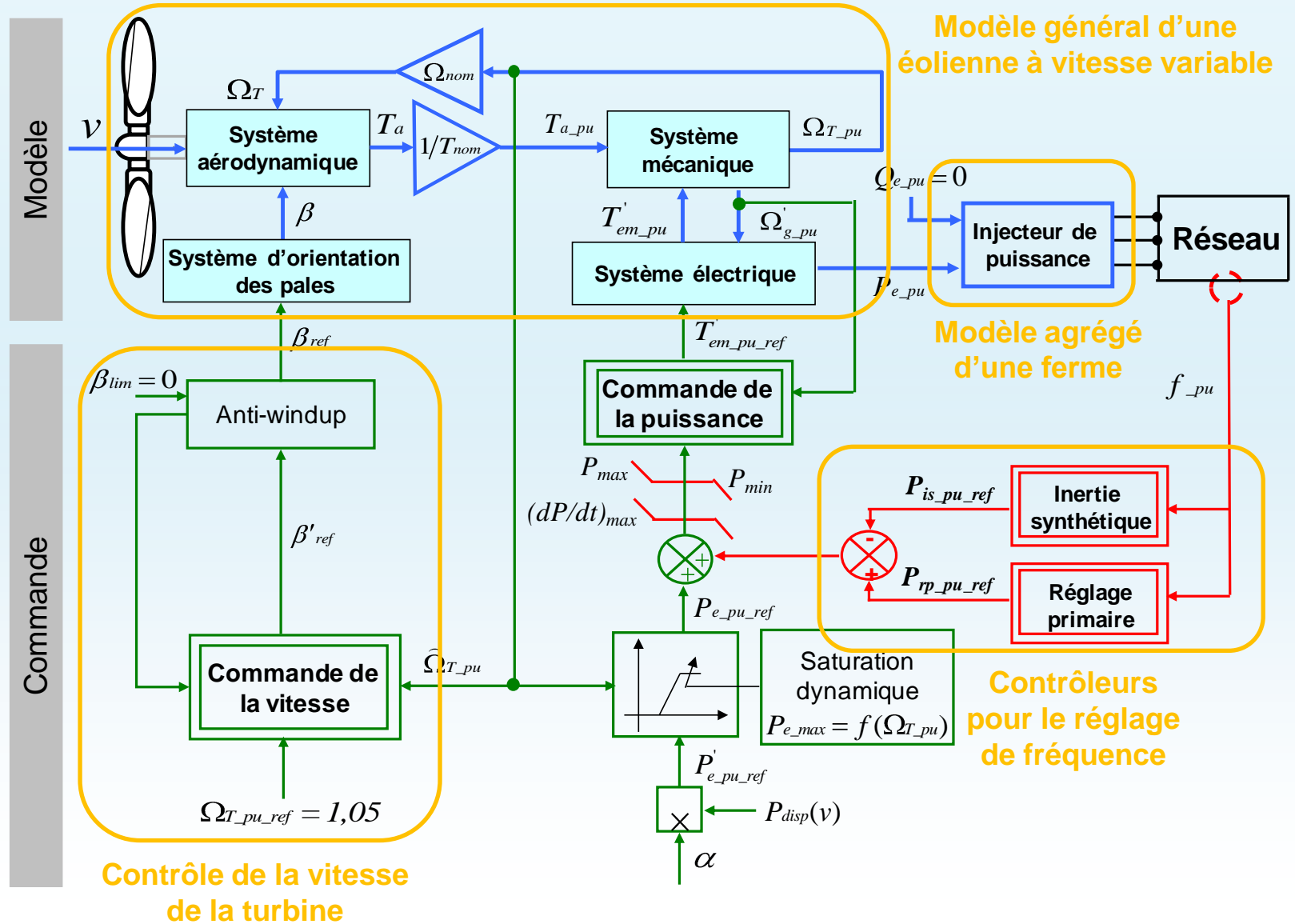
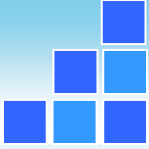
➤ Hypothèse retenue : $k_{15\text{min}} \approx \text{cte}$

➔ Fermes actuelles bien séparées en Guadeloupe

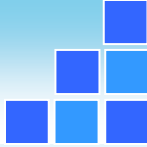
➔ Réseau insulaire dont la taille est limitée

