

Soirée des doctorants

Thèmes : « Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence des énergies renouvelables intermittentes » et « Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe »

Le bureau français de l'IEEE PES vous convie à la soirée annuelle des doctorants, au cours de laquelle les deux lauréates du prix de l'année, viendront présenter leurs travaux. Nous leur donnerons la parole sur deux thèmes variés. Les exposés seront introduits par les responsables industriels concernés qui viendront expliciter les enjeux des travaux présentés.

Carmen Cardozo présentera ses travaux visant à résoudre un problème de placement de production tenant compte des contraintes dynamiques de sécurité du système afin de garantir du maintien de la fréquence du système au-dessus d'un seuil déterminé en cas d'incident.

Marjorie Cosson exposera ses travaux sur le maintien de la tension dans des bornes admissibles sur les réseaux de distribution. En effet, les régulations de tension des producteurs distribués risquent d'interagir causant des oscillations de tension. L'objet de la thèse est de qualifier les conditions de stabilité de ces régulations.

Organisation et Parrainage

- Chapitre français de l'IEEE PES (Power & Energy Society)
- Avec l'appui de la SEE (Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication) – Club technique « Systèmes électriques »

Jeudi 31 Mars 2016

de 17h30 à 19h30

**RTE - Tour Initiale – 1, terrasse Bellini
Paris - La Défense**

17h30 Accueil et introduction

Sébastien Henry, *Président du bureau français de l'IEEE PES, Directeur SI & Télécommunications, RTE*

17h40 Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence des énergies renouvelables intermittentes

Carmen Cardozo (*CentraleSupelec et EDF R&D*), introduction par Laurent Capely (*EDF R&D*)

18h30 Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe

Marjorie Cosson (*CentraleSupelec et EDF R&D*), introduction par Vincent Gabrion (*EDF R&D*)

19h30 Pot de l'amitié

Inscription et Renseignements

Inscription en ligne gratuite : <http://bit.ly/1gNuQWb>

Après la soirée, les présentations sont disponibles sur <http://ewh.ieee.org/r8/france/pes/>

Lieu

**RTE - Tour Initiale
1, terrasse Bellini, Paris - La Défense**
Métro ligne 1– Station : Esplanade de la Défense
Plan : <http://bit.ly/1iZ39Jy>



Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence d'ENR intermittentes

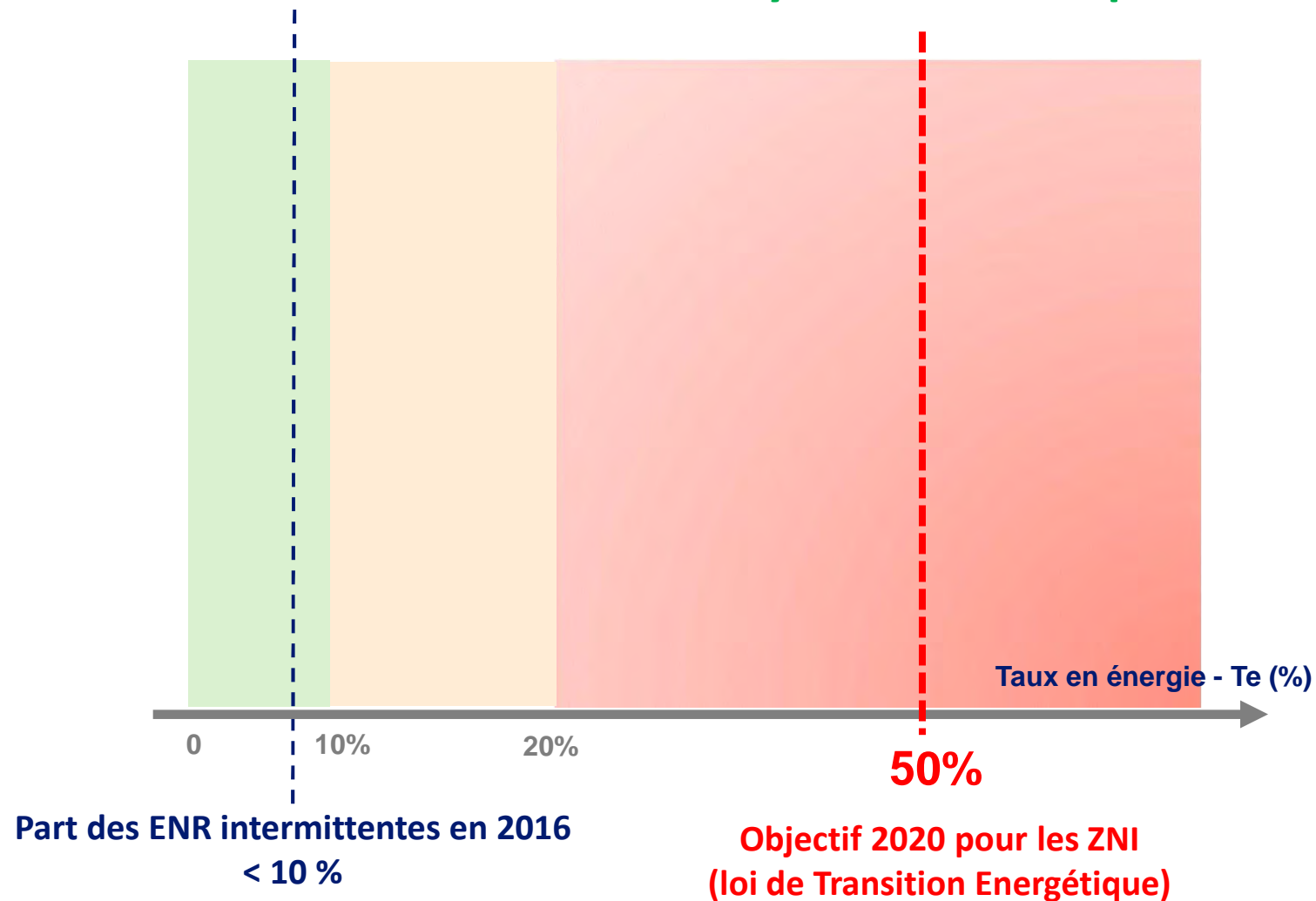
Intégration de contraintes de déploiement de la réserve primaire
dans un outil de placement journalier de production

Soirée des doctorants IEEE PES France – 31 mars 2016

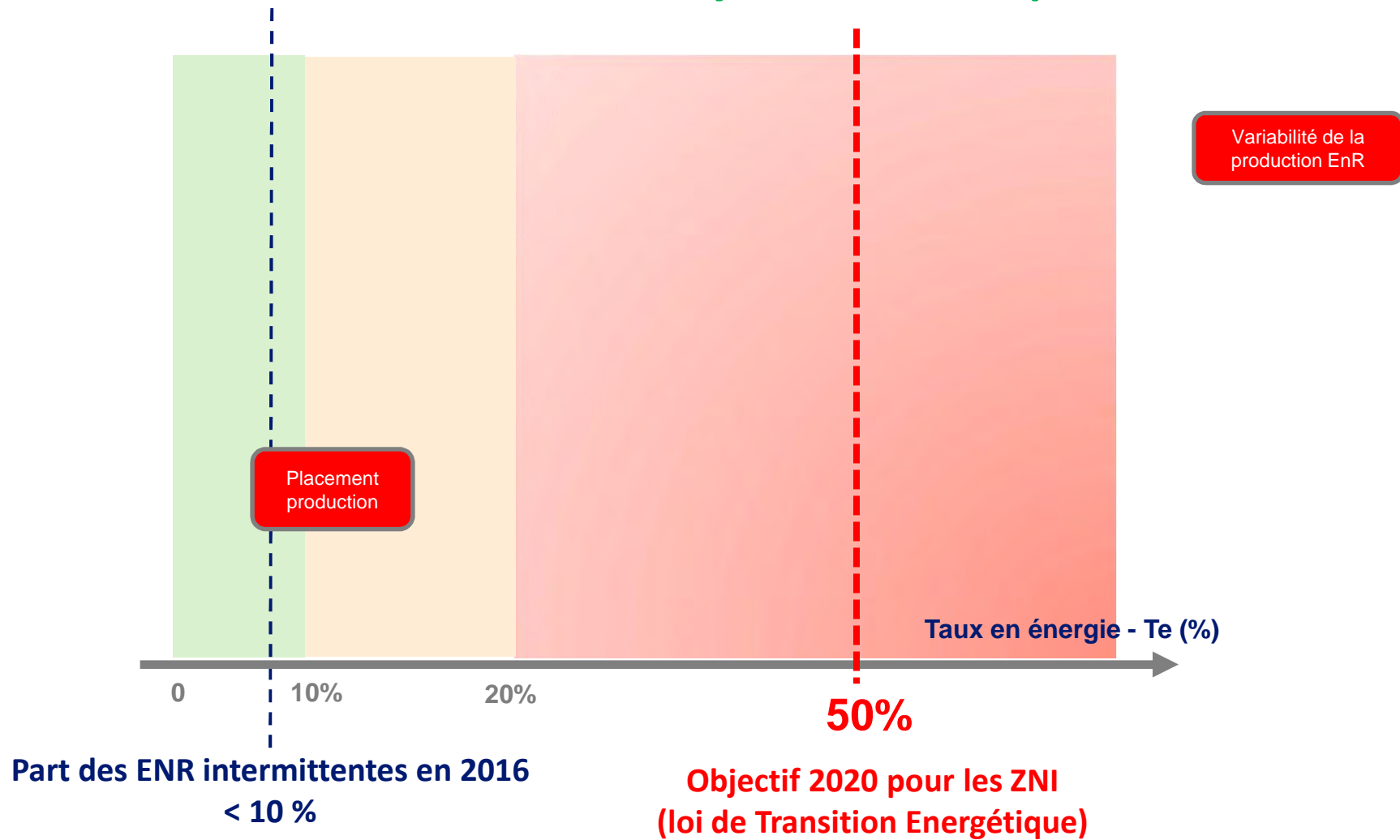
Laurent CAPELY

EDF R&D / Département EFESSE

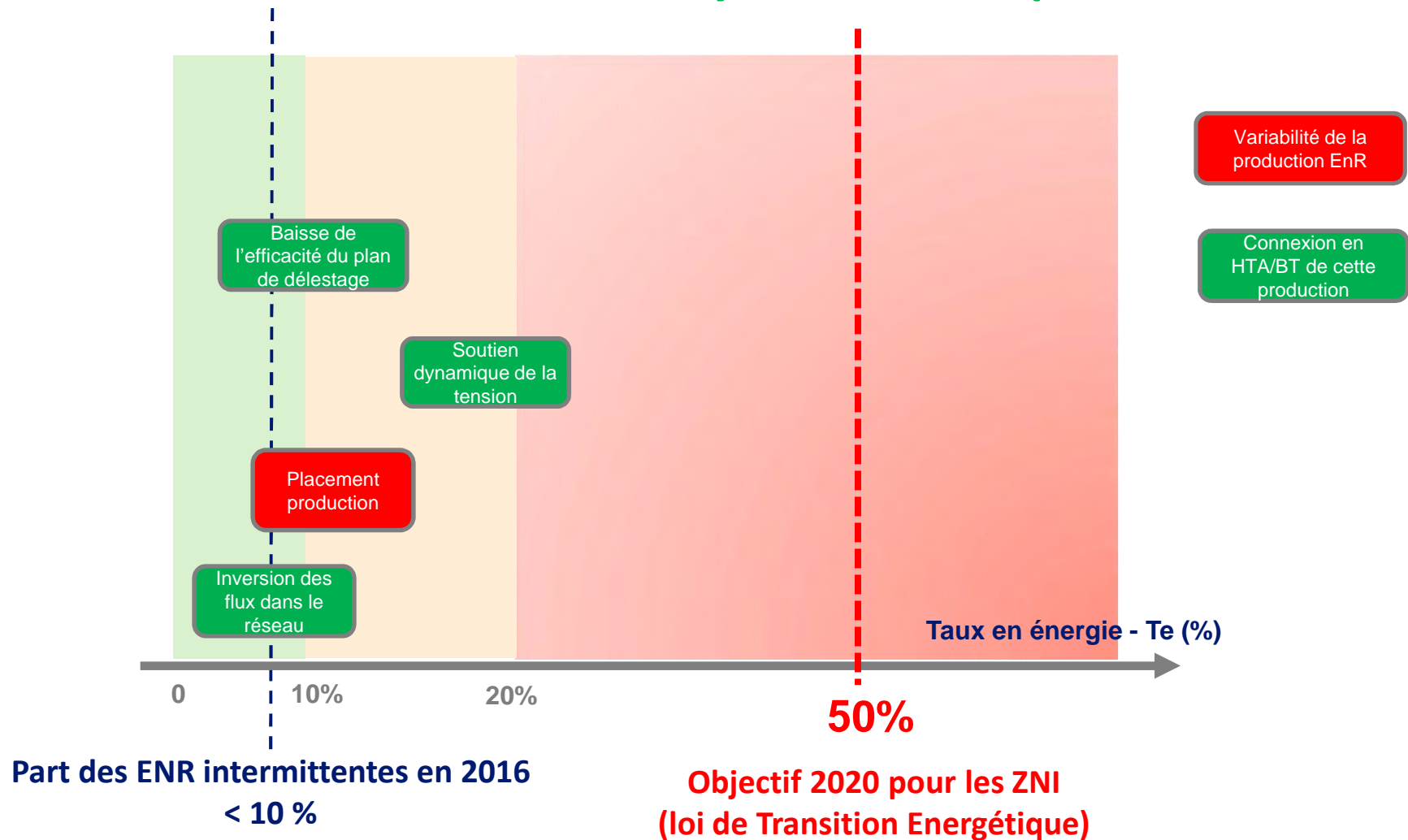
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



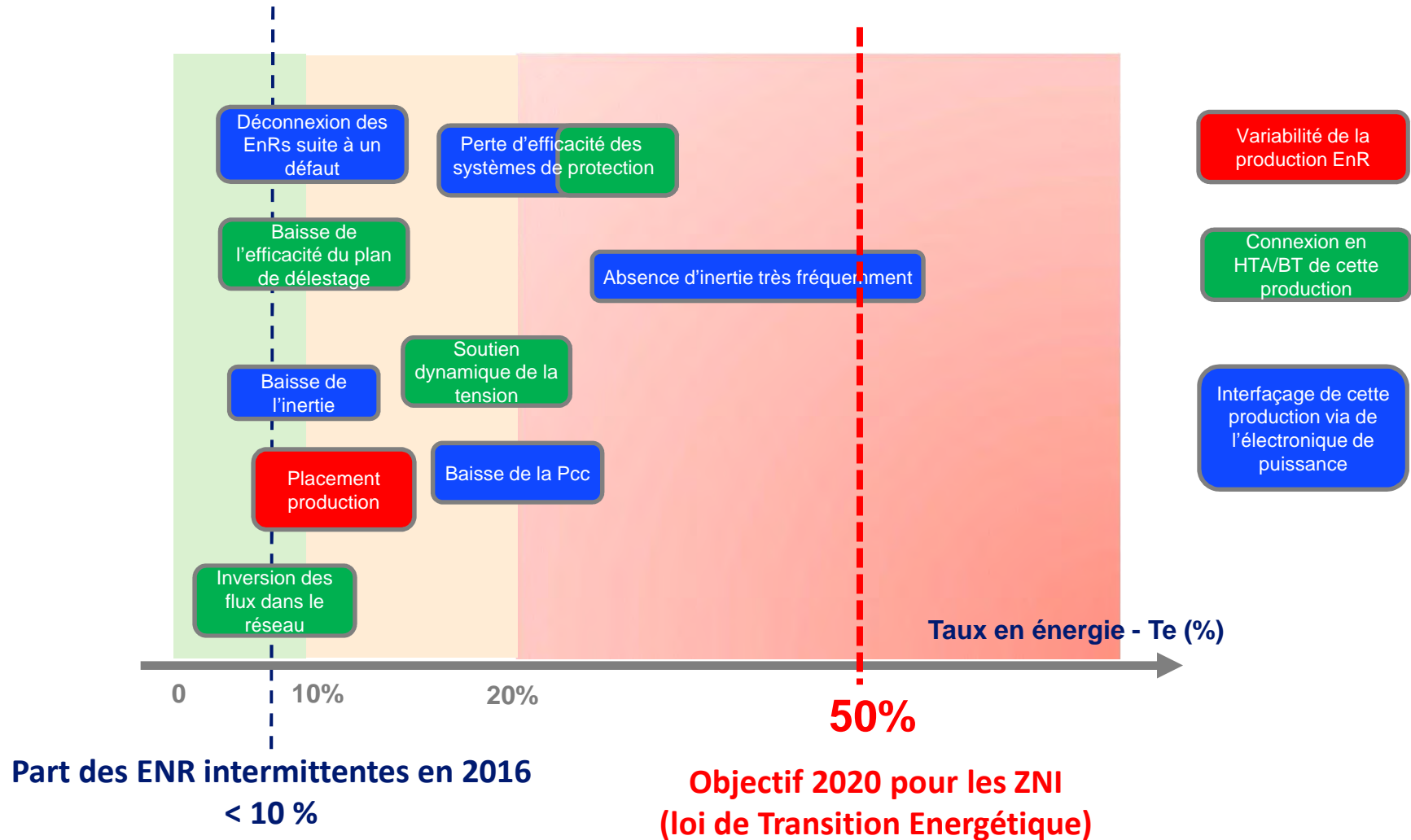
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire

Augmentation de la puissance ENR installée sans renforcement de la contribution des ENR à la sûreté système

Taux d'insertion instantané

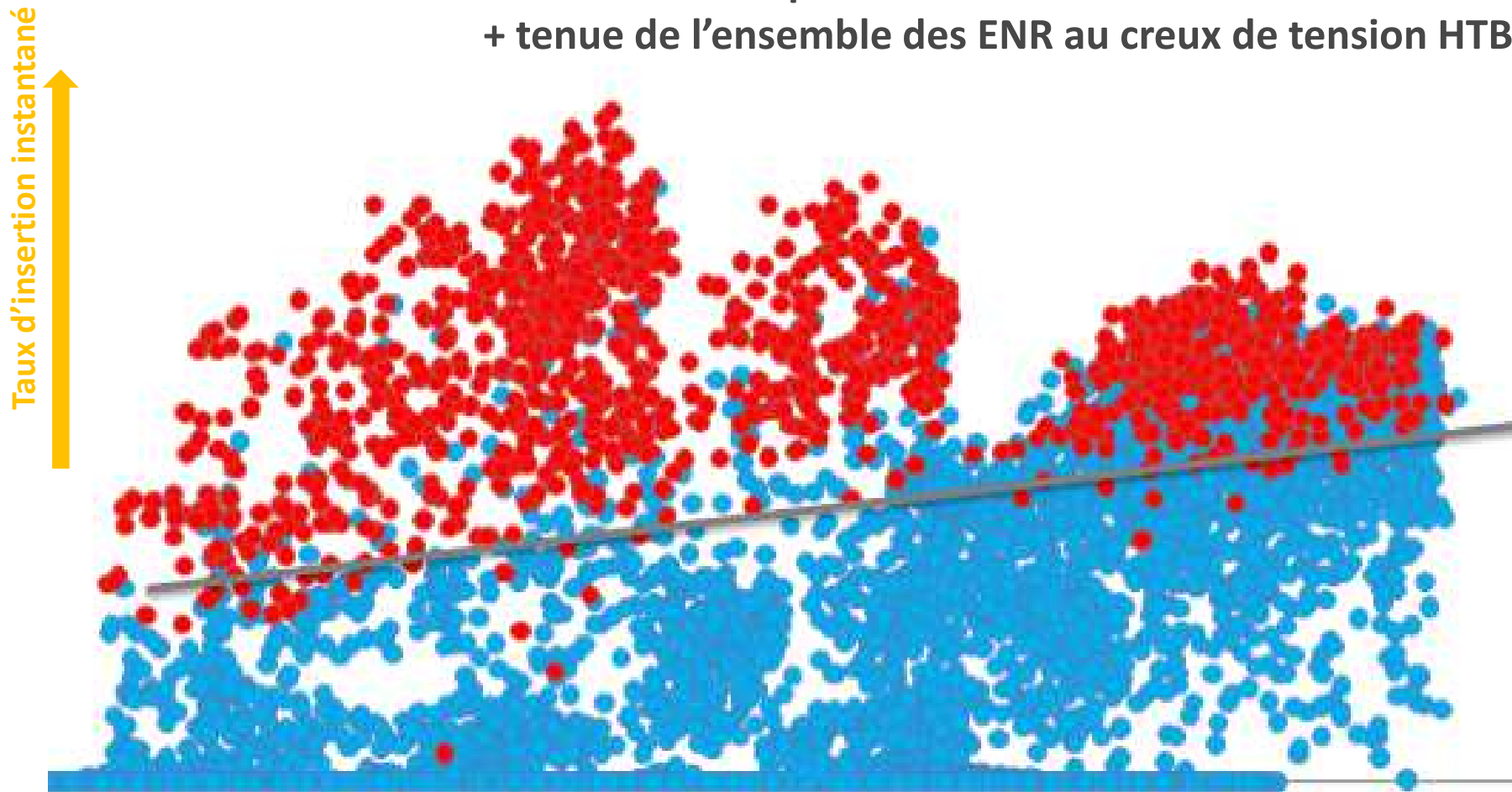


● Politique risque respectée

● Politique risque non respectée

Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire

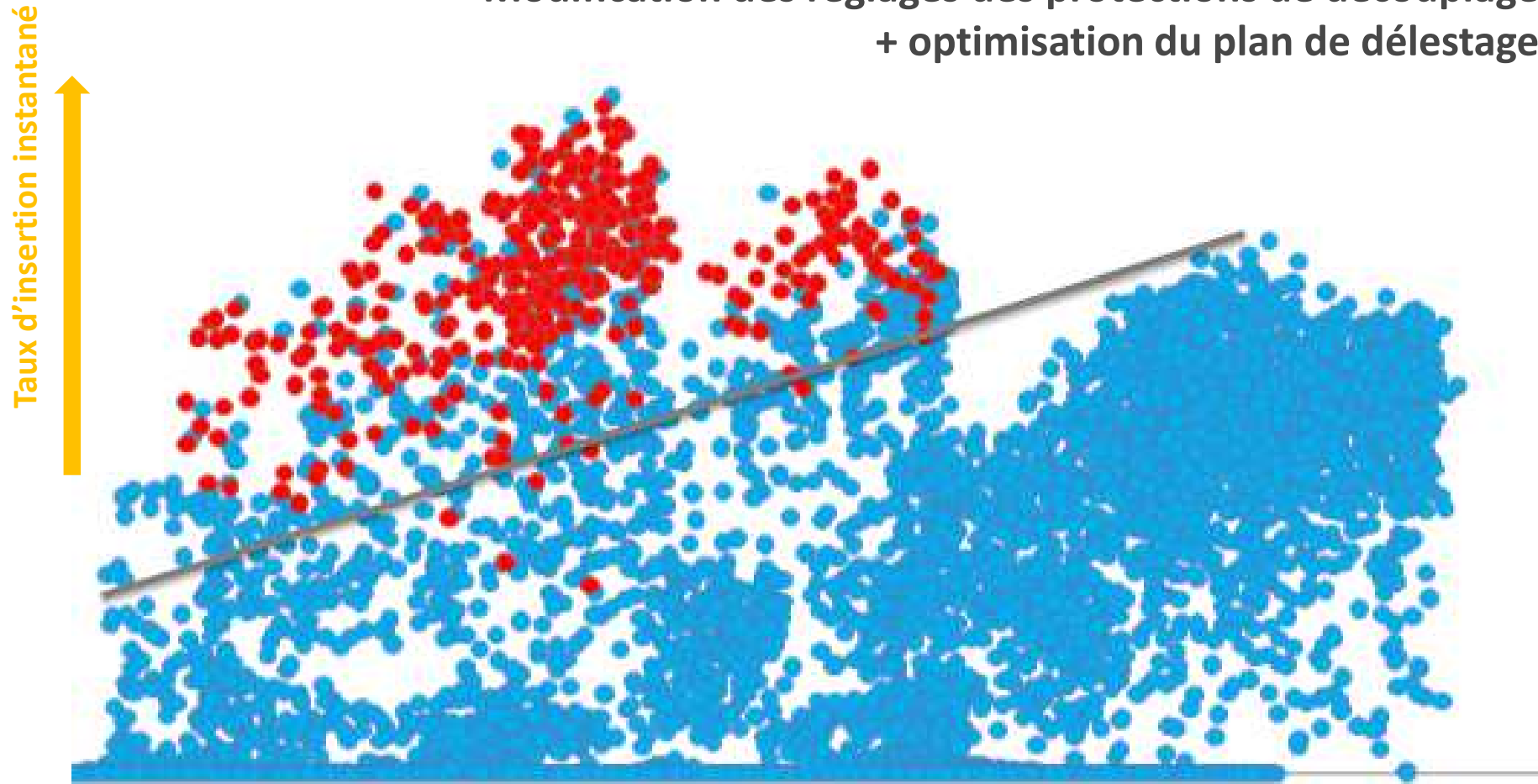
Compensation de la variabilité infra-horaire
+ tenue de l'ensemble des ENR au creux de tension HTB



- Politique risque respectée
- Politique risque non respectée

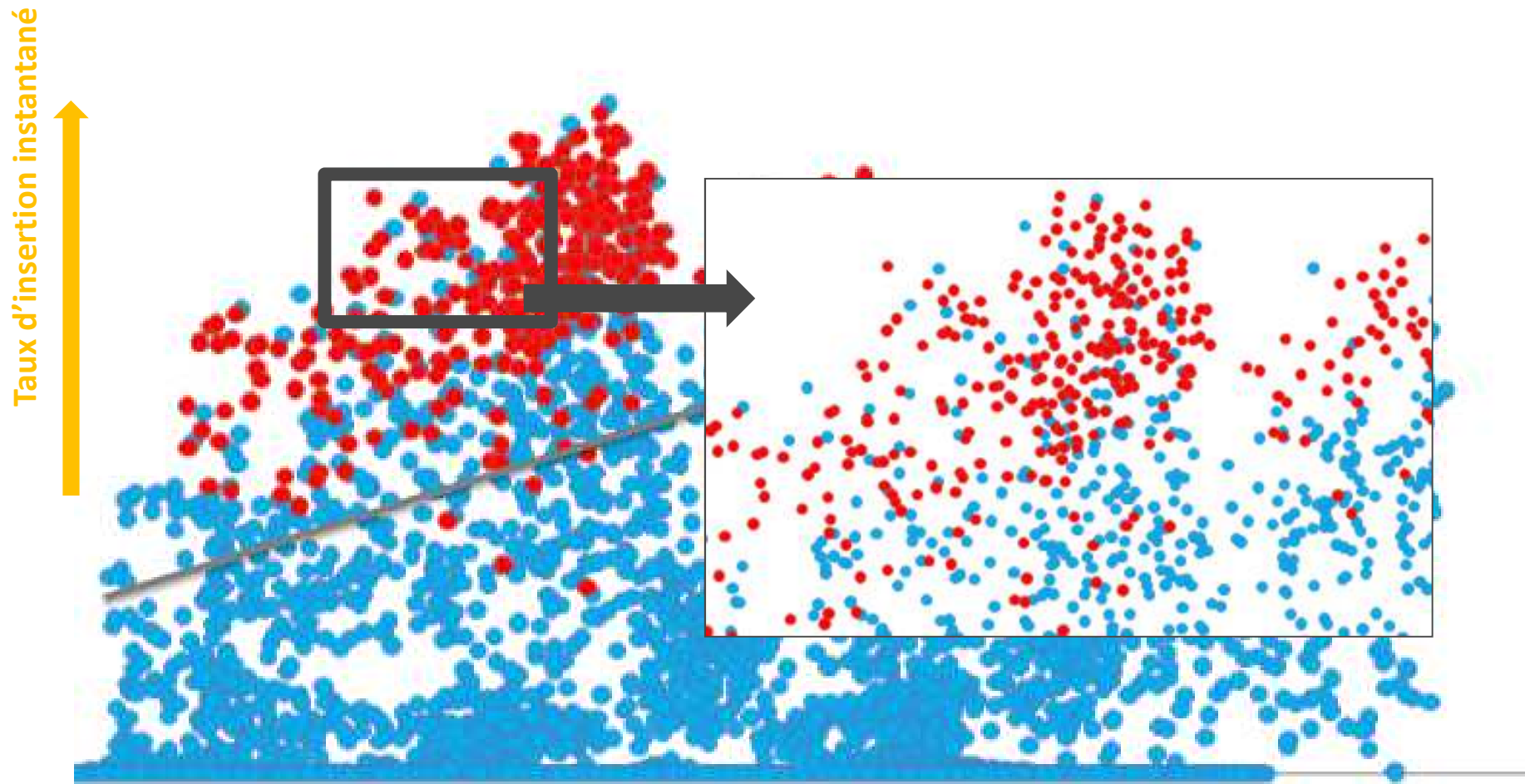
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire

Modification des réglages des protections de découplage
+ optimisation du plan de délestage



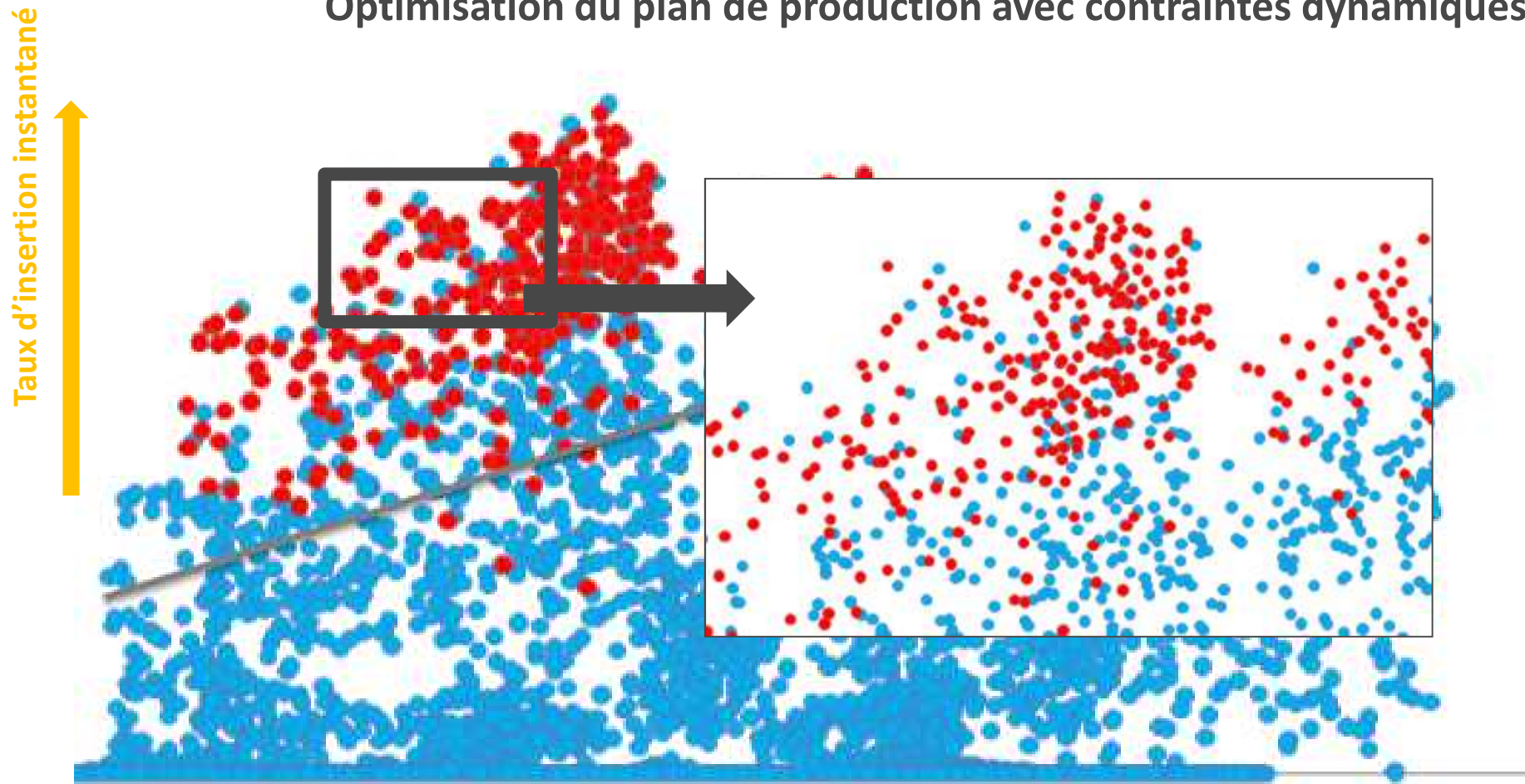
- Politique risque respectée
- Politique risque non respectée

Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire

Optimisation du plan de production avec contraintes dynamiques



- Politique risque respectée
- Politique risque non respectée

Optimisation de la sûreté d'un système électrique en présence d'ENR intermittentes

Intégration de contraintes de déploiement de la réserve primaire
dans un outil de placement journalier de production

Carmen Cardozo

Ph. Dessante
M. Petit

L. Capely V. Silva
W. van Ackooij



Soirée des doctorants IEEE PES France - SEE
31 mars 2016

Contributions de la thèse

- 1 Étudier la relation entre le creux de fréquence et les variables d'optimisation du modèle UC (*Unit Commitment*).
- 2 Quantifier l'impact des sources non-synchrones sur la performance de la régulation primaire de fréquence.
- 3 Analyser le coût et les bénéfices de différentes mesures palliatives (e.g., écrêtement, inertie, soutien dynamique).
- 4 Proposer une nouvelle formulation du problème FCUC (*Frequency Constrained Unit Commitment*).

Plan de la présentation

- 1 Modélisation
 - Outil de placement de production
 - Régulation primaire de fréquence
 - Approche de simulation et cas d'étude
- 2 Intégration des EnR
- 3 Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
- 5 Conclusions

Outil de placement de production

Placement
production

g,u

Régulation
fréquence

$$\begin{aligned} & \underset{g \in \mathbb{R}^m, u \in \{0,1\}^{m^2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\ & \text{sous contraintes} && f_i(g, u) \leq 0 \quad i = 1, \dots, i, \\ & && g_\ell(g, u) = 0 \quad \ell = 1, \dots, l, \end{aligned}$$

où :

- ① $g, u \rightarrow$ programme d'appel (état et puissance de consigne).
- ② $f_0 : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ représente le coût de production.
- ③ $f_i : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \quad \forall i = 1, \dots, i$, sont les contraintes d'inégalité :
 - Limites de capacité (G_j^{max} et G_j^{min}).
 - Limites sur les gradients horaires de puissance (R_j^{up} et R_j^{dn}).
 - Temps minimum de marche/arrêt (T_j^{up} et T_j^{dn}).
 - Critère de sûreté : prescription de réserve (R^{min}).
 - Limites d'allocation de réserve (R_j^{max}).
- ④ $g_\ell : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \quad \forall \ell = 1, \dots, l$, sont les contraintes d'égalité :
 - Équilibre offre-demande (D)...

Régulation primaire de fréquence

Placement
production

g,u

Régulation
fréquence $f_{min}(u,g)?$ 

Avantages

Equivalent-Machine

Expression analytique

Multi-Machine

Paramètres des groupes

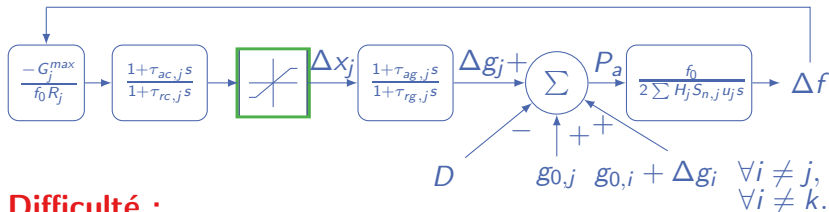


Limitations

Calcul paramètres

Complexité / Hypothèses

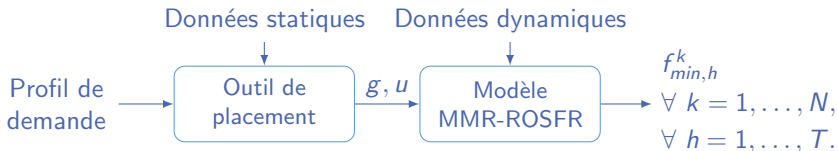
On propose une version modifiée du modèle *Multi-Machine* avec saturation de la puissance produite.

**Difficulté :**

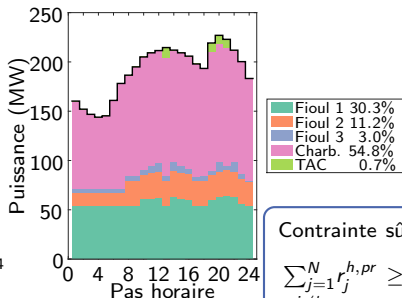
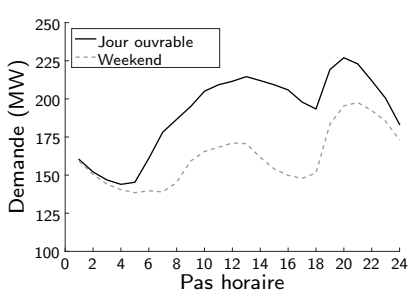
Pas d'expression analytique pour $f_{min}(g, u, D(t), \Delta P, \dots)$.

Le modèle est résolu par une méthode d'intégration numérique à pas fixe.

Simulation séquentielle



Cas d'étude : système de type insulaire avec 18 groupes thermiques.

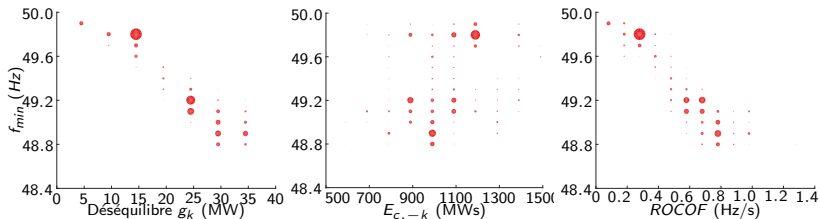


Contrainte sûreté

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h$$

Régulation primaire de fréquence

Creux de fréquence pour toute perte de groupe sur une année.



Objectif 1 : étudier la relation entre le creux de fréquence et les variables d'optimisation du modèle UC. ✓

$$f_{min}(g, u, H_j, \tau_j, R_j, S_{n,j}, G_j^{max}, R_j^{max}, D(h), g_k).$$

Problème FCUC difficile à formuler car la contrainte sur le creux de fréquence est non-linéaire et implicite.