➔ **Validité de l'hypothèse reste à vérifier**

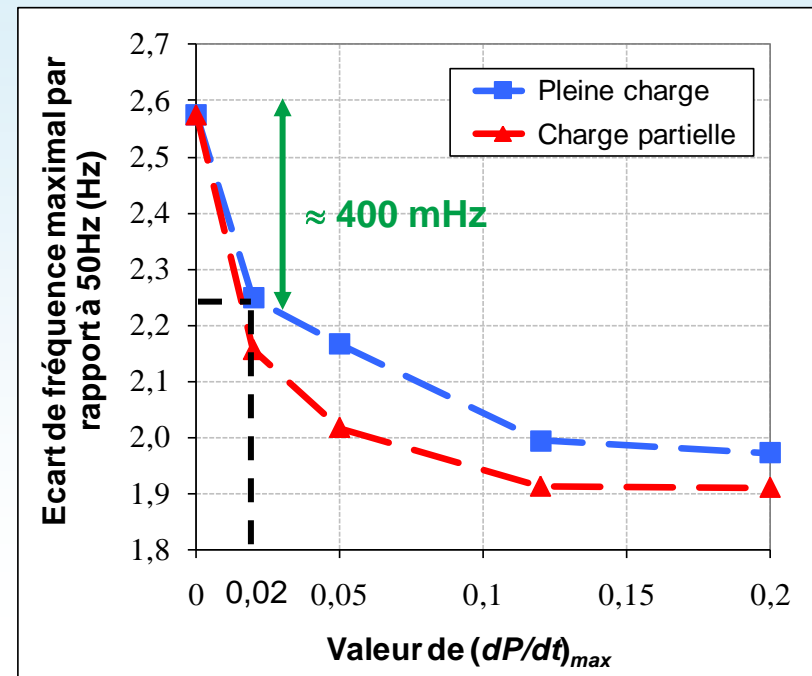
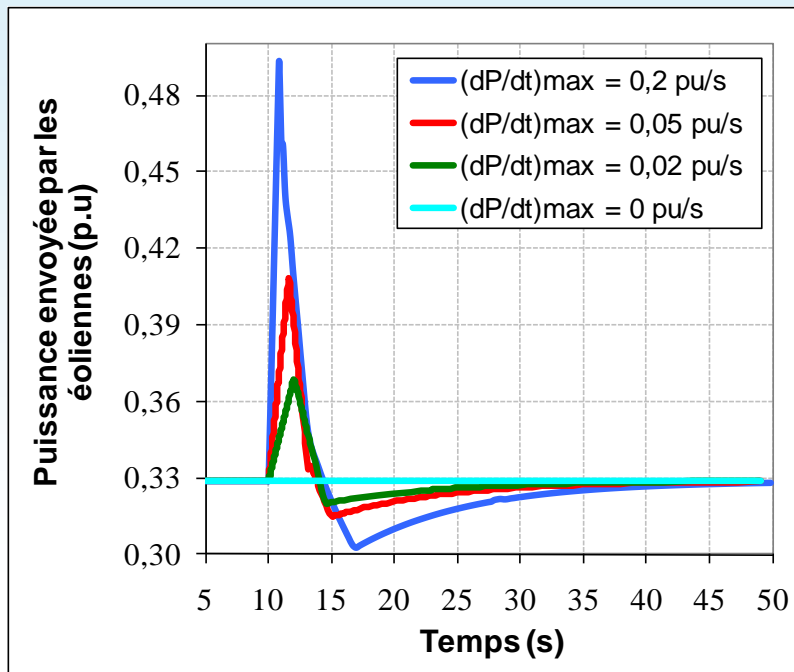
Modèle éolien et commande associée



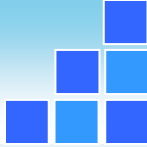
Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique



- ❖ Impact de la limitation de la variation temporelle de puissance $(dP/dt)_{max}$
 - Valeur du gain de réglage (K_{is}) fixée à 12
 - Réduction de la limitation $(dP/dt)_{max}$
 - ➔ moins de puissance envoyée au réseau
 - ➔ chute moins significative de la vitesse
 - ➔ réduction de la fatigue mécanique
 - Effet remarquable même avec une valeur très faible de la limitation (0,02 p.u/s)
 - Bénéfice non linéaire de l'augmentation de la limitation $(dP/dt)_{max}$
 - ➔ amélioration peu évidente à partir d'une certaine limite (0,12 p.u/s dans ce cas)

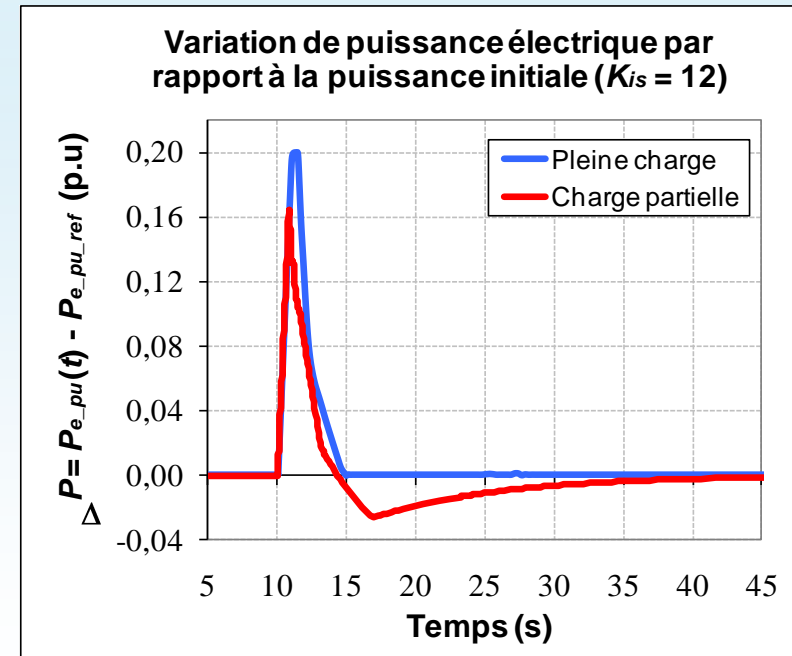
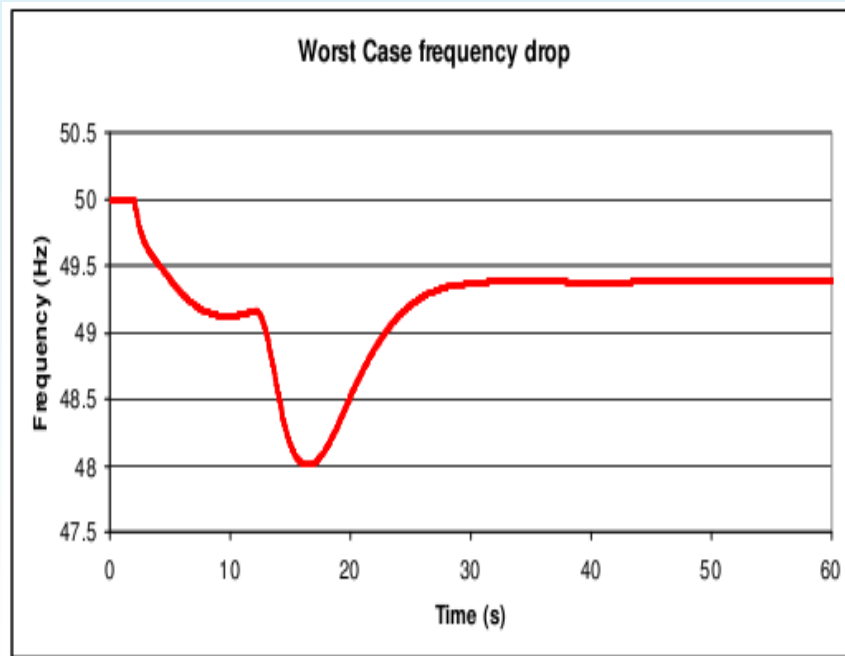


Impact de la période de restauration du point optimal



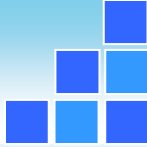
❖ Etudes de National Grid [JOH10]*

- Contribution à l'inertie synthétique des éoliennes fonctionnant en charge partielle
- Deuxième creux de fréquence engendré après l'incident dans le cas extrême
 - ➔ Puissance éolienne réduite de $25\%P_{eol}$ pendant la phase de restauration
- Phénomène non constaté dans le cadre de la thèse
 - ➔ Réduction de puissance moins brutale avec le réglage proposé



*[JOH10] A. Johnson, « Grid code frequency response working group requirements for system inertia », system technical performance, National Grid, 10 septembre 2010

Quelques précisions complémentaires sur le placement de réserve instantanée



❖ Comparaison des deux stratégies

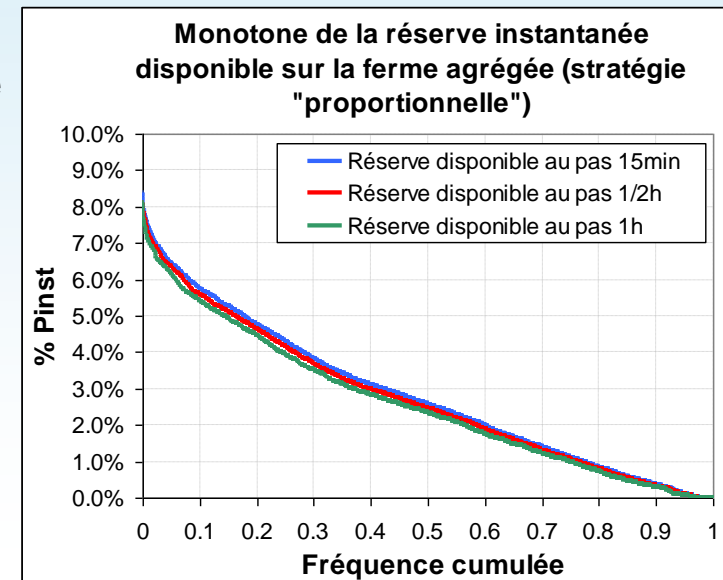
- Effet de foisonnement plus marqué avec la stratégie proportionnelle
→ meilleure efficacité à l'échelle du parc global