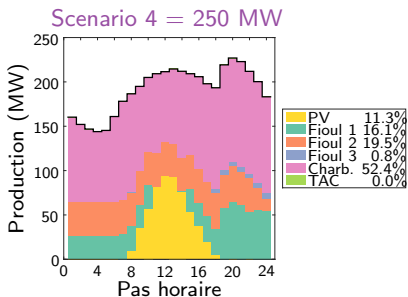
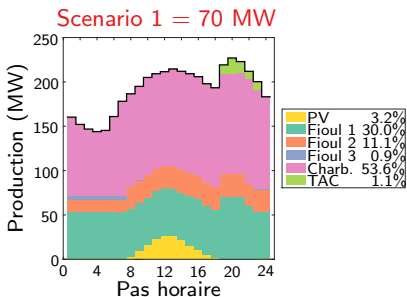
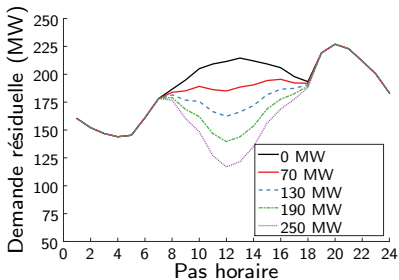
Plan de la présentation

- 1 Modélisation
- 2 Intégration des EnR
 - Scénarios de développement du PV
 - Modification des programmes d'appel
 - Impact sur l'évolution de la fréquence
 - Besoin d'un renforcement des contraintes de sûreté
- 3 Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
- 5 Conclusions

Scénarios de développement du PV

Profil annuel de demande et du facteur de charge du PV au pas horaire.

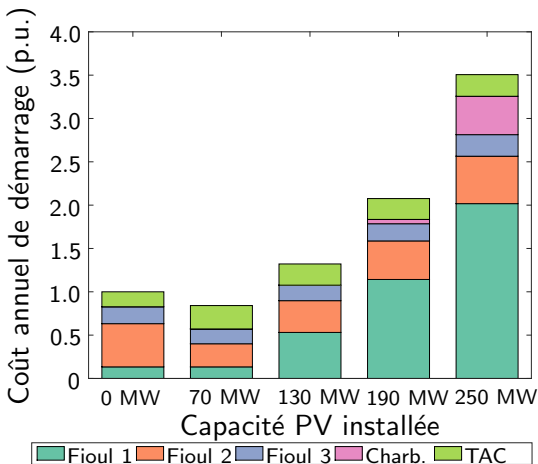
4 scénarios de capacité installée.



Modification des programmes d'appel

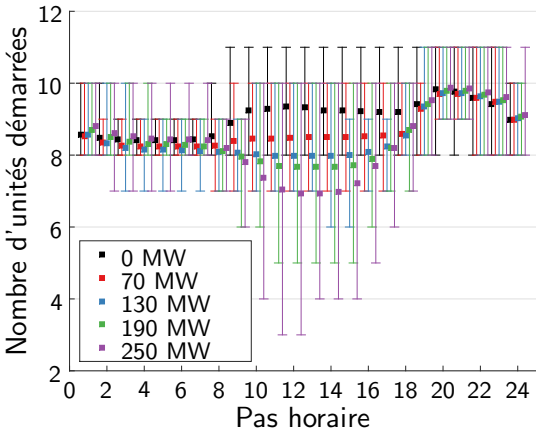
1 ⇕ Marges

2 ↑ Arrêt/Démarrage



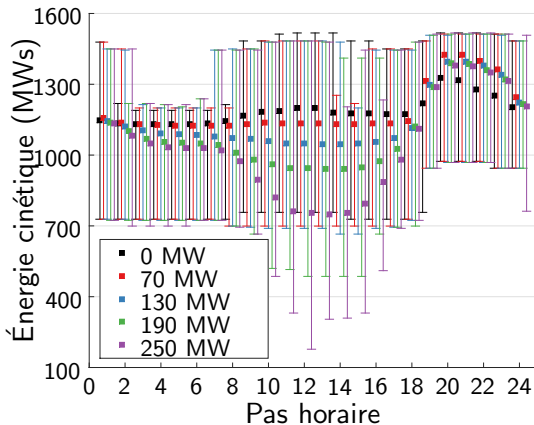
Modification des programmes d'appel

- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités



Modification des programmes d'appel

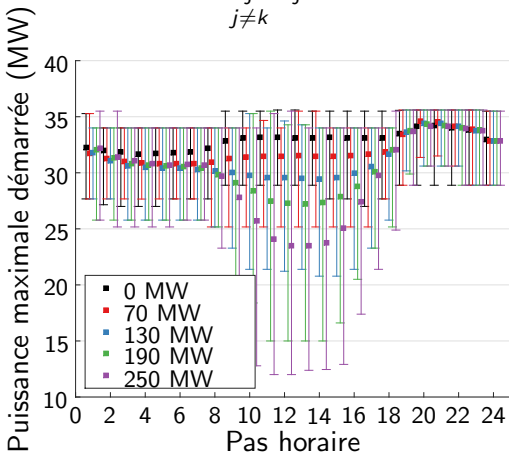
- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités
- 4 ↓ Énergie cinétique



Modification des programmes d'appel

- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités
- 4 ↓ Énergie cinétique
- 5 ↓ Puissance démarrée

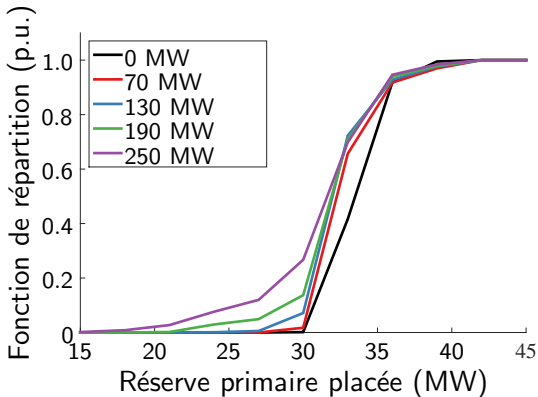
$$\text{Rappel : } \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h$$



Modification des programmes d'appel

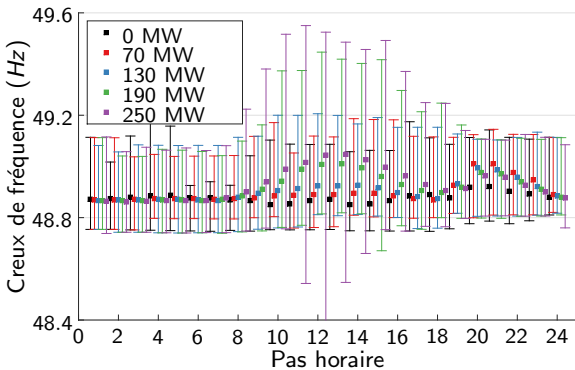
- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités
- 4 ↓ Énergie cinétique
- 5 ↓ Puissance démarrée
- 6 ↓ Besoin de réserve primaire

$$\text{Rappel : } \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h$$



Impact sur l'évolution de la fréquence

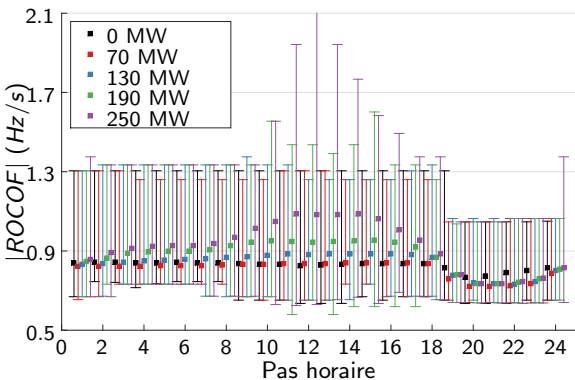
① ⇕ f_{min}



Impact sur l'évolution de la fréquence

1 ⇕ f_{min}

2 ↑ $|ROCOF|$

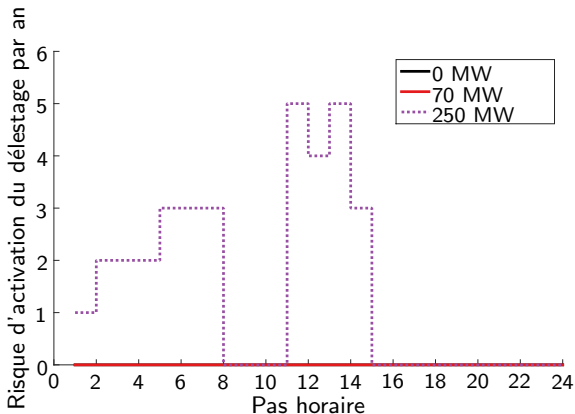


Impact sur l'évolution de la fréquence

1 \updownarrow f_{min}

2 \uparrow $|ROCOF|$

3 \uparrow $PIDR$



Nouvel indice : *Periods with Insufficient Dynamic Response (PIDR)*

Contribution 2 : UC \rightarrow MMR-ROSF \Rightarrow effets contre-intuitifs.

Objectif 2 : quantifier l'impact des sources non-synchrones sur la performance de la régulation primaire de fréquence. ✓

Besoin d'un renforcement des contraintes de sûreté

- ① Risque de délestage avec le développement des EnR intermittentes :

| | 0 MW | 70 MW | 130 MW | 190 MW | 250 MW |
|------------|------|-------|--------|--------|--------|
| PIDR (h/y) | 0 | 0 | 12 | 19 | 33 |

- ② Coût de fourniture de la réserve primaire par scénario :

| | 0 MW | 70 MW | 130 MW | 190 MW | 250 MW |
|----------|------|-------|--------|--------|--------|
| Cost (%) | 6.3 | 7.3 | 8.0 | 9.0 | 10.4 |

- ③ Dispersion accrue des besoins en réserve.

$$\text{Rappel : } \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h.$$

- ④ Différents leviers pour améliorer la performance de la régulation primaire de fréquence :

$$\text{Rappel : } f_{min}(g, u, H_j, \tau_j, R_j, S_{n,j}, G_j^{max}, R_j^{max}, D(h), g_k).$$

Plan de la présentation

- 1 Modélisation
- 2 Intégration des EnR
- 3 Contraintes de sûreté renforcées**
 - Contraintes indirectes
 - Analyse coût/bénéfice
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
- 5 Conclusions

Contraintes de sûreté renforcées



Rappel : UC classique (avec formulation PLNE).

$$\begin{aligned}
 & \underset{g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0,1\}^{m_2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\
 \text{sous contraintes} &&& f_i(g, u) \leq 0 && \forall i = 1, \dots, i, \\
 &&& g_\ell(g, u) = 0 && \forall \ell = 1, \dots, l, \\
 &&& \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N.
 \end{aligned}$$

Contraintes de sûreté renforcées

Modèle
FCUC g, u Regulation
fréquence $f_{min}(u, g)$ ✓

Rappel : UC classique (avec formulation PLNE).

$$\begin{aligned}
 & \underset{g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0,1\}^{m_2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\
 \text{sous contraintes} &&& f_i(g, u) \leq 0 && \forall i = 1, \dots, i, \\
 &&& g_\ell(g, u) = 0 && \forall \ell = 1, \dots, l, \\
 &&& \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\
 &&& \underline{q} - q_m(g, u) \leq 0 && \forall m = 1, \dots, M.
 \end{aligned}$$

On cherche à formuler le problème Frequency Constrained UC.

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz)

q_m → creux de fréquence (Hz)

Contraintes de sûreté renforcées

UC modifié
(indirecte)

g, u

Regulation
fréquence

$f_{min}(u, g)?$

Rappel : UC classique (avec formulation PLNE).

$$\begin{aligned}
 & \underset{g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0,1\}^{m_2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\
 \text{sous contraintes} &&& f_i(g, u) \leq 0 && \forall i = 1, \dots, i, \\
 &&& g_\ell(g, u) = 0 && \forall \ell = 1, \dots, l, \\
 &&& \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\
 &&& \underline{q} - q_m(g, u) \leq 0 && \forall m = 1, \dots, M.
 \end{aligned}$$

Contraintes indirectes.

On cherche à formuler le problème “Frequency” Constrained UC.

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz)

q_m → creux de fréquence (Hz)

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | | |
| Prescription d'une inertie minimale | | | |
| Effacement des EnR | | | |
| Soutien dynamique | | | |

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | | | |
| Effacement des EnR | | | |
| Soutien dynamique | | | |

✓*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...

Coût/bénéfices des mesures palliatives



| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | | | |
| Effacement des EnR | | | |
| Soutien dynamique | | | |

✓*: pour une prescription donnée, un scenario EnR, un seuil de sûreté...

Contrainte d'inertie (1)



$$\begin{aligned}
 & \underset{g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0,1\}^{m_2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\
 \text{sous contraintes} &&& f_i(g, u) \leq 0 && \forall i = 1, \dots, i, \\
 &&& g_\ell(g, u) = 0 && \forall \ell = 1, \dots, l, \\
 &&& \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\
 &&& \sum_{j=1}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE^{min} && \forall h = 1, \dots, T.
 \end{aligned}$$

Contrainte d'inertie (1)

UC modifié
(inertie)

g, u

Régulation
fréquence

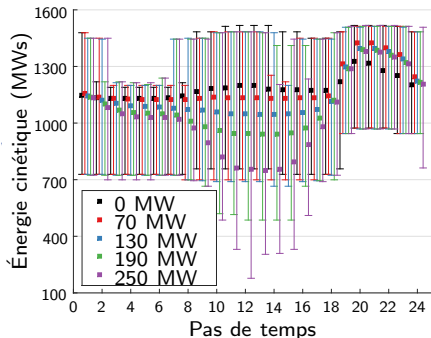
$f_{min}(u, g)?$

minimiser $f_0(g, u)$
 $g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0, 1\}^{m_2}$

sous contraintes $f_2(g, u) \leq 0$
 $g_\ell(g, u) = 0$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h, pr} \geq g_k^h$$

$$\sum_{j=1}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE^{min}$$



Contrainte d'inertie (2)

 UC modifié
(inertie N-1)

 g, u

 Régulation
fréquence

 $f_{min}(u, g)?$

$$\underset{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}}{\text{minimiser}} \quad f_0(g, u)$$

$$\text{sous contraintes} \quad f_i(g, u) \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, i,$$

$$g_\ell(g, u) = 0 \quad \forall \ell = 1, \dots, l,$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h \quad \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N,$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE_{-k}^{min} \quad \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N.$$

[1] P. Daly, D. Flynn, and N. Cunniffe. Inertia considerations within unit commitment and economic dispatch for systems with high non-synchronous penetrations. PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, pages 1-6, June 2015.

Contrainte d'inertie (3)

UC modifié
(ROCOF)

g, u

Régulation
fréquence

$f_{min}(u, g)?$

$$\begin{aligned}
 & \underset{g \in \mathbb{R}^{m1}, u \in \{0,1\}^{m2}}{\text{minimiser}} && f_0(g, u) \\
 & \text{sous contraintes} && f_i(g, u) \leq 0 && \forall i = 1, \dots, I, \\
 & && g_\ell(g, u) = 0 && \forall \ell = 1, \dots, L, \\
 & && \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N, \\
 & && \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF_{max}} g_k^h && \forall h = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, N.
 \end{aligned}$$

[1] P. Daly, D. Flynn, and N. Cunniffe. Inertia considerations within unit commitment and economic dispatch for systems with high non-synchronous penetrations. PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, pages 1-6, June 2015.

[2] R. Doherty, G. Lalor, and M. O'Malley. Frequency control in competitive electricity market dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3):1588-1596, 2005.

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|---------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE_{-k}^{min}$ $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF^{max}} g_k^h$ | €€ € | ✓* ✓* |
| Effacement des EnR | | | |
| Soutien dynamique | | | |

✓*: pour une prescription donnée, un scénario EnR, un seuil de sûreté...

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|---------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE_{-k}^{min}$ $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF^{max}} g_k^h$ | €€ € | ✓* ✓* |
| Effacement des EnR | $\sum_{j=1}^N g_j^h + VG^h = D^h$ | €* | ⚠ |
| Soutien dynamique | | | |

✓*: pour une prescription donnée, un scénario EnR, un seuil de sûreté...

€*: un niveau limité d'effacement peut réduire le coût.

⚠: effets contre-productifs liés aux contraintes inter-temporelles.

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|---------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE_{-k}^{min}$ $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF^{max}} g_k^h$ | €€ € | ✓* ✓* |
| Effacement des EnR | $\sum_{j=1}^N g_j^h + VG^h = D^h$ | €* | ⚠ |
| Soutien dynamique | $\sum_{j \neq k}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h - C^{fixed}$ | €+ ?† | ✓* ⚠ |

✓*: pour une prescription donnée, un scénario EnR, un seuil de sûreté...

€*: un niveau limité d'effacement peut réduire le coût.

⚠: effets contre-productifs liés aux contraintes inter-temporelles.

?†: coûts des moyens alternatifs non inclus.

⚠: ↓ inertie, ↑ niveau de charge et besoin en réserve.

Coût/bénéfices des mesures palliatives

| UC modifié | Contrainte | Coût | Bénéfice |
|-------------------------------------|---|---------|----------|
| Prescription d'une réserve minimale | $\sum_{j=1}^N r_j^{h,pr} \geq R_{pr}^{min}$ | €€€€ | ✓* |
| Prescription d'une inertie minimale | $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq KE_{-k}^{min}$ $\sum_{j \neq k}^N H_j S_{n,j} u_j^h \geq \frac{f_0}{2ROCOF^{max}} g_k^h$ | €€ € | ✓* ✓* |
| Effacement des EnR | $\sum_{j=1}^N g_j^h + VG^h = D^h$ | €* | ⚠ |
| Soutien dynamique | $\sum_{j \neq k}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h - C^{fixed}$ | €+ ?† | ✓* ⚠ |

Objectif 3 : Analyser le coût et les bénéfices de différentes mesures palliatives. ✓

Besoin d'une méthode innovante pour inclure une contrainte dynamique performante dans le placement optimal de production.

Plan de la présentation

- 1 Modélisation
- 2 Intégration des EnR
- 3 Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC**
 - Décomposition de Benders pour le problème FCUC
 - Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence
 - Cas d'étude
 - Comparaison avec une contrainte indirecte
- 5 Conclusions

Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$
 $\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

- y → état des groupes
 x → puissance (MW)
 q_m → creux de fréquence (Hz)
 \underline{q} → seuil de sûreté (Hz).

*Master
problem*

*Slave
problem*

Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N1}, y \in \{0,1\}^{N2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$

$H(x, y) = 0,$

$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$
 $\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

- y → état des groupes
 x → puissance (MW)
 q_m → creux de fréquence (Hz)
 \underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$

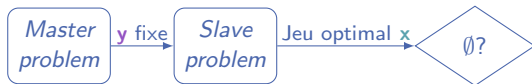
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

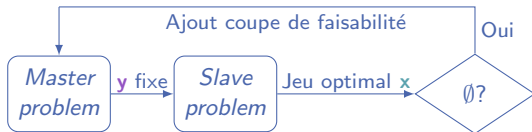
\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N1}, y \in \{0,1\}^{N2}$
 sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$
 $\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

- y → état des groupes
 x → puissance (MW)
 q_m → creux de fréquence (Hz)
 \underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$

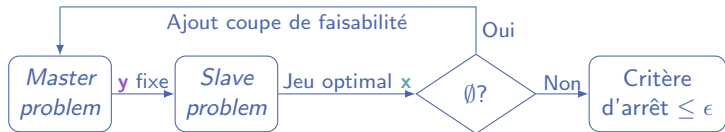
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



ϵ → Tolérance de convergence

Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$

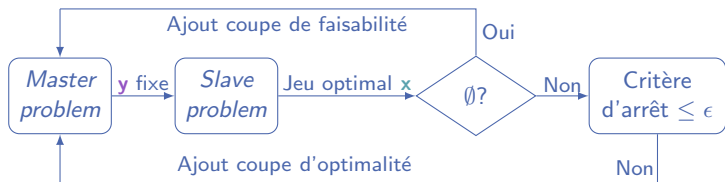
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



ϵ → Tolérance de convergence

Décomposition de Benders pour le problème FCUC

minimiser $f_1(x) + f_2(y)$
 $x \in \mathbb{R}^{N_1}, y \in \{0,1\}^{N_2}$

sous contraintes $G(x, y) \leq 0,$
 $H(x, y) = 0,$

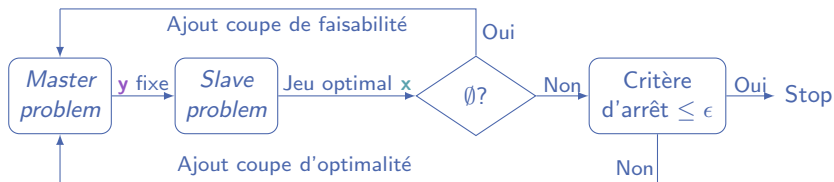
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



ϵ → Tolérance de convergence

Nouvelle formulation du problème FCUC

Master problem : UC

$$c^* = \underset{y \in Y}{\text{minimiser}} \quad \mathcal{V}(y) + f_2(y)$$

$$\text{sous contraintes} \quad G(x, y) \leq 0,$$

$$H(x, y) = 0,$$

Coupe de faisabilité,

Coupe d'optimalité.