	Ferme 2,1MW	Ferme 3MW	Ferme 3,3MW	Ferme agrégée
$\eta_{proportionnelle}$	86%	85%	88%	91%
$\eta_{bande\ constante}$	90%	88%	91%	91%

❖ Impact du pas de temps

- Impact limité du pas de temps sur le volume disponible → possibilité de programmer la réserve sur des pas de temps plus longs que 30 min
- Efficacité du placement réduit sur un pas de temps plus long

Pas de temps (ferme agrégée)	15min	1/2h	1h
$\eta_{proportionnelle}$	95%	91%	87%
$\eta_{bande\ constante}$	95%	91%	86%

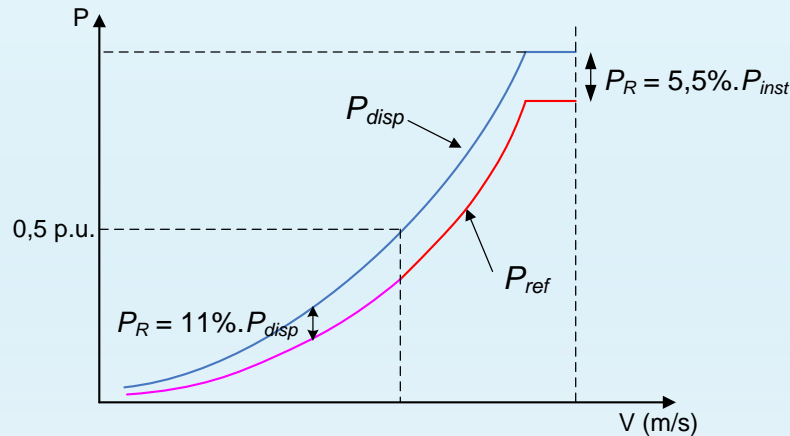


Principe et intérêts de la combinaison des stratégies de placement de réserve



❖ Principe de fonctionnement

- Application de la stratégie « bande constante » à forte vitesse du vent et de la stratégie « proportionnelle » quand la production est relativement faible



- ➔ Production effacée quasi identique par rapport aux cas où une seule stratégie est appliquée
- ➔ Base de comparaison

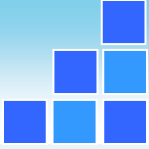
❖ Intérêts par rapport aux stratégies « proportionnelle » et « bande constante »

- Continuité de la production
- Foisonnement de la réserve
- Meilleure efficacité du placement