Slave problem : FCED (sur l'horizon d'optimisation)

$$\mathcal{V}(\bar{y}^i) = \underset{x \in X}{\text{minimiser}} \quad f_1(x)$$

$$\text{sous contraintes} \quad G(x, \bar{y}^i) \leq 0,$$

$$H(x, \bar{y}^i) = 0,$$

$$\underline{q} - q_m(x, \bar{y}^i) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$$

Nouvelle formulation du problème FCUC

Master problem : UC

$$c^* = \underset{y \in Y}{\text{minimiser}} \quad \mathcal{V}(y) + f_2(y)$$

$$\text{sous contraintes} \quad G(x, y) \leq 0,$$

$$H(x, y) = 0,$$

Coupe de faisabilité,

Coupe d'optimalité.

Slave problem : FCED (sur l'horizon d'optimisation)

$$\mathcal{V}(\bar{y}^i) = \underset{x \in X}{\text{minimiser}} \quad f_1(x)$$

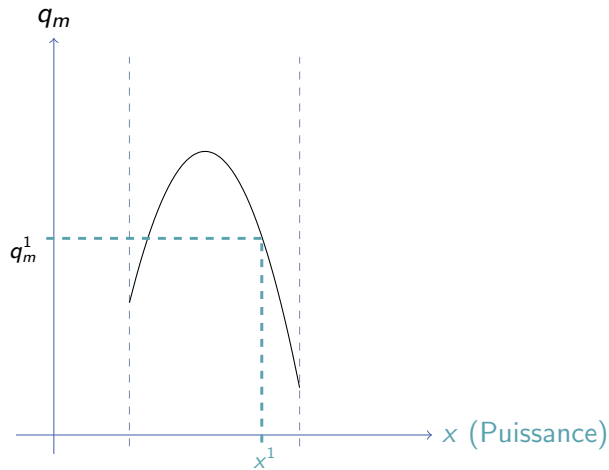
$$\text{sous contraintes} \quad G(x, \bar{y}^i) \leq 0,$$

$$H(x, \bar{y}^i) = 0,$$

$$\underline{q} - q_m(x, \bar{y}^i) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$$

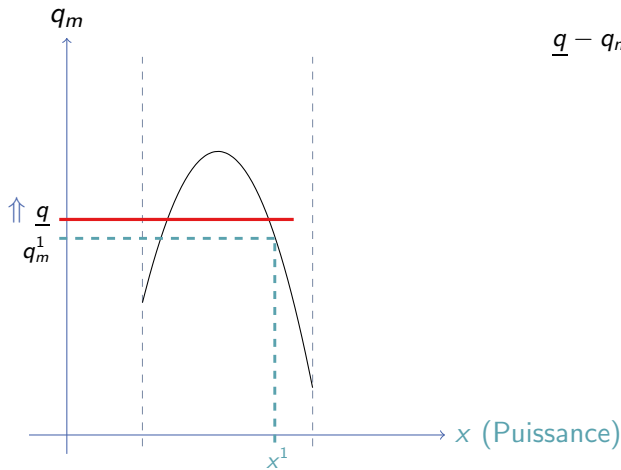
Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)



Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

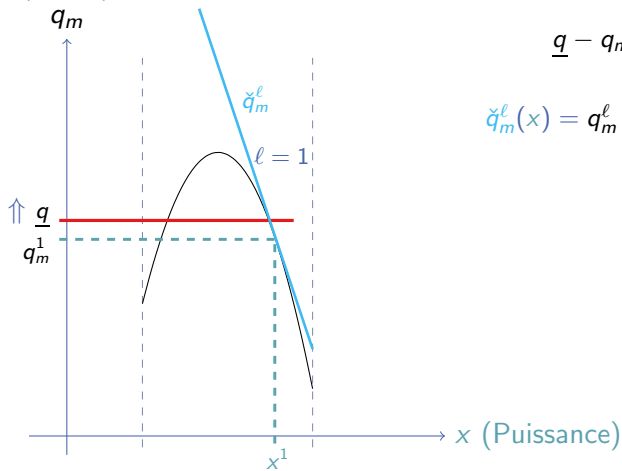
Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)



$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)

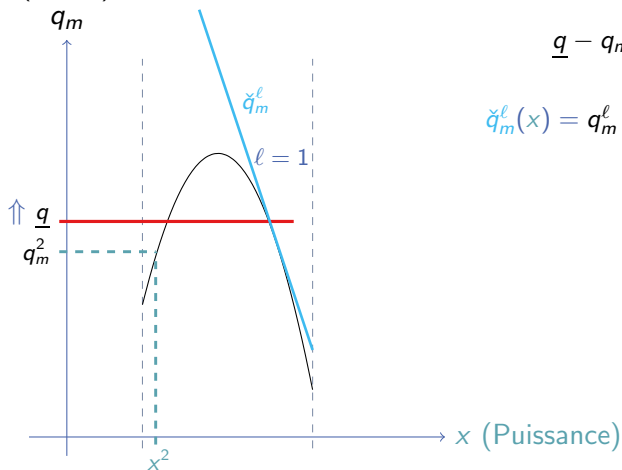


$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

$$\check{q}_m^l(x) = q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle$$

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)

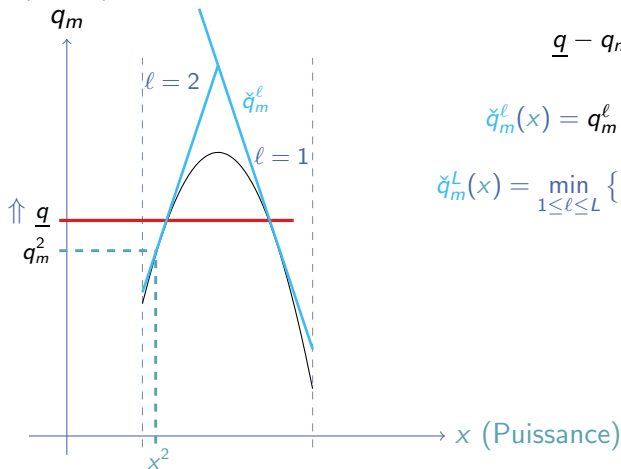


$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

$$\check{q}_m^l(x) = q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle$$

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)



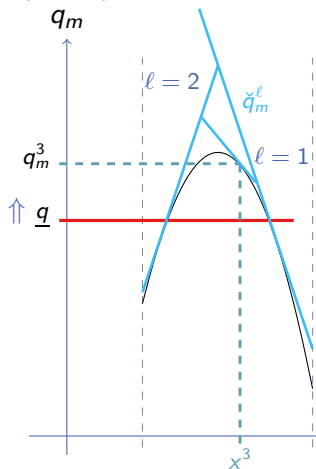
$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

$$\check{q}_m^l(x) = q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle$$

$$\check{q}_m^L(x) = \min_{1 \leq l \leq L} \{ q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle \}$$

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)



$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

$$\check{q}_m^l(x) = q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle$$

$$\check{q}_m^L(x) = \min_{1 \leq l \leq L} \{ q_m^l + \langle s_m^l, x - x^l \rangle \}$$

$$\text{Convergence : } \check{q}_m^L(x^{\ell+1}) - q_m(x^{\ell+1}) \leq \epsilon$$

Estimateur "linéaire" du creux de fréquence

Slave problem

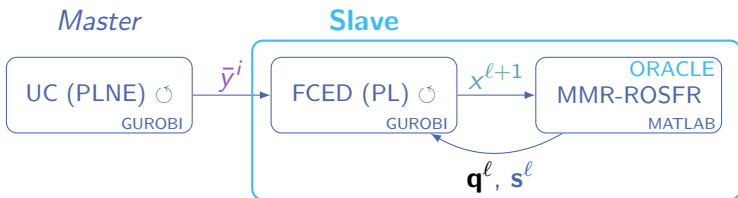
$$\mathcal{V}(y) = \min_{x \in X, w \in Y} f_1(x)$$

$$\text{s.t. } G(x, w) \leq 0,$$

$$H(x, w) = 0,$$

$$\underline{q} - \mathbf{q}_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i) - \langle \mathbf{s}_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i), x - x^\ell \rangle \leq 0, \quad \forall \ell = 1 \dots L, \forall m = 1, \dots, M,$$

$$w = \bar{y}^i.$$



Slave problem

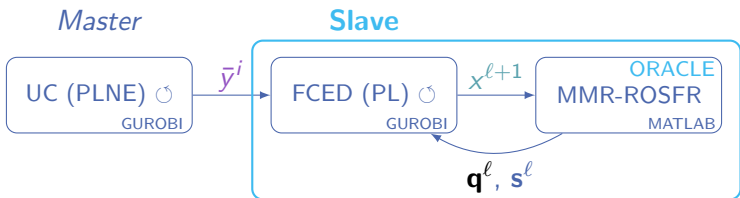
$$\mathcal{V}(y) = \min_{x \in X, w \in Y} f_1(x)$$

$$\text{s.t. } G(x, w) \leq 0,$$

$$H(x, w) = 0,$$

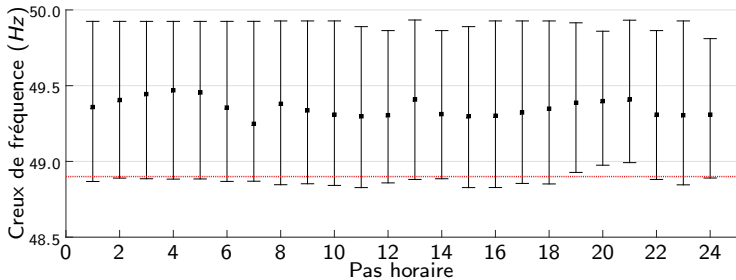
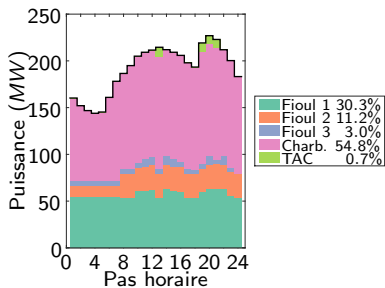
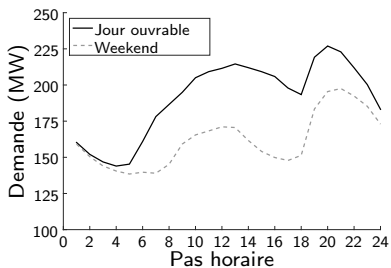
$$\underline{q} - q_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i) - \langle s_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i), x - x^\ell \rangle \leq 0, \quad \forall \ell = 1 \dots L, \forall m = 1, \dots, M,$$

$$\lambda^* \leftarrow w = \bar{y}^i.$$

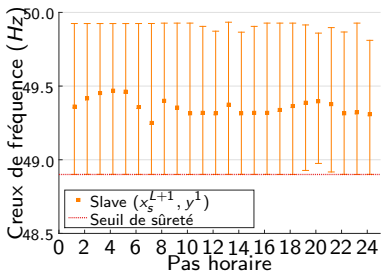
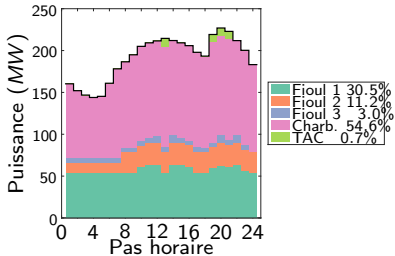
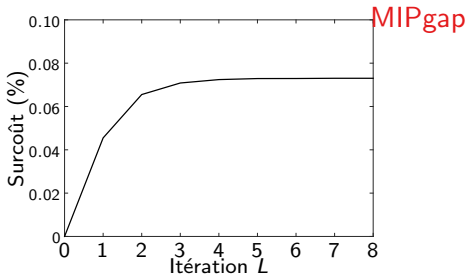
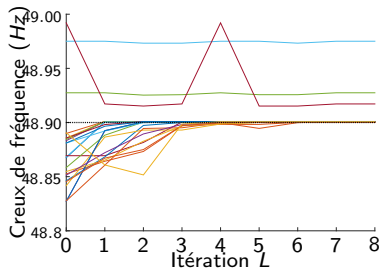


Convergence: $\check{q}_m^L(x^{\ell+1}) - q_m(x^{\ell+1}) \leq \epsilon \Rightarrow (\tilde{x}^i, \mathcal{V}^i, \lambda^i) \parallel \bar{y}^i$ irréalisable

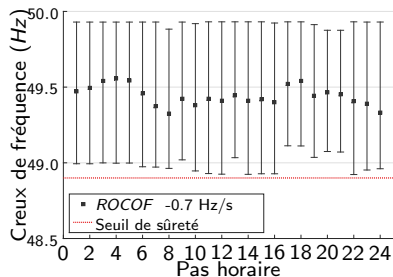
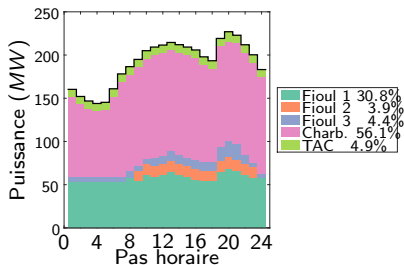
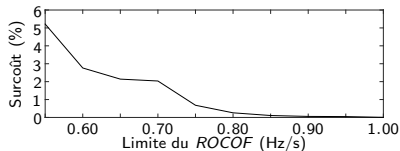
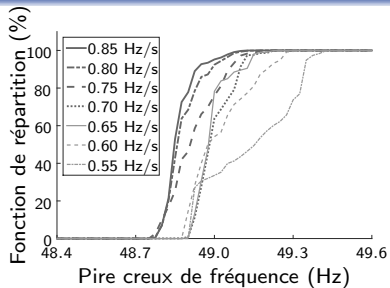
Cas d'étude



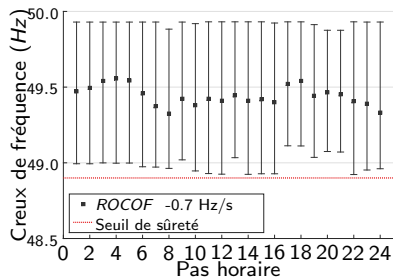
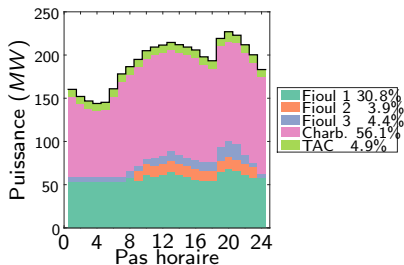
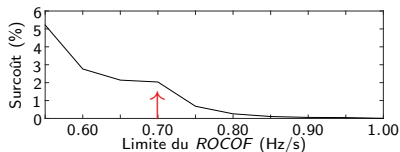
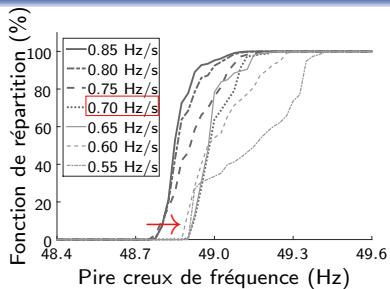
Redispatch du Slave → rapide, optimal et efficace !



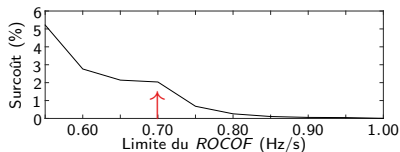
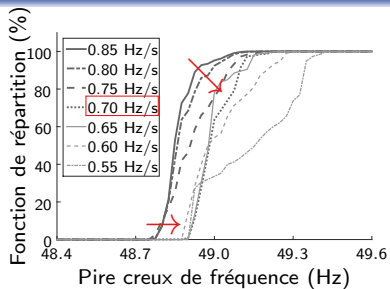
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



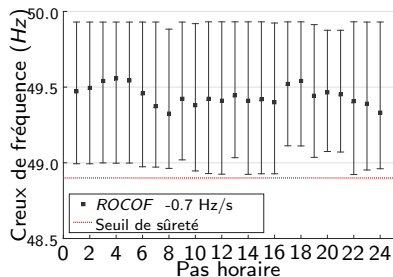
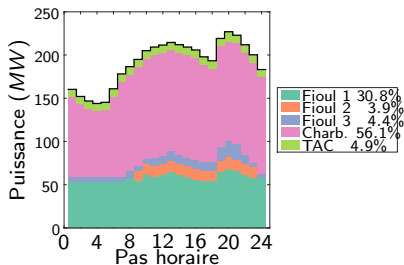
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



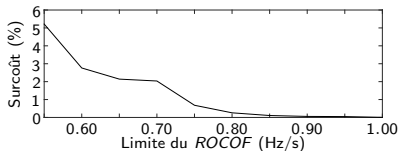
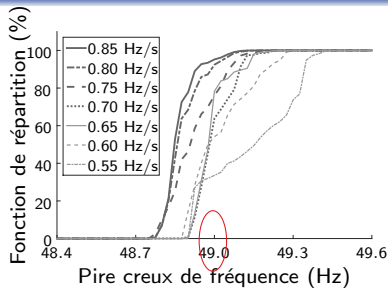
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



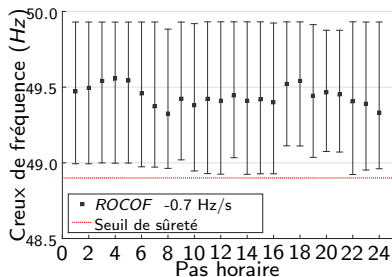
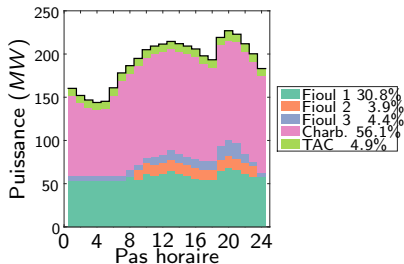
Sous-optimal



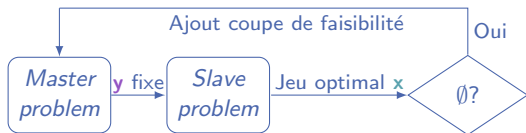
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