➔ **Tendance d'amélioration constatée avec la stratégie « combinée »**

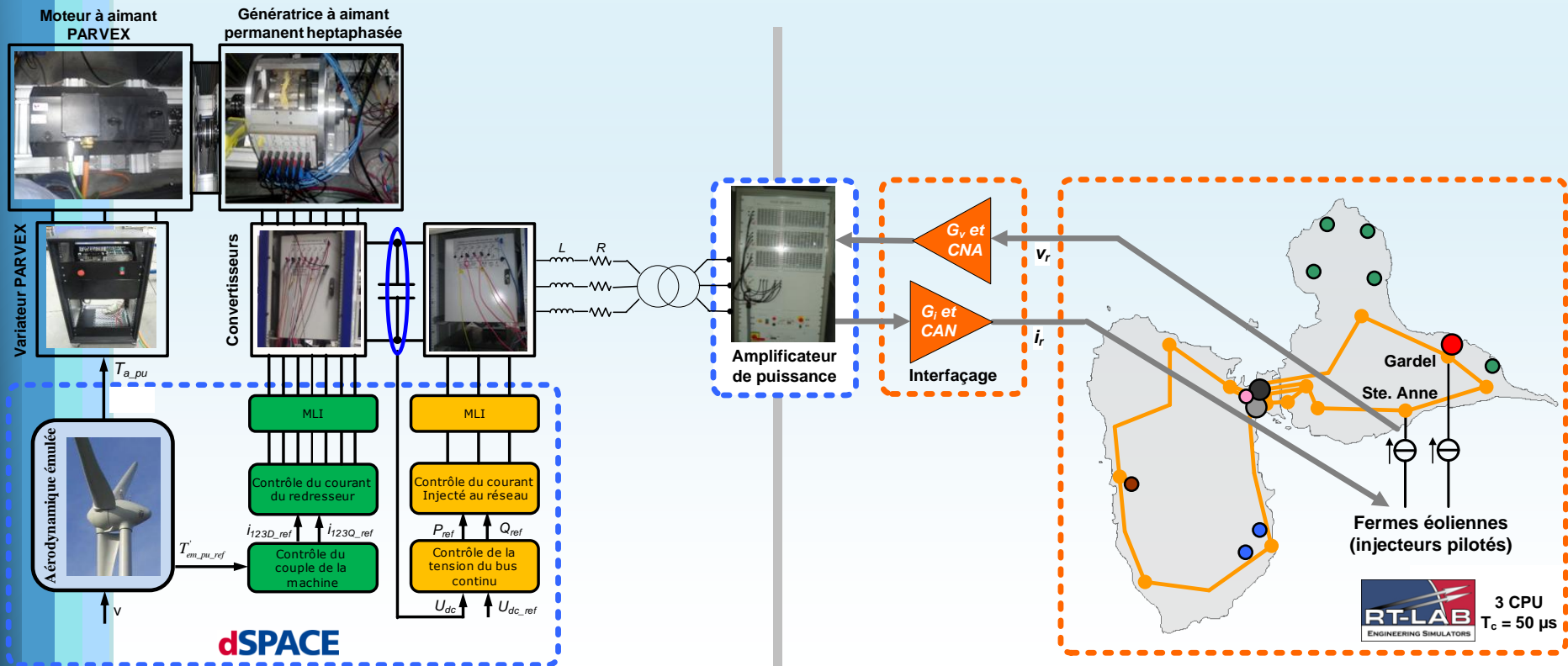
	Production effacée	Volume de réserve moyenne	Efficacité
Stratégie "proportionnelle"	542 MWh	$2,7\% \cdot P_{inst}$	91%
Stratégie "bande constante"	539 MWh	$2,7\% \cdot P_{inst}$	91%
Stratégie "combinée"	535 MWh	$2,75\% \cdot P_{inst}$	93%

Banc expérimental



❖ Expérimentation sur la plateforme temps réel du L2EP

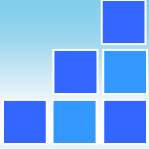
- Emulateur éolien construit à l'aide des machines synchrones heptaphasées (partie aérodynamique simulée sur une carte dSPACE)
- Réseau de Guadeloupe simulé en temps réel (interfacé à l'émulateur éolien via un amplificateur de puissance)



Partie analogique – émulateur éolien

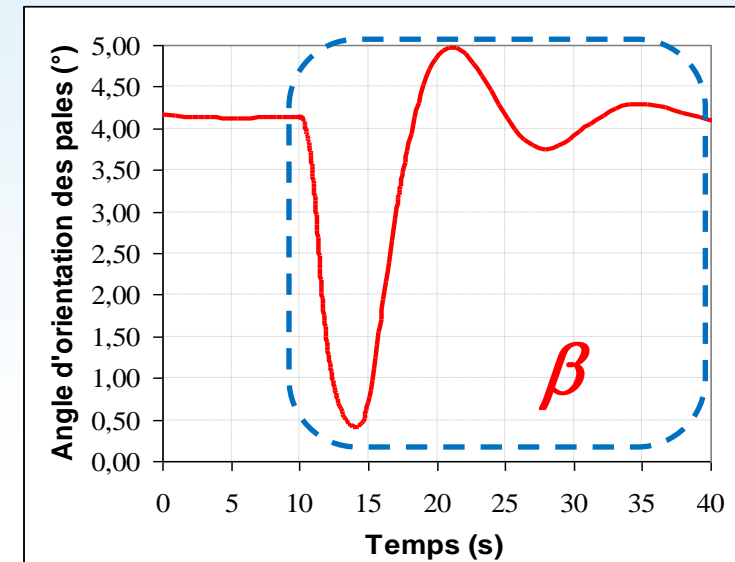
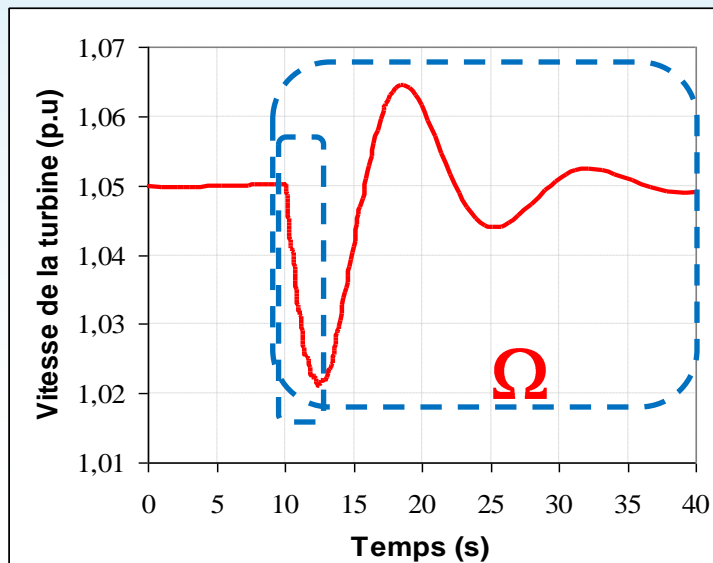
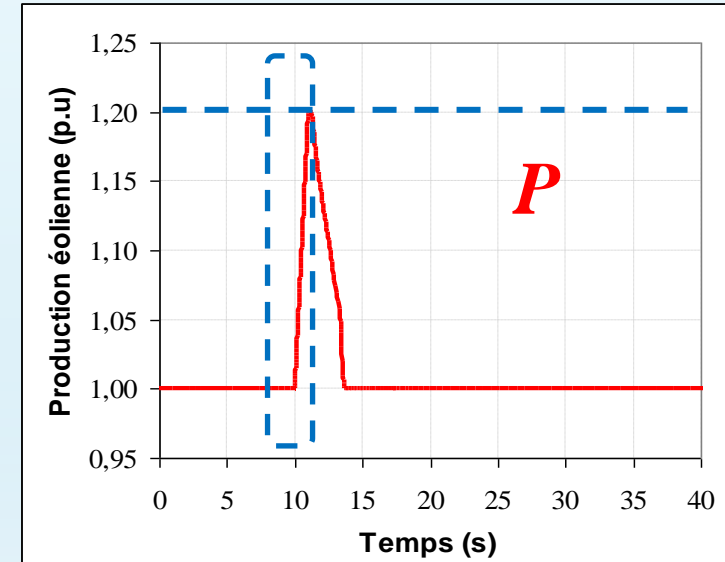
Simulateur numérique temps réel – modèle de la Guadeloupe