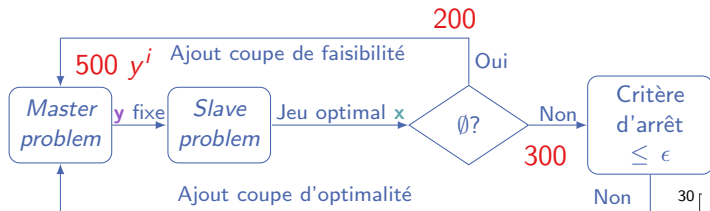
Sous-optimal et inefficace pour
seuil de sûreté plus élevé (49 Hz)



Nouvelle formulation du FCUC avec Benders ($\underline{q} = 49\text{Hz}$)

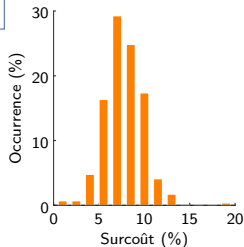


Nouvelle formulation du FCUC avec Benders ($q = 49\text{Hz}$)

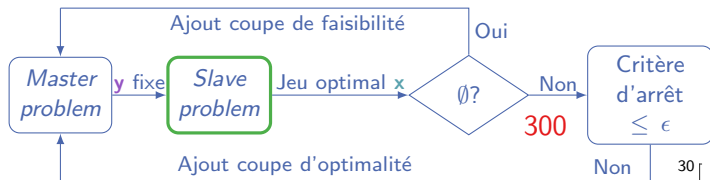


Master → convergence lente

Proposition de nombreux points réalisables



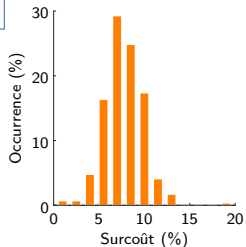
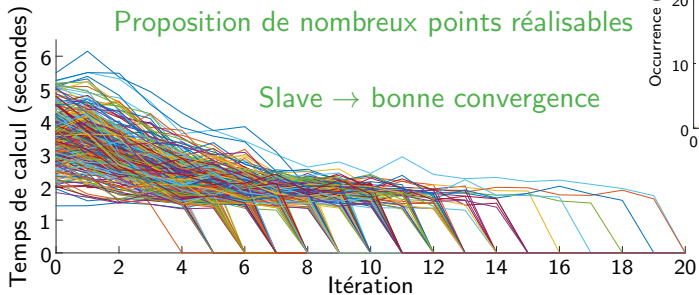
Nouvelle formulation du FCUC avec Benders ($q = 49Hz$)



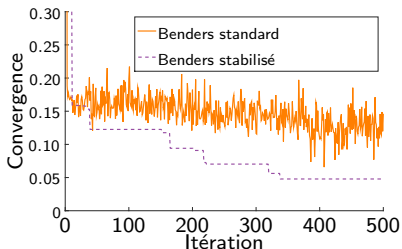
Master → convergence lente

Proposition de nombreux points réalisables

Slave → bonne convergence

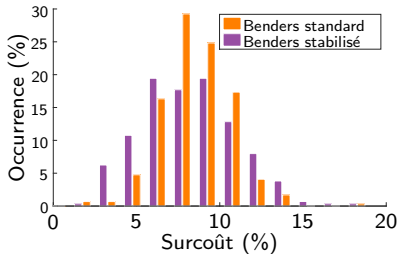
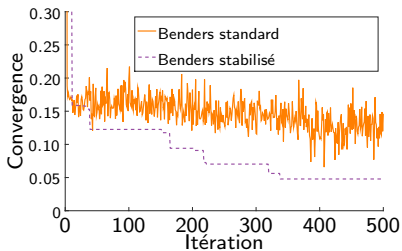


Ouverture vers une amélioration de la convergence



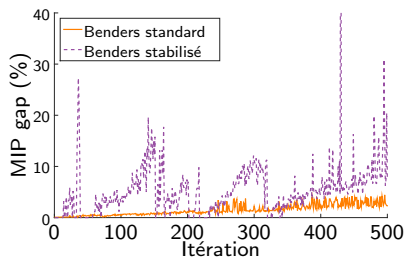
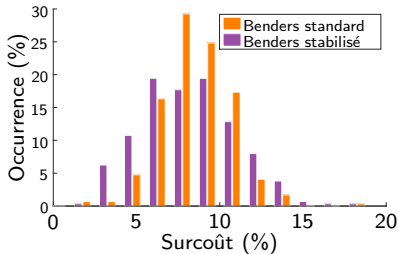
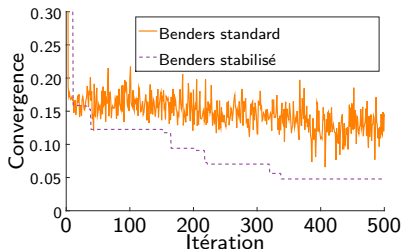
- 1 😊 Stabilisation du critère d'arrêt.

Ouverture vers une amélioration de la convergence



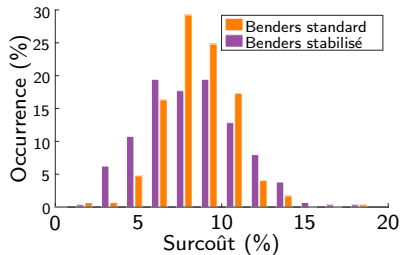
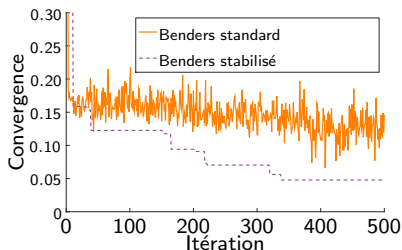
- 1 😊 Stabilisation du critère d'arrêt.
- 2 😊 Qualité accrue des solutions.

Ouverture vers une amélioration de la convergence



- 1 😊 Stabilisation du critère d'arrêt.
- 2 😊 Qualité accrue des solutions.
- 3 😞 Comportement chaotique du *MIPgap*.

Ouverture vers une amélioration de la convergence



Objectif 4 : Proposition d'une formulation du problème FCUC compatible avec les **contraintes opérationnelles** ✗, tenant compte de la **dynamique du système** ✓, et capable d'assurer l'**optimalité** ✓.

Vitesse de convergence de l'outil à améliorer.

Plan de la présentation

- 1 Modélisation
- 2 Intégration des EnR
- 3 Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
- 5 Conclusions
 - Conclusions
 - Perspectives

Conclusions



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Conclusions



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Modèle flexible

Conclusions



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Hypothèses de concavité Modèle flexible
Bonne convergence

Conclusions



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Définition de coupes
Formulation convexe
Convergence lente

Hypothèses de concavité
Bonne convergence

Modèle flexible

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Pas variable
Parallélisation

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Pas variable
Parallélisation

Industrialisation pour des petits systèmes.

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Pas variable
Parallélisation

Industrialisation pour des petits systèmes.

Exploitation du savoir faire pour étudier l'impact
des EnR intermittentes dans les grands systèmes.



Stabilité du réseau électrique de distribution

**Analyse du point de vue
automatique d'un système
complexe**

Enjeux des travaux de thèse

Soirée des doctorants IEEE

**Vincent Gabrion, Gilles Malarange
EDF R&D / Département EFESE**

31 mars 2016



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

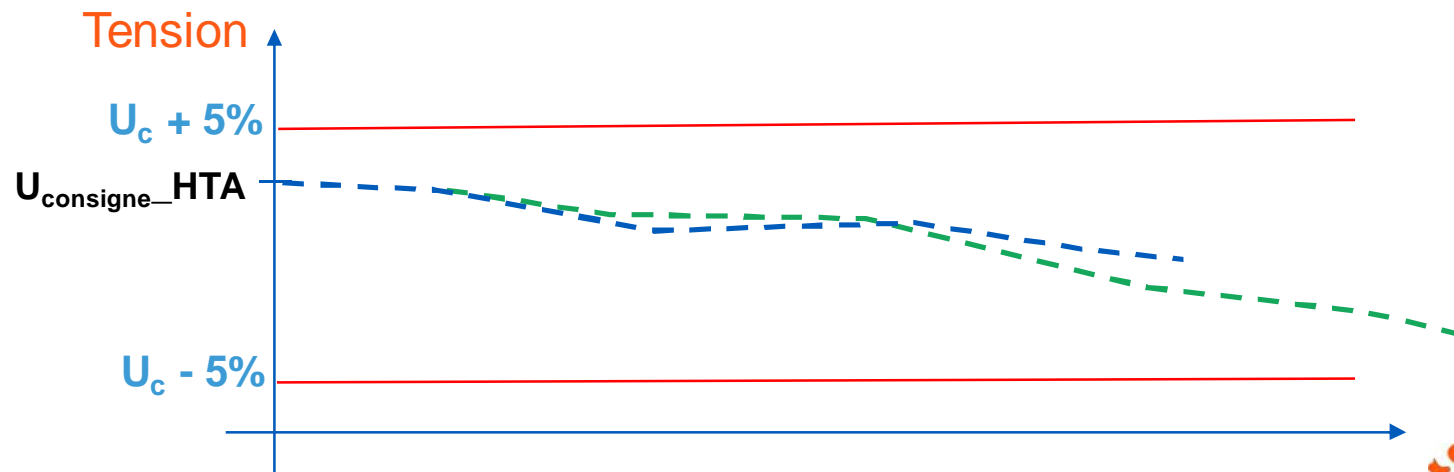
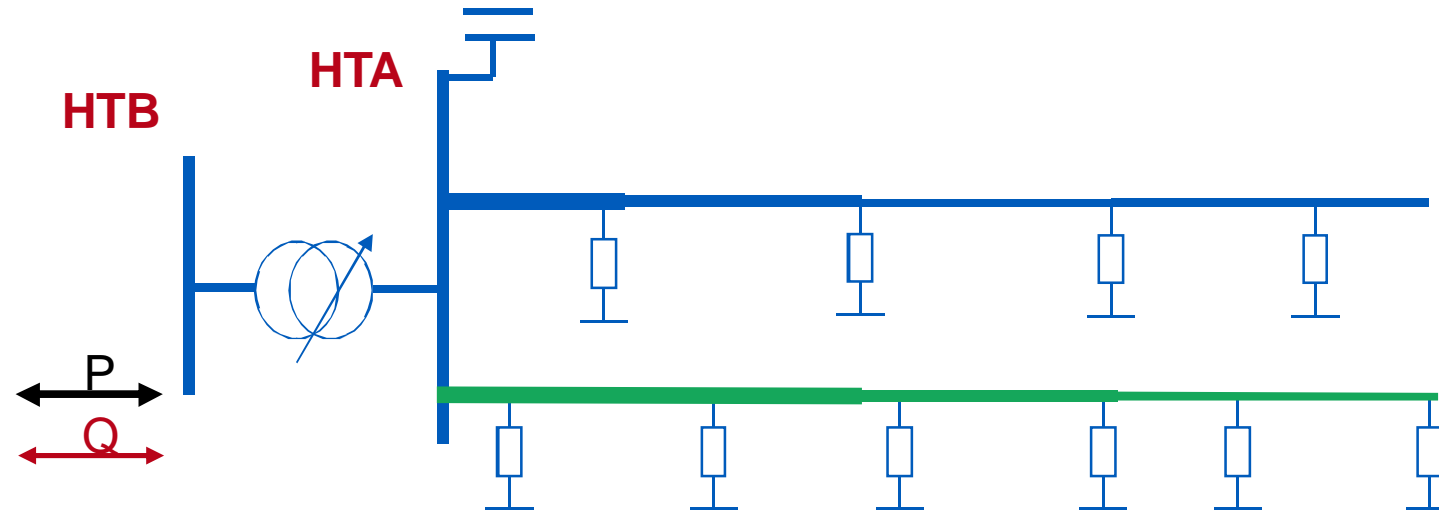
Développement soutenu de la production renouvelable sur le réseau de distribution

Au 31 décembre 2015 :

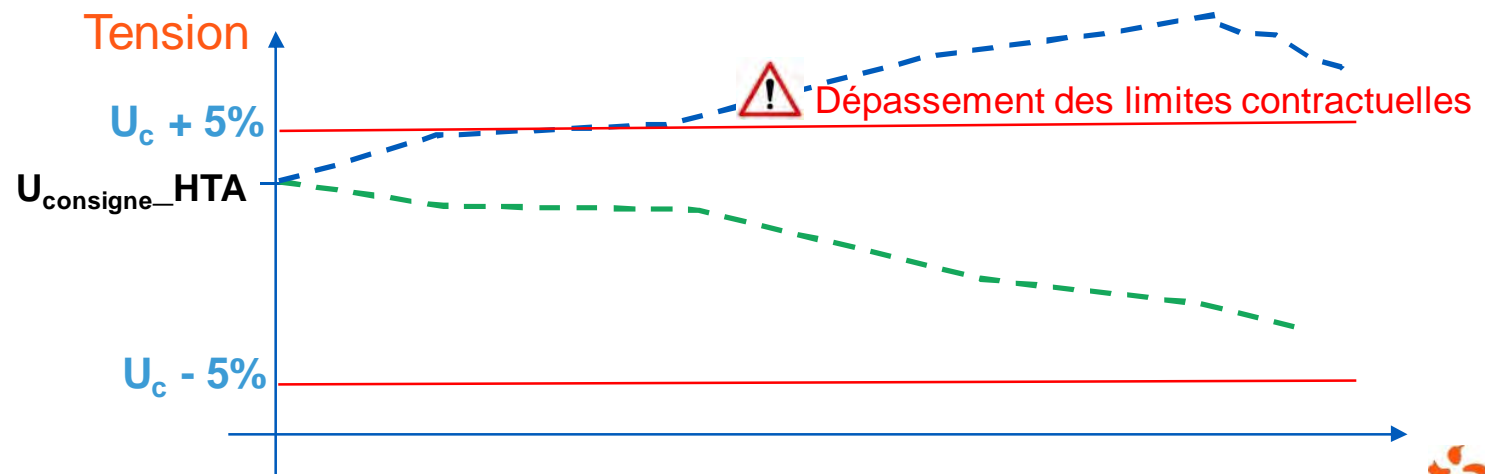
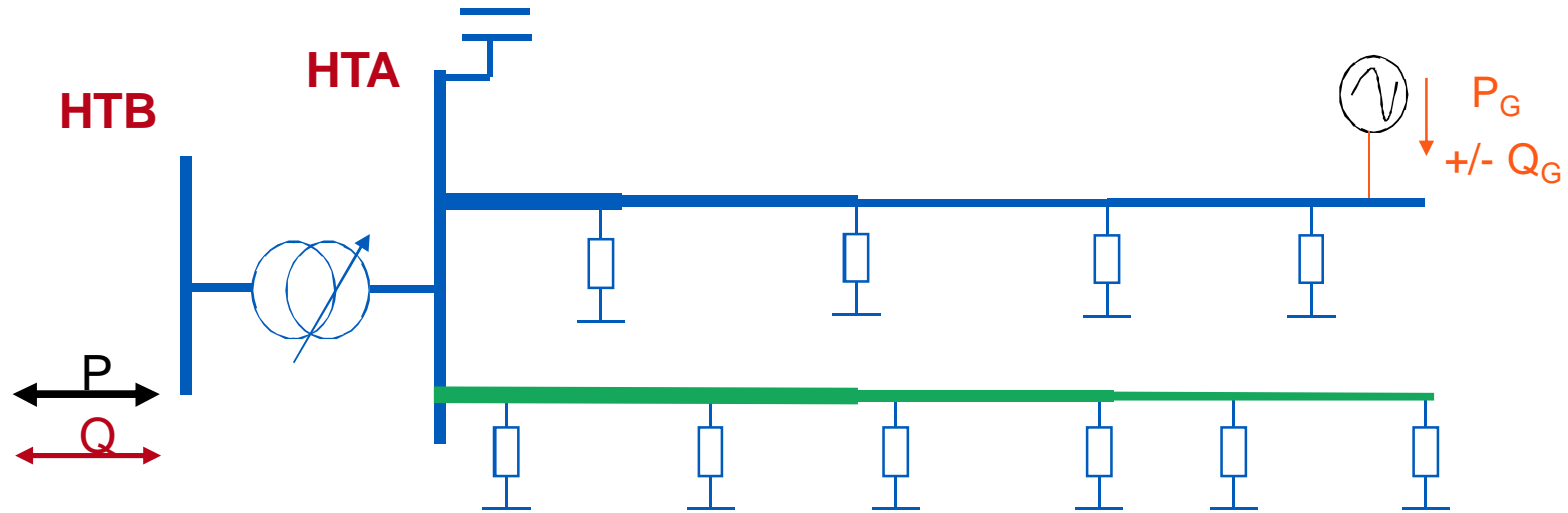
- **16841 MW de production renouvelable raccordés au réseau d'ERDF** sur 43627 MW installés en France dont :
 - 9191 MW d'éolien
 - 5217 MW de solaire
 - 1457 MW d'hydraulique

- **7245 MW de production renouvelable en file d'attente ERDF** sur 13747 MW en France

Impact de la production décentralisée sur le profil de tension HTA



Impact de la production décentralisée sur le profil de tension HTA



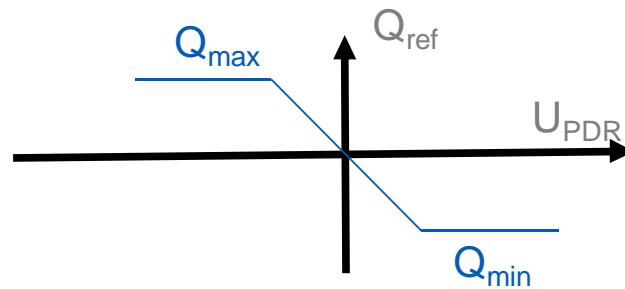
Options pour maîtriser le plan de tension en HTA

- Raccordement des producteurs décentralisés en départ dédié
 - Utilisé pour les gros producteurs
- Absorption/injection locale de réactif par une loi $Q = P \tan \varphi$
 - Solution mise en œuvre sur les installations existantes
- Absorption/injection locale de réactif par une loi $Q = f(U)$
 - Alternative à $Q = P \tan \varphi$ proposée aux producteurs depuis février 2016
- Renforcement du réseau
 - Utilisé lorsque les autres options ne permettent pas de lever les contraintes
- Réglage en dynamique de la consigne de tension au niveau du régleur en charge du poste source
 - En cours d'expérimentation
- Utilisation de batteries
 - En cours d'expérimentation
- Écrêtement de production
 - A l'étude

Régulation locale de tension $Q = f(U)$

Deux options de mise en œuvre :

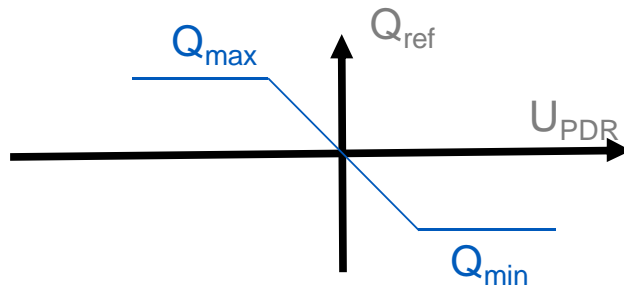
- Sans bande morte



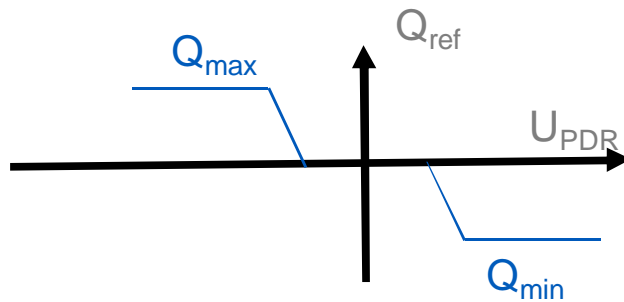
Régulation locale de tension $Q = f(U)$

Deux options de mise en œuvre :

- Sans bande morte

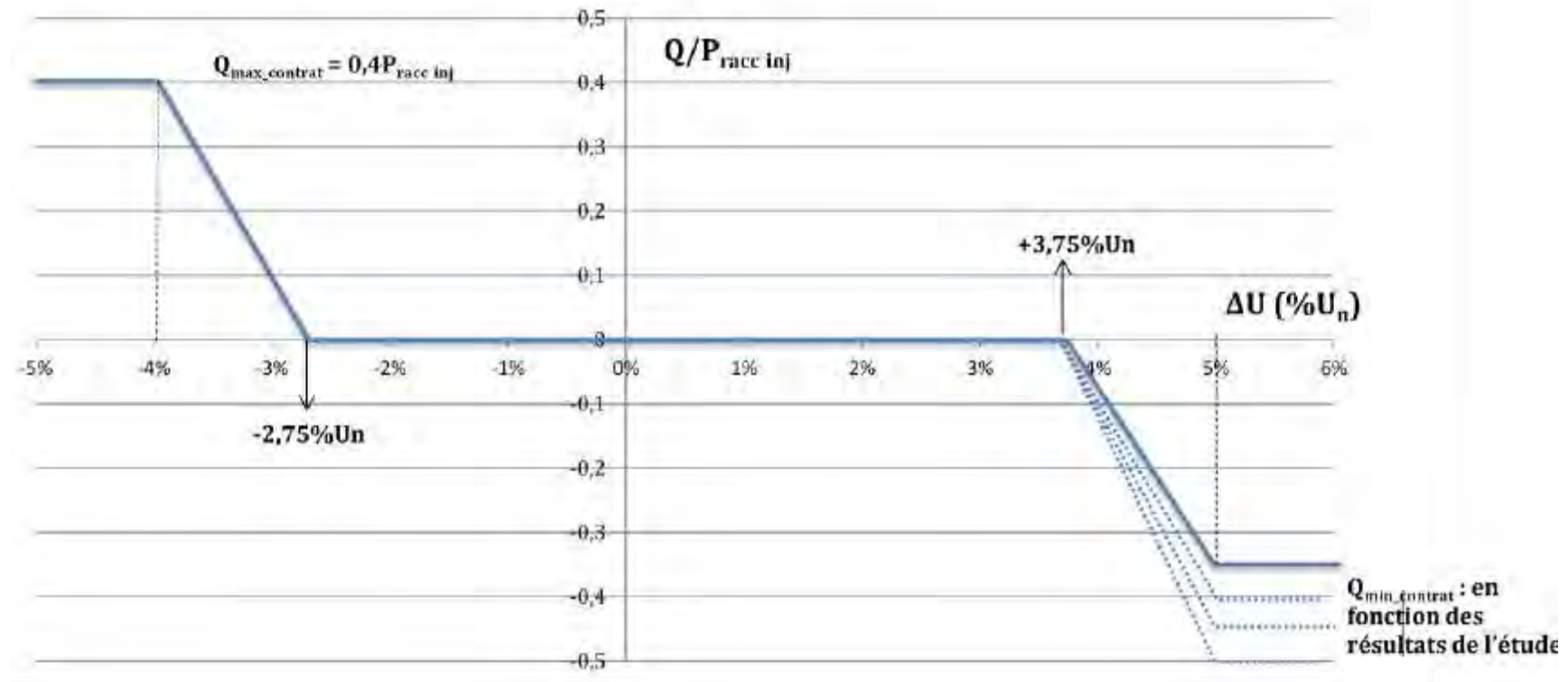


- Avec bande morte



La solution avec bande morte limite la sollicitation de $Q(U)$ et la circulation de puissance réactive sur le réseau

Caractéristiques de Q(U) proposée aux producteurs



(Source : document ERDF PRDE J.4.1.2.3 - 23)

Caractéristiques de Q(U) proposée aux producteurs

Paramétrage recommandé par ERDF :

- temps de réponse de la régulation : 30 secondes
- mesure de la tension toutes les secondes, moyenne glissante 10 secondes
- précision de la régulation : $\pm 5\% P_{\text{racc inj}}$
- envoi d'une consigne en puissance réactive Q_{REF} toutes les secondes
- fonctionnement de la régulation en boucle fermée
- l'arrêt d'une unité de production (ex : un onduleur dans un parc photovoltaïque) ne doit pas impacter le système de régulation.

Impact de Q(U) sur la stabilité du réseau

- Tests réalisés en plein réseau avec 1 et avec 2 producteurs équipés de la régulation Q(U)
- Pas d'instabilité (e.g. pompage) constatée entre 2 régulations ou entre les 2 régulations et le régleur en charge du poste source
- En revanche, nous ne disposons pas de retour sur la stabilité du système en présence de nombreuses régulations Q(U)

Lancement d'une thèse sur le sujet



dans le cadre de

l'institut RISEGRID (EDF/SUPELEC)

Stabilité du réseau de distribution électrique – Analyse du point de vue automatique d'un système complexe

Marjorie COSSON (Oct. 2013 – Oct. 2016)

Soirée des doctorants IEEE PES France

31 Mars 2016



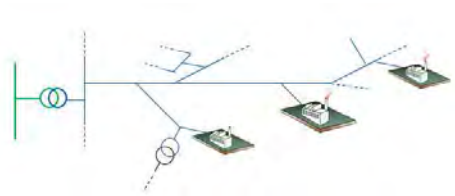
- ① Contexte et objectifs de la thèse
- ② Méthode d'analyse de la stabilité
- ③ Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- ④ Critère général de stabilité
- ⑤ Conclusion et perspectives

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- 5 Conclusion et perspectives

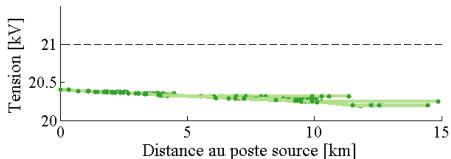
Contexte

Historiquement, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte **plus de 18 GW de production** décentralisée.



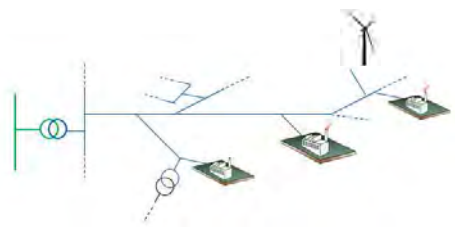
Plan de tension sans producteur



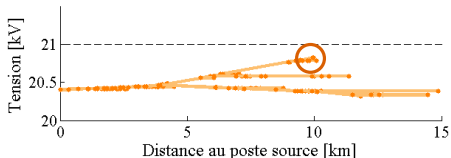
Historiquement, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte **plus de 18 GW de production** décentralisée.

Production décentralisée
⇒
Élévation du plan de tension

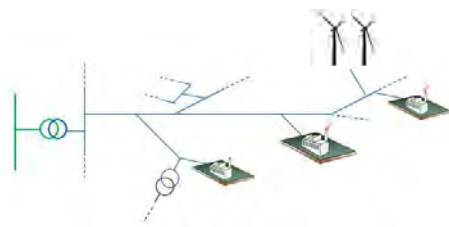


Plan de tension pour un producteur de 3 MW



Historiquement, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

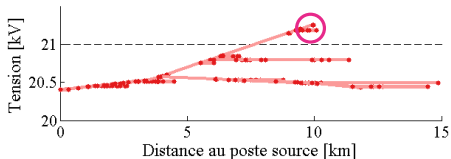
Aujourd'hui, ERDF compte **plus de 18 GW de production** décentralisée.



Production décentralisée
⇒
Élévation du plan de tension

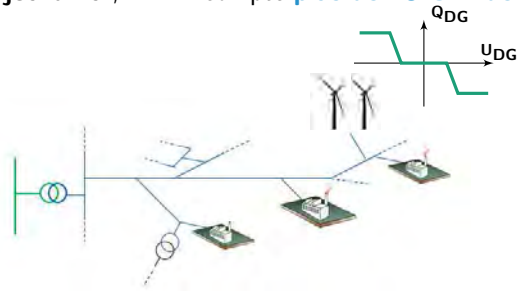
But : Maintenir la qualité de fourniture

Plan de tension pour un producteur de 6 MW



Historiquement, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte **plus de 18 GW de production** décentralisée.

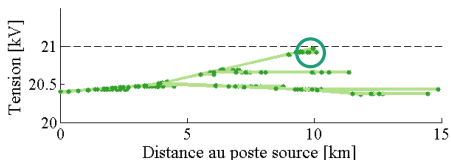


Production décentralisée
⇒
Élévation du plan de tension

But : Maintenir la qualité de fourniture

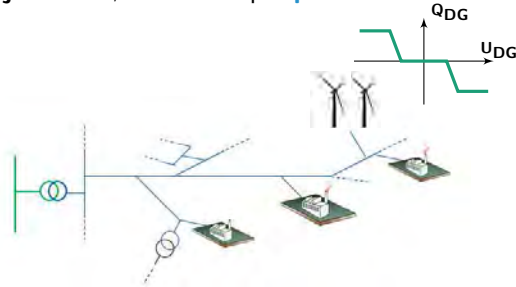
💡 Régulations locales de Q
en fonction de U

Plan de tension pour un producteur de 6 MW



Historiquement, le réseau de distribution ne raccordait quasiment **que de la consommation**.

Aujourd'hui, ERDF compte **plus de 18 GW de production** décentralisée.

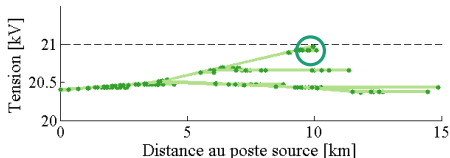


Production décentralisée
⇒
Élévation du plan de tension

But : Maintenir la qualité de fourniture

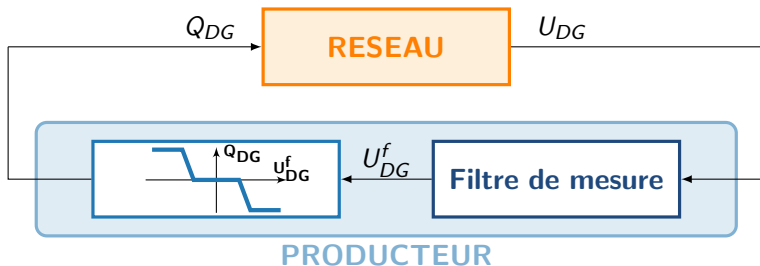
💡 Régulations locales de Q
en fonction de U

Plan de tension pour un producteur de 6 MW

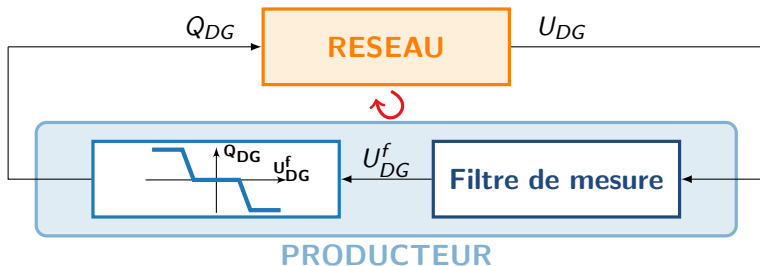


⇒ Ces régulations représentent-elles un risque pour la stabilité des départs ?

Structure des régulations $Q(U)$

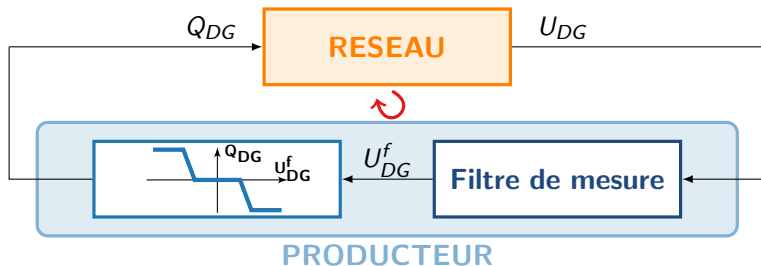


Structure des régulations $Q(U)$

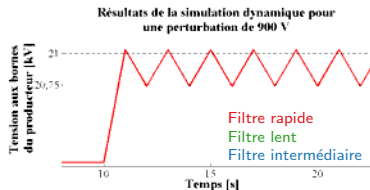


La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système

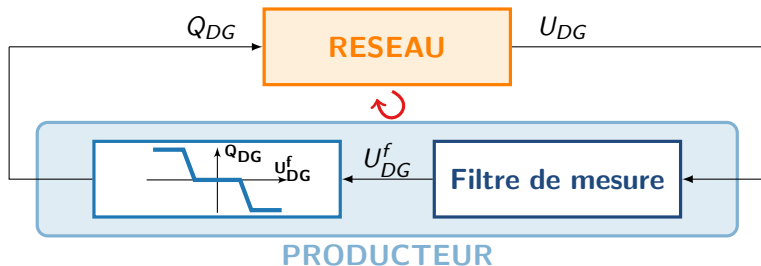
Structure des régulations $Q(U)$



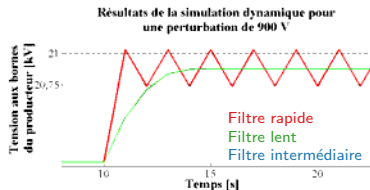
La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système



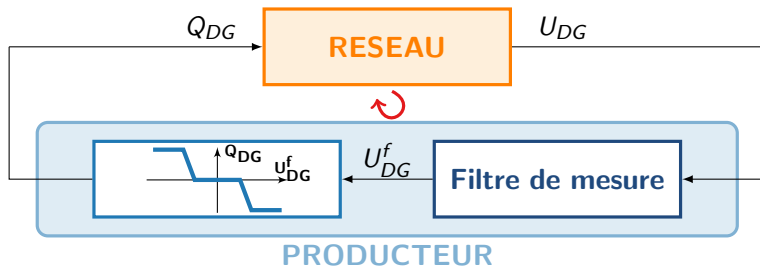
Structure des régulations $Q(U)$



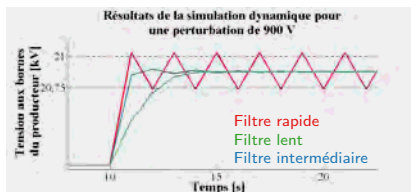
La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système



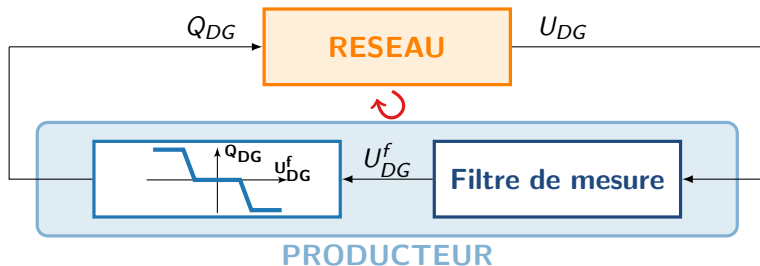
Structure des régulations $Q(U)$



La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système



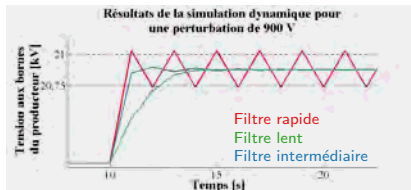
Structure des régulations $Q(U)$



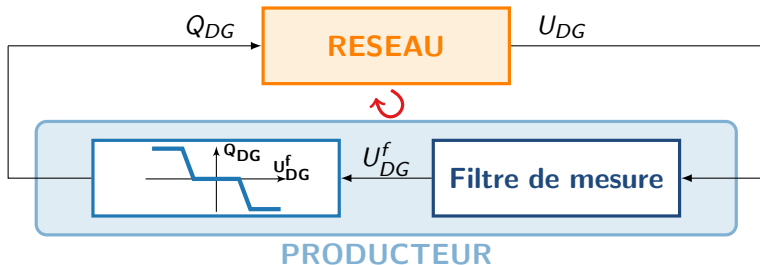
La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système

Conclusion :

Un même réseau peut être **stable ou non** en fonction des **paramètres de sa régulation.**



Structure des régulations $Q(U)$

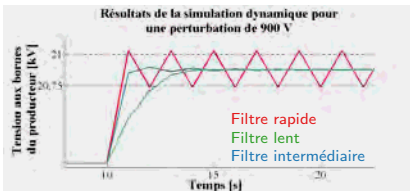


La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système

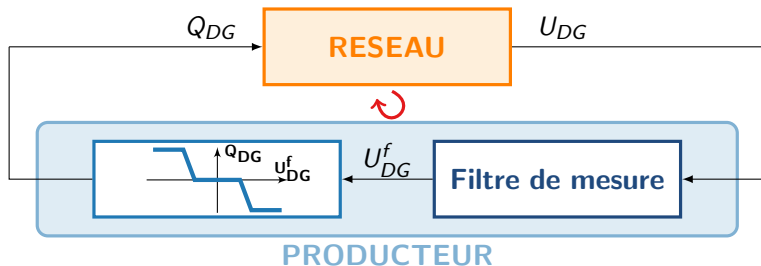
Conclusion :

Un même réseau peut être **stable ou non** en fonction des **paramètres de sa régulation.**

⇒ Comment les choisir ?



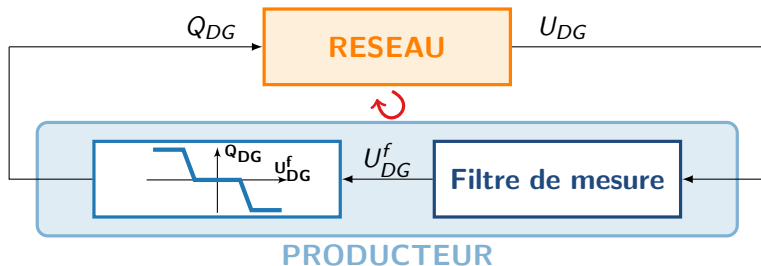
Structure des régulations $Q(U)$



La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système

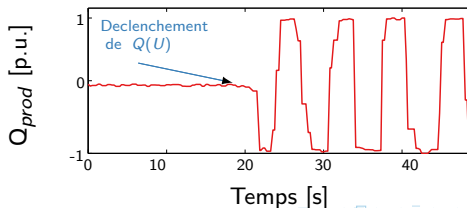
⇒ Et en réalité ?

Structure des régulations $Q(U)$



La régulation $Q(U)$ peut entraîner des risques pour la stabilité du système

⇒ Et en réalité ?



But :

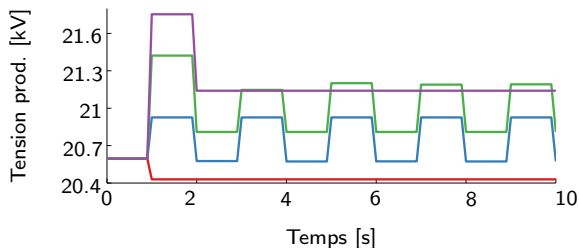
Si le filtre est plus lent que \mathcal{F} (paramètres du réseau),
alors le système est stable.

- 1 Construire une **méthode** d'analyse de la **stabilité** d'un exemple donné,
- 2 Simplifier l'analyse en proposant un **critère explicite de stabilité** d'un exemple donné,
- 3 Établir un **critère général de stabilité** valable dans tous les cas.