Impact du point de fonctionnement initial des éoliennes

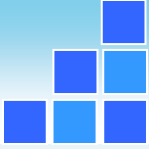


❖ Comportement de l'éolienne fonctionnant à pleine charge (P_{nom})

- 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

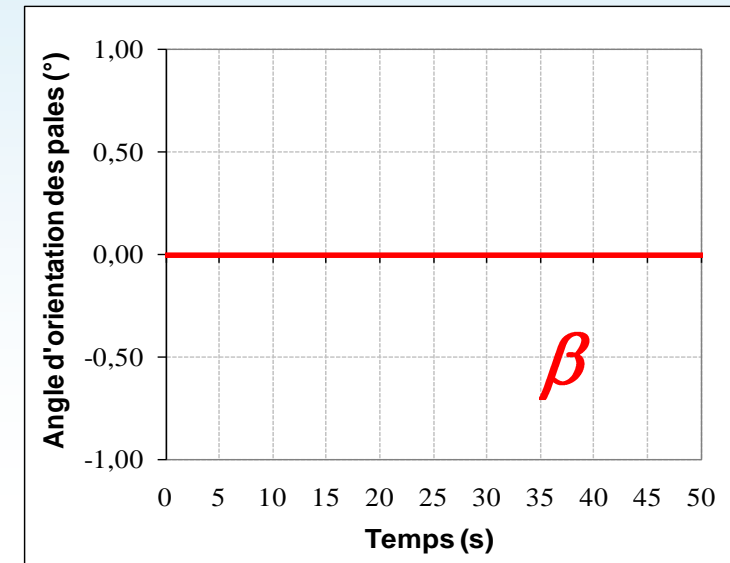
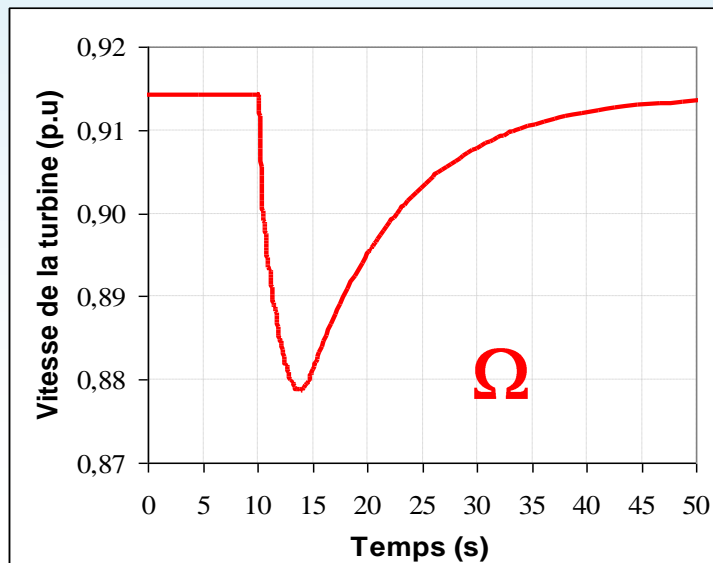
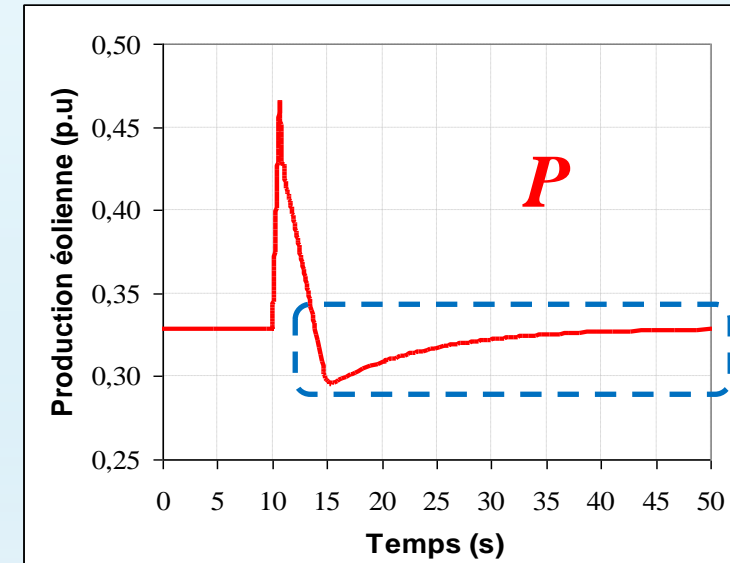


Impact du point de fonctionnement initial des éoliennes

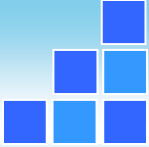


❖ Comportement de l'éolienne fonctionnant en charge partielle ($< P_{nom}$)

- 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

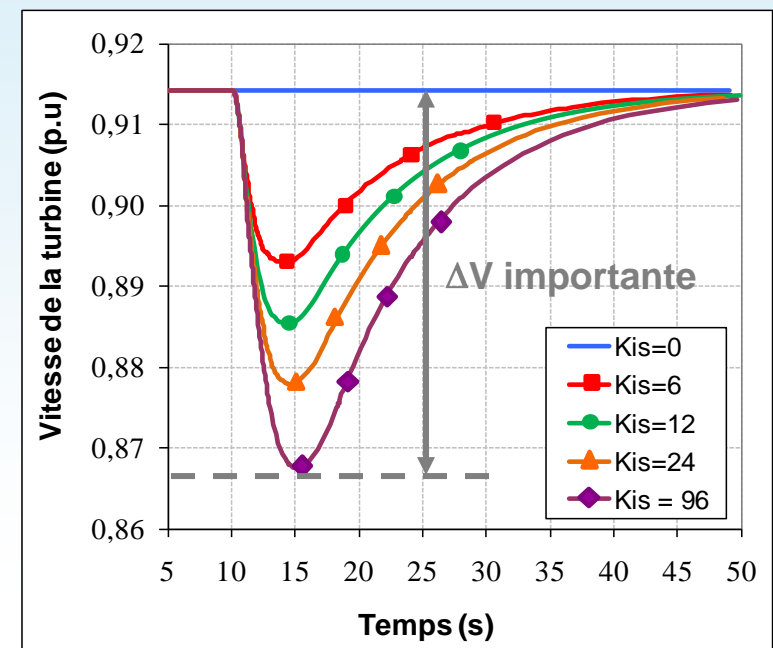
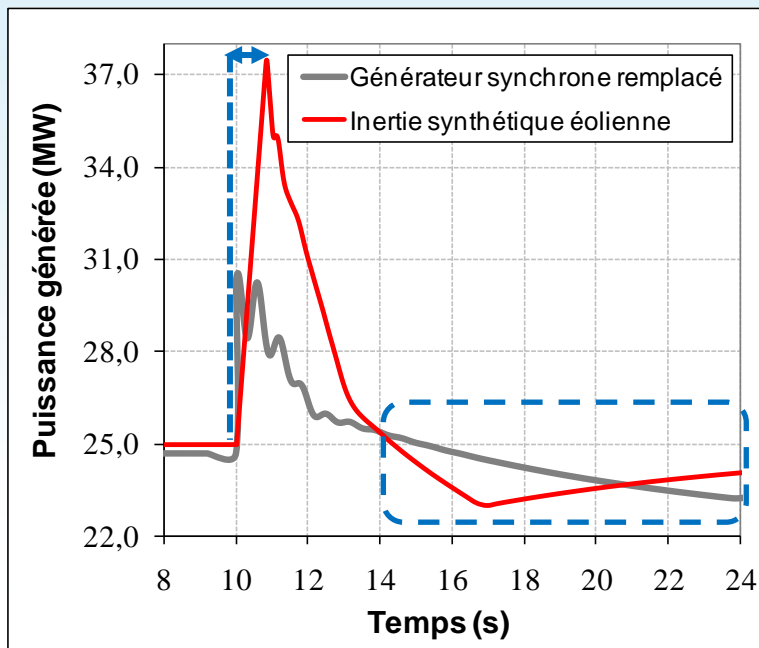