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Méthode d'analyse de la stabilité**
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- 5 Conclusion et perspectives

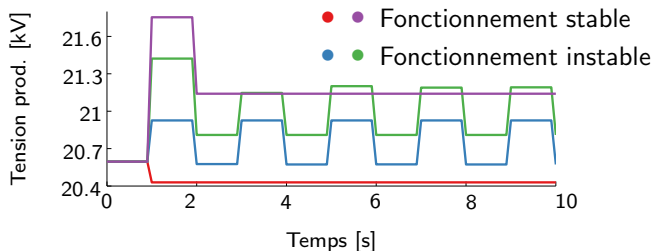
Insuffisance des méthode actuelles

On reprend l'étude empirique précédente pour différentes perturbations :



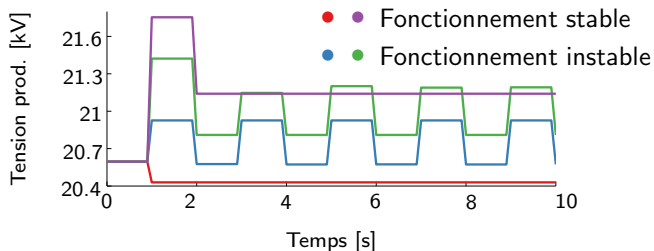
Insuffisance des méthode actuelles

On reprend l'étude empirique précédente pour différentes perturbations :



Insuffisance des méthode actuelles

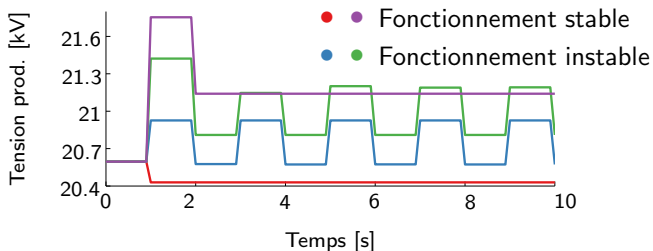
On reprend l'étude empirique précédente pour différentes perturbations :



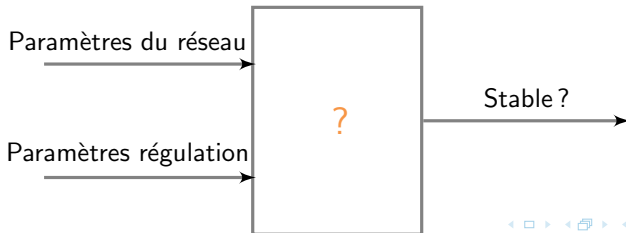
⇒ Une étude formelle de la stabilité est nécessaire

Insuffisance des méthode actuelles

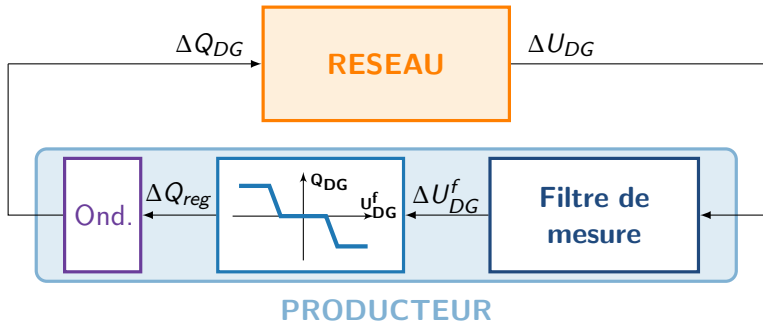
On reprend l'étude empirique précédente pour différentes perturbations :



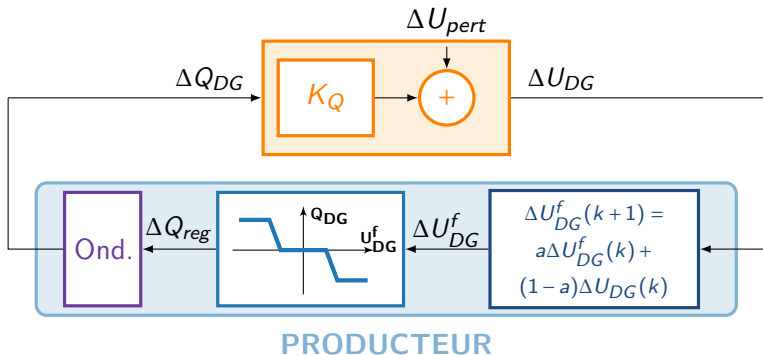
⇒ Une étude formelle de la stabilité est nécessaire



Modélisation du système étudié



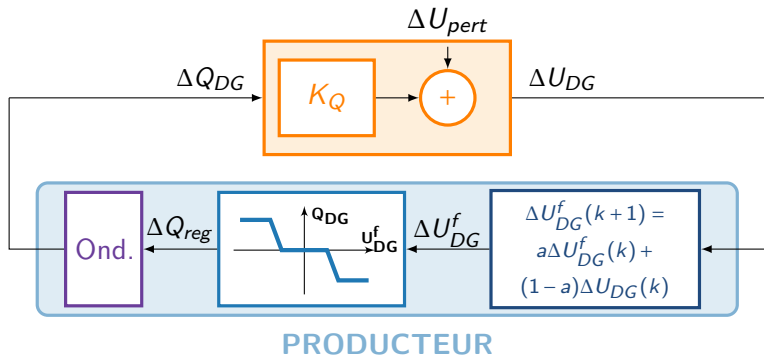
Modélisation du système étudié



Filtre de mesure :

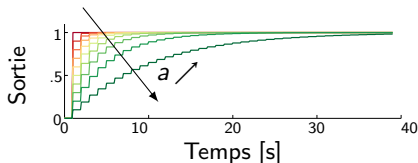
- à temps discret ($T_e = 1s$)
- Ex : Passe-bas 1er ordre
- $a =$ la rapidité ($\Leftrightarrow \tau$)

Modélisation du système étudié

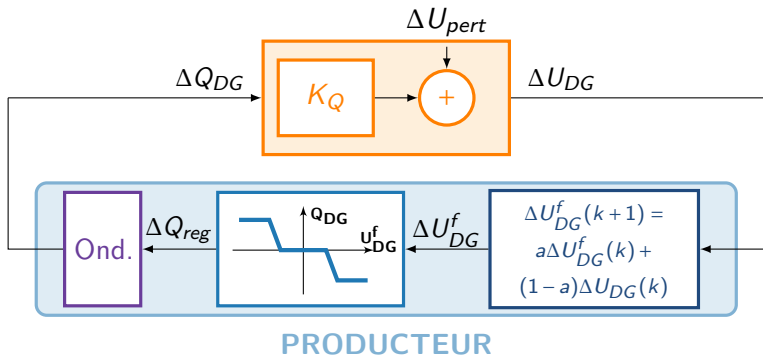


Filtre de mesure :

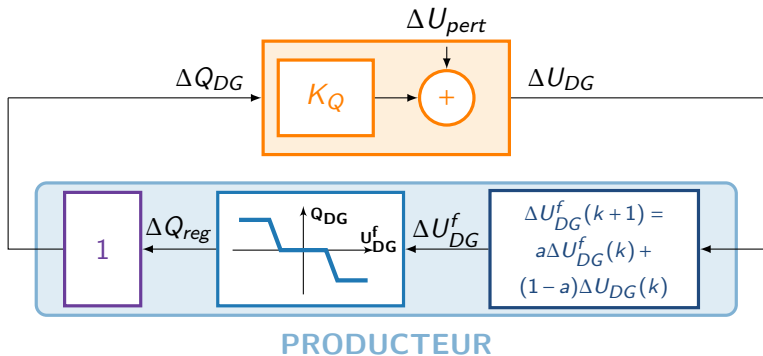
- à temps discret ($T_e = 1s$)
- Ex : Passe-bas 1er ordre
- a = la rapidité ($\Leftrightarrow \tau$)



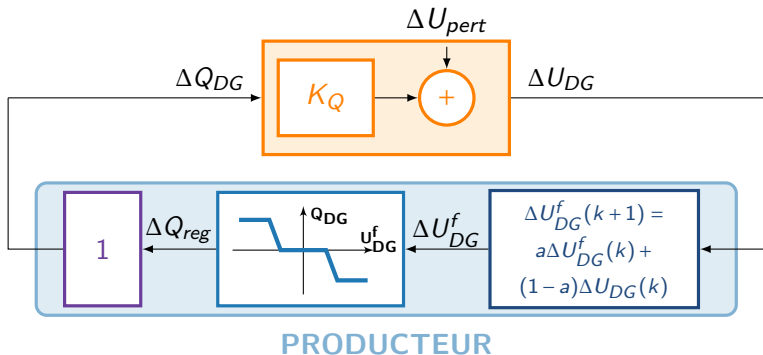
Modélisation du système étudié



Modélisation du système étudié

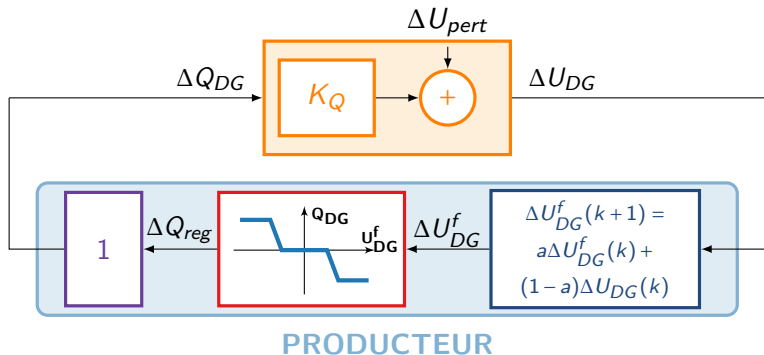


Modélisation du système étudié



Conclusions :

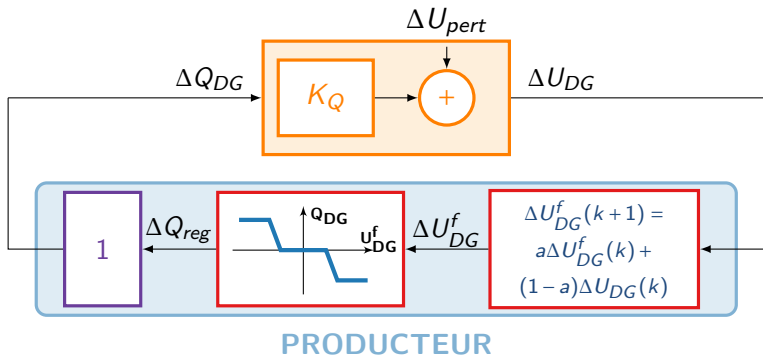
Modélisation du système étudié



Conclusions :

→ Système non-linéaire

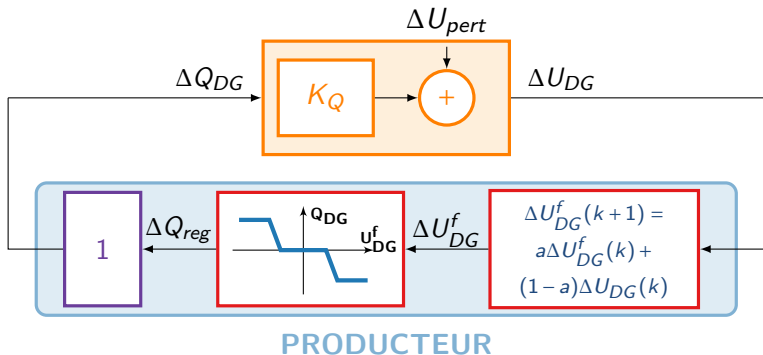
Modélisation du système étudié



Conclusions :

- Système non-linéaire
- Système hybride

Modélisation du système étudié



Conclusions :

- Système non-linéaire
- Système hybride

⇒ **Comment en étudier la stabilité ?**

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

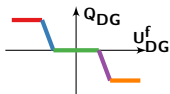
Construire l'abstraction discrète du système ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

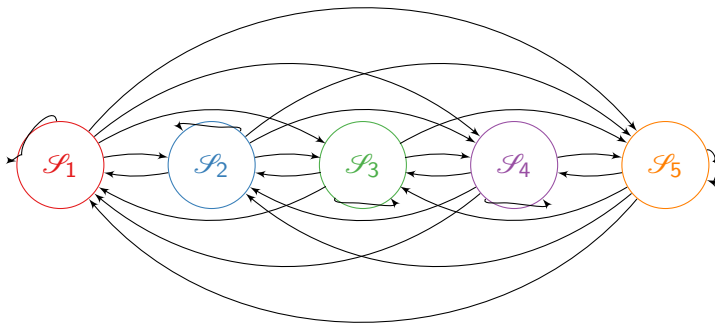
Construire l'abstraction discrète du système ...



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

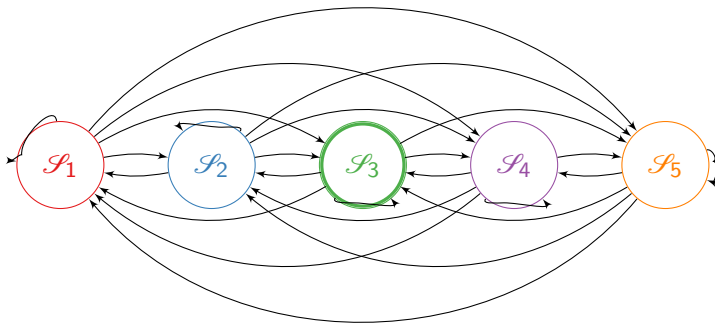


[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

Affiner la partition de l'espace d'état ...

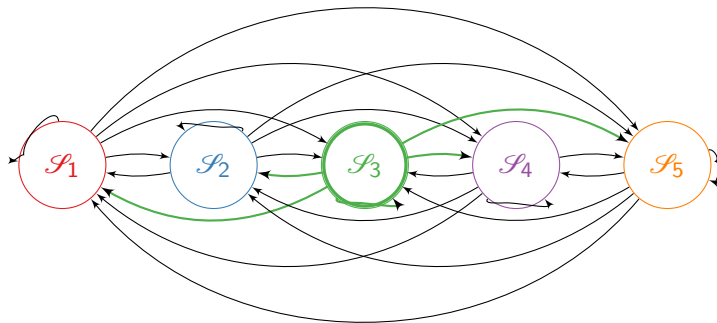


[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

Affiner la partition de l'espace d'état ...

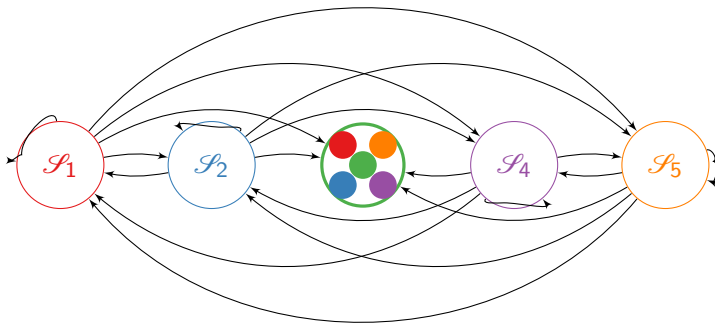


[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

Affiner la partition de l'espace d'état ...

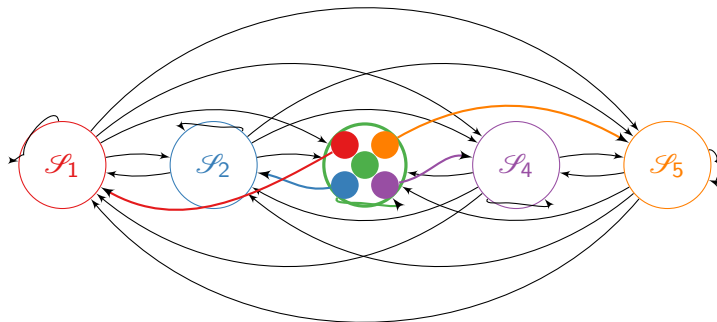


[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

Affiner la partition de l'espace d'état ...

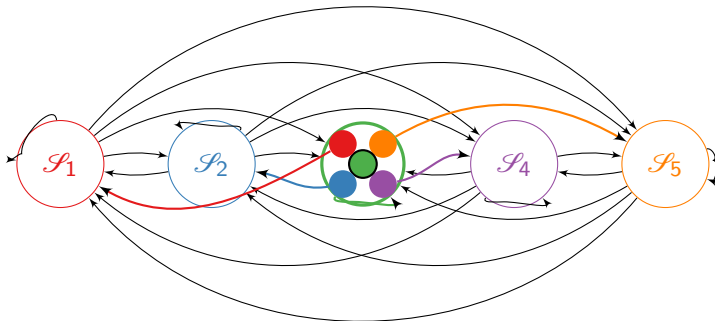


[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

Affiner la partition de l'espace d'état ...



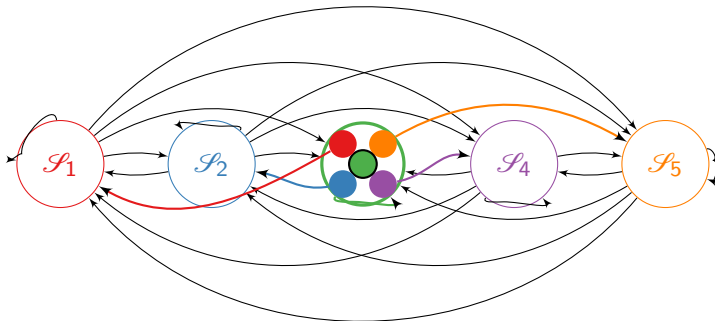
[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Approche proposée pour l'étude de la stabilité

Construire l'abstraction discrète du système ...

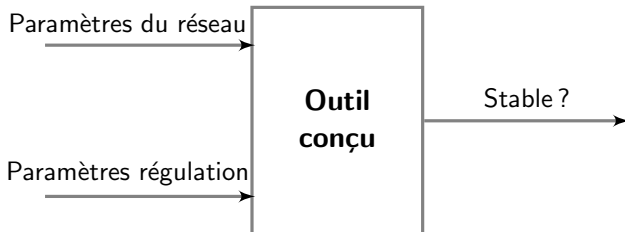
Affiner la partition de l'espace d'état ...

Jusqu'à ce que tous les modes n'aient qu'une seule destination.



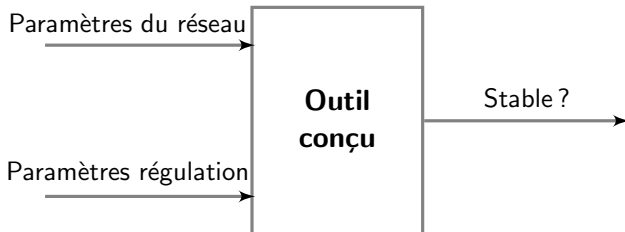
[2] M. Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA

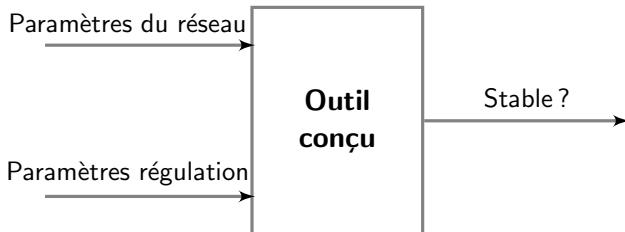


Adapté quels que soient le nombre de producteurs, leur filtre, etc.



Long et complexe

Conclusion sur l'analyse formelle de la stabilité



[2] M.Cosson et al, "Stability Analysis by means of Discrete Abstraction. Application to Voltage Stability of Distributed Generators", présenté à ADHS 2015, Atlanta, USA



Adapté quels que soient le nombre de producteurs, leur filtre, etc.