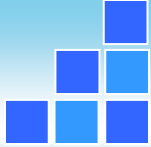
Caractérisation dynamique de l'inertie synthétique



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

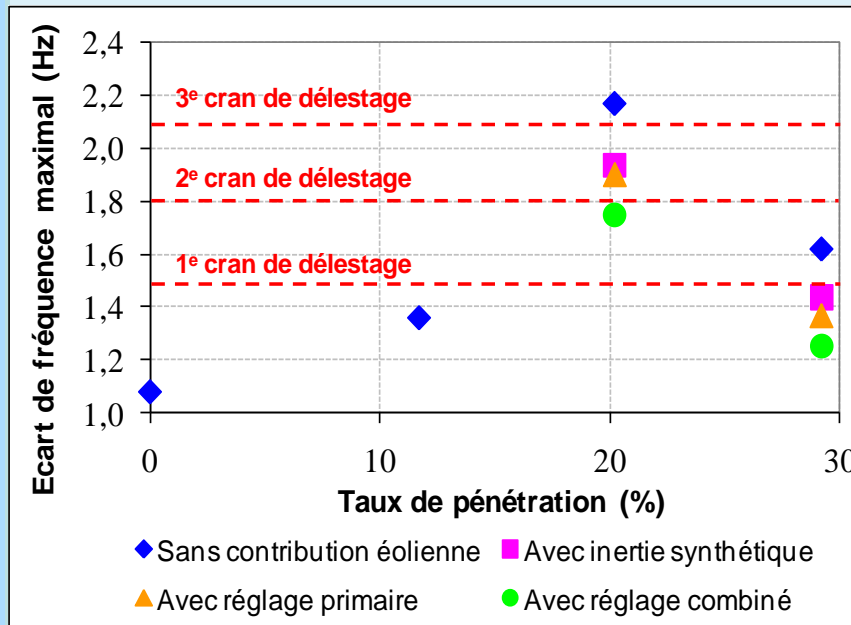
- Réaction instantanée de l'inertie naturelle
 - ➔ inertie synthétique retardée et limitée par $(dP/dt)_{max}$
- Période de la restauration du point optimal différente
- Potentiel important de fourniture de l'inertie synthétique
 - ➔ vitesse au-dessus de la limite (0,7-0,8 p.u) même avec des gains importants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



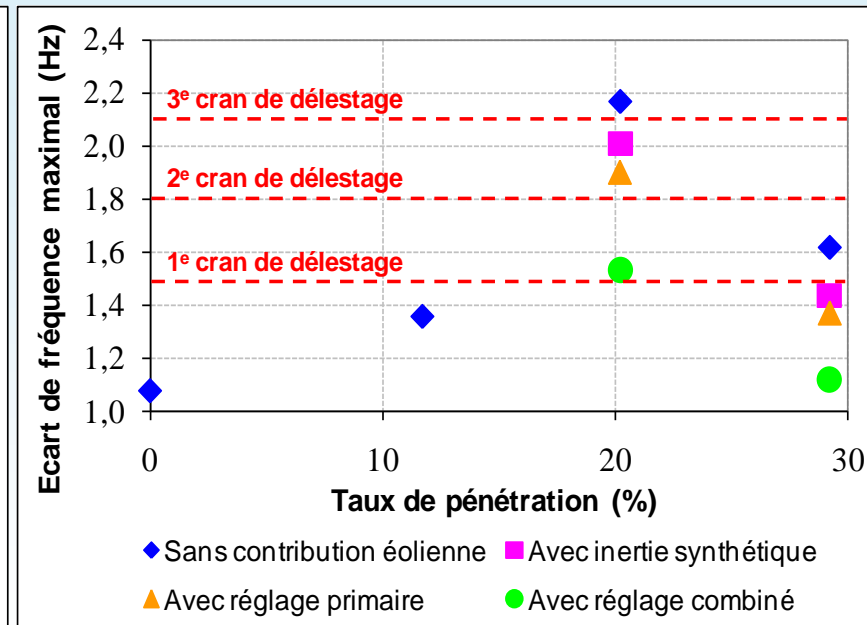


❖ Bilan des contributions et potentiel du réglage combiné

- 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

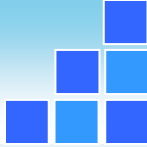


Fonctionnement à pleine charge



Fonctionnement en charge partielle

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 $f \downarrow$

➔ 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%