Long et complexe

⇒ **Comment généraliser les résultats dans des cas simples ?**

$$\mathcal{F}(\text{paramètres du réseau et de la régulation}) > 0$$
$$\Rightarrow$$
$$\text{Stable}$$

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur**
- 4 Critère général de stabilité
- 5 Conclusion et perspectives

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

$$\frac{1}{1 + \tau p} \Leftrightarrow \Delta U_{DG_{k+1}}^f = a \Delta U_{DG_k}^f + (1 - a) \Delta U_{DG_k}$$

Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Paramètres du système :

| Nom | Signification physique |
|----------|---------------------------------|
| K_Q | ~ distance Producteur ↔ PS. |
| α | ~ pouvoir réglant du producteur |
| a | ~ la rapidité du filtre |

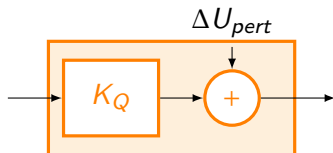
Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Paramètres du système :



| Nom | Signification physique |
|----------|---------------------------------|
| K_Q | ~ distance Producteur ↔ PS. |
| α | ~ pouvoir réglant du producteur |
| a | ~ la rapidité du filtre |

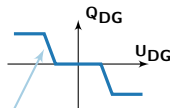
Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Paramètres du système :



| Nom | Signification physique |
|----------|---------------------------------|
| K_Q | ~ distance Producteur ↔ PS. |
| α | ~ pouvoir réglant du producteur |
| a | ~ la rapidité du filtre |

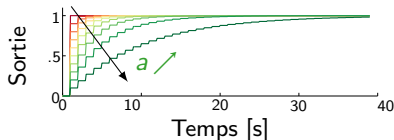
Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Paramètres du système :



| Nom | Signification physique |
|----------|---------------------------------|
| K_Q | ~ distance Producteur ↔ PS. |
| α | ~ pouvoir réglant du producteur |
| a | ~ la rapidité du filtre |

Critère de stabilité

But : Dégager des règles simplifiées de calcul des paramètres de $Q(U)$ pour faciliter les études de raccordement.

Hypothèses simplificatrices :

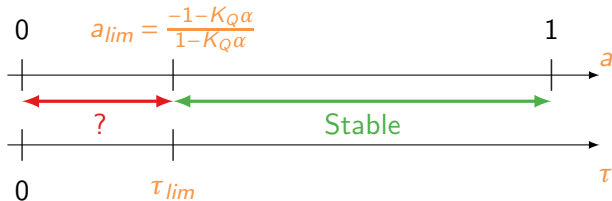
- un seul producteur
- filtre passe-bas du 1er ordre

Paramètres du système :

| Nom | Signification physique |
|----------|---------------------------------|
| K_Q | ~ distance Producteur ↔ PS. |
| α | ~ pouvoir réglant du producteur |
| a | ~ la rapidité du filtre |

Critères de réglage du filtre

Critère de réglage du filtre :



Conclusion :

Si le filtre est suffisamment lent

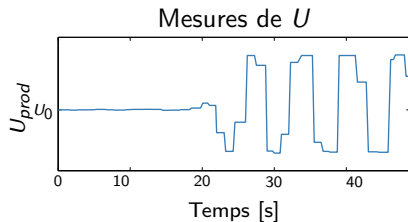
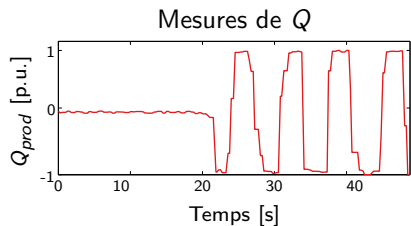
$$\tau > \tau_{lim}$$

\Rightarrow

Le système est stable

Application à l'exemple réel

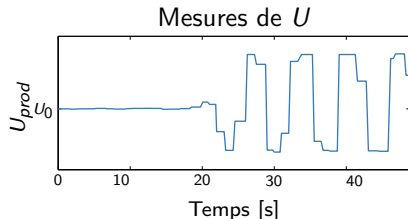
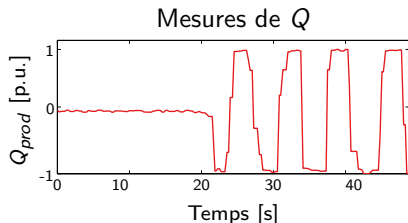
En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.



Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

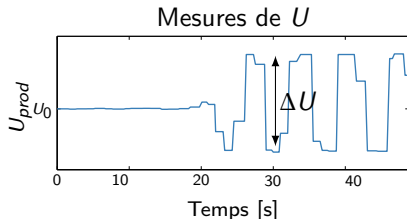
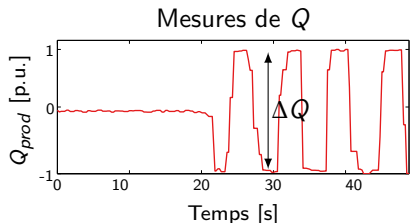
⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie ?



Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie ?

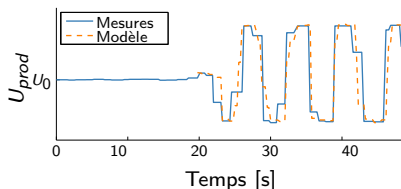


$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie ?

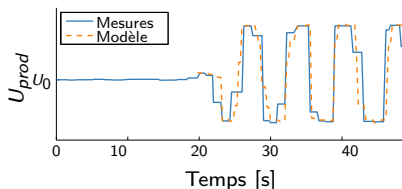


$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

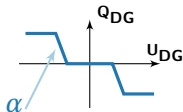
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie ?



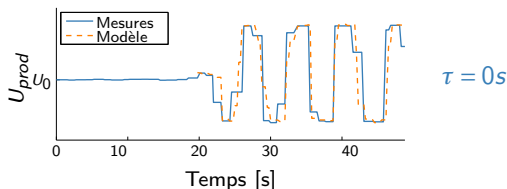
$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



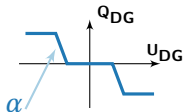
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie ?



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

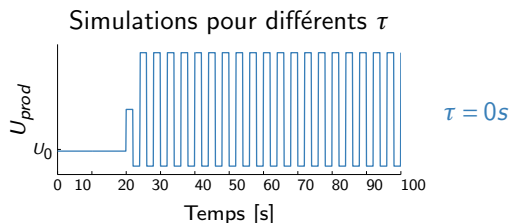


$$\tau_{lim} = 13s$$

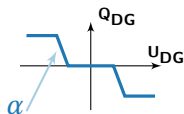
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est il conforme à la théorie ?



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



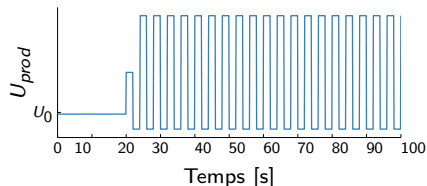
$$\tau_{lim} = 13s$$

Application à l'exemple réel

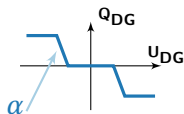
En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? **OUI**

Simulations pour différents τ



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$

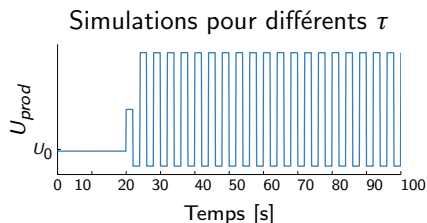


$$\tau_{lim} = 13s$$

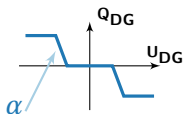
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? **OUI**
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système?



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13s$$

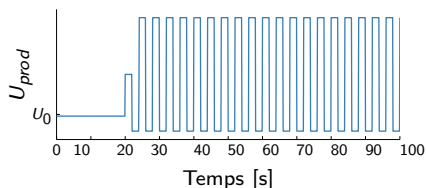
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

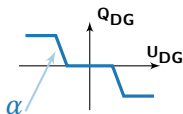
⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI

⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$

Simulations pour différents τ



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13s$$

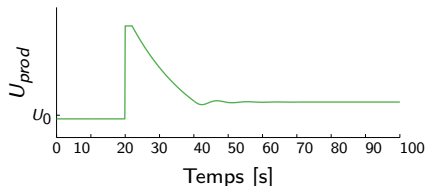
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI

⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$

Simulations pour différents τ



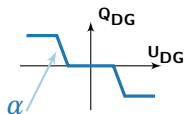
$\tau = 20s$

$\tau = 14s$

$\tau = 12s$

$\tau = 5s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13s$$

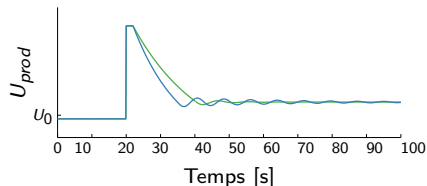
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI

⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$

Simulations pour différents τ



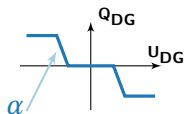
$\tau = 20$ s

$\tau = 14$ s

$\tau = 12$ s

$\tau = 5$ s

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13\text{s}$$

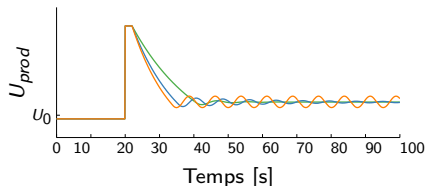
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI

⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$

Simulations pour différents τ



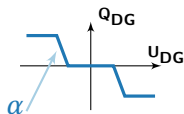
$\tau = 20$ s

$\tau = 14$ s

$\tau = 12$ s

$\tau = 5$ s

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13\text{s}$$

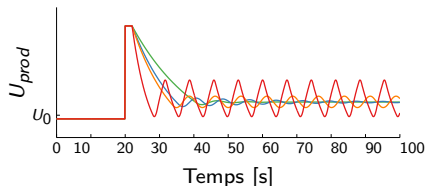
Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI

⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$

Simulations pour différents τ



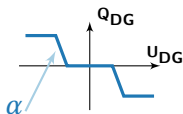
$\tau = 20$ s

$\tau = 14$ s

$\tau = 12$ s

$\tau = 5$ s

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



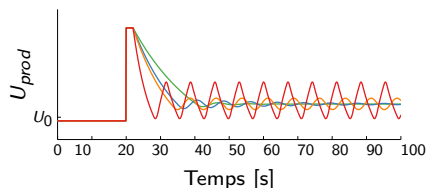
$$\tau_{lim} = 13\text{s}$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique?

Simulations pour différents τ



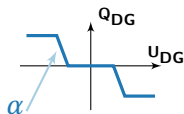
$\tau = 20$ s

$\tau = 14$ s

$\tau = 12$ s

$\tau = 5$ s

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



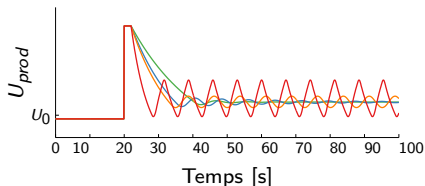
$$\tau_{lim} = 13\text{s}$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? **OUI**
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$

Simulations pour différents τ



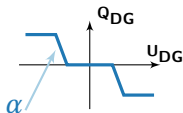
$\tau = 20s$

$\tau = 14s$

$\tau = 12s$

$\tau = 5s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



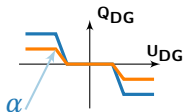
$$\tau_{lim} = 13s$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



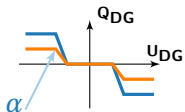
$$\tau_{lim} = 13s$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$

$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13s$$

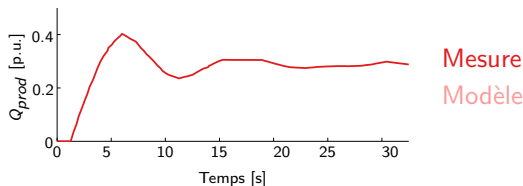
$$\tau_{lim} = 3s$$

Application à l'exemple réel

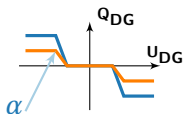
En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? **OUI**
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$

Profils de Q pour $\tau = 6s$



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



$$\tau_{lim} = 13s$$

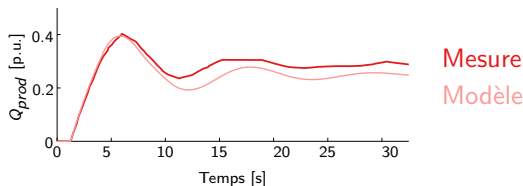
$$\tau_{lim} = 3s$$

Application à l'exemple réel

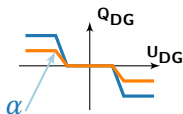
En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? **OUI**
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$

Profils de Q pour $\tau = 6s$



$$K_Q = 17 \text{ V/kVAr}$$



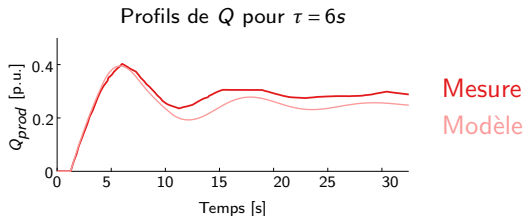
$$\tau_{lim} = 13s$$

$$\tau_{lim} = 3s$$

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$



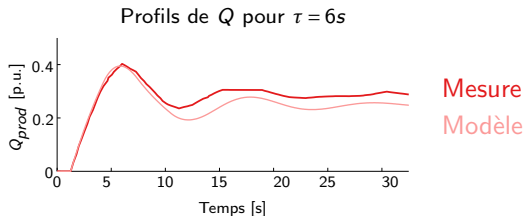
Conclusion :

Le critère est validé sur un exemple.

Application à l'exemple réel

En pratique, sans filtre de mesure, le système est instable.

- ⇒ Ce comportement est-il conforme à la théorie? OUI
- ⇒ Comment assurer la stabilité du système? $\tau > \tau_{lim}$
- ⇒ Qu'a-t-on fait en pratique? $\alpha \searrow$ et $\tau = 6s$



Conclusion :

Le critère est validé sur un exemple.

⇒ Et à N producteurs ?

Et à plusieurs producteurs ?



Stable



Stable



Stable

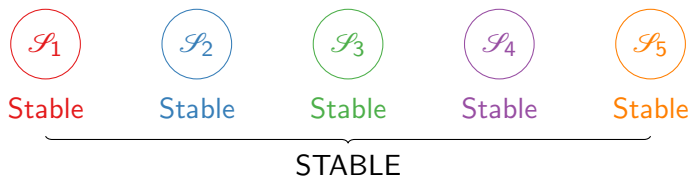


Stable

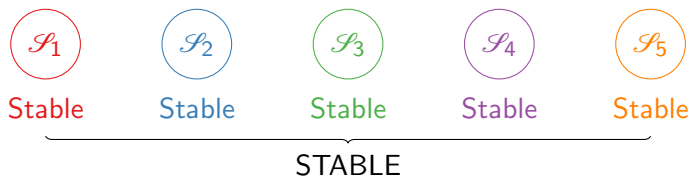


Stable

Et à plusieurs producteurs ?



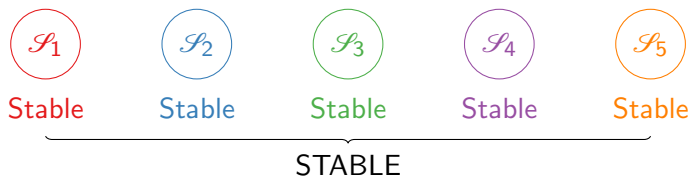
Et à plusieurs producteurs ?



Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

Toutes les dynamiques linéaires sont stables \implies Le système est stable

Et à plusieurs producteurs ?



Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

Toutes les dynamiques linéaires sont stables \implies Le système est stable

Démonstration : ???

Et à plusieurs producteurs ?



Conjecture : Le critère à un producteur peut s'étendre à N producteurs

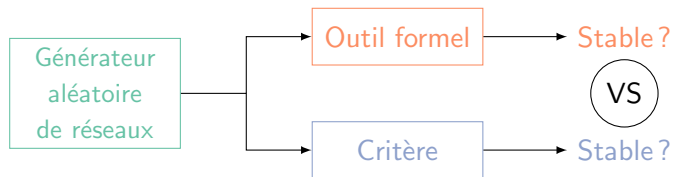
Toutes les dynamiques linéaires sont stables \implies Le système est stable

Démonstration : ???

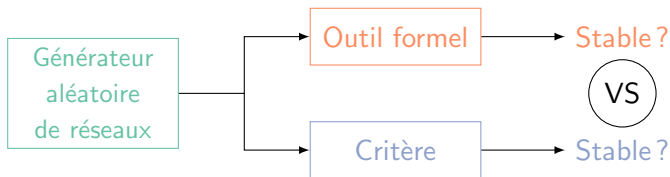


Faire une étude statistique

Et à plusieurs producteurs : Faire une étude statistique

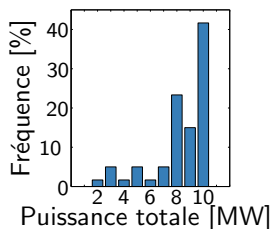
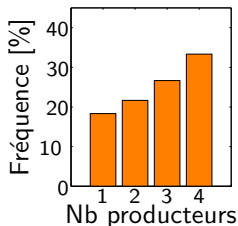


Et à plusieurs producteurs : Faire une étude statistique

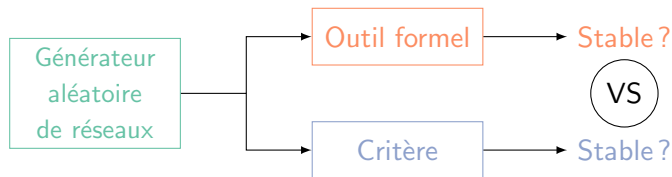


Quelques détails sur les scénarios :

60 scénarios chacun testés avec 6 réglages de filtre



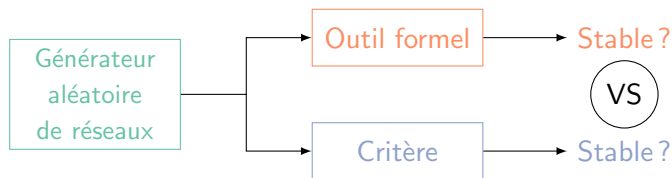
Et à plusieurs producteurs : Faire une étude statistique



Conclusion :

100%
Critère stable \Rightarrow Système stable
Critère instable \Rightarrow Système instable
87.4%

Et à plusieurs producteurs : Faire une étude statistique

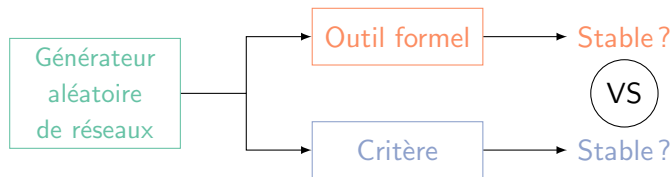


Conclusion :

100%
Critère stable \Rightarrow Système stable
Critère instable \Rightarrow Système instable
87.4%

Le critère semble être une condition suffisante à la stabilité

Et à plusieurs producteurs : Faire une étude statistique



Conclusion :

100%
Critère stable \Rightarrow Système stable
Critère instable \Rightarrow Système instable
87.4%

Le critère semble être une condition suffisante à la stabilité



Peut-on généraliser les résultats pour proposer un réglage valable dans tous les cas ?

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- 5 Conclusion et perspectives

Généralisation du critère de stabilité pour **UN** producteur



Définir le "pire cas" pour exprimer $\overline{a_{lim}}$.

Si $a > \overline{a_{lim}}$ **alors** le filtre stabilise tous les systèmes.



Définir le "pire cas" pour exprimer $\overline{a_{lim}}$.

Si $a > \overline{a_{lim}}$ **alors** le filtre stabilise tous les systèmes.

Influence des paramètres sur a_{lim} :

- Plus le **producteur est gros**, plus a_{lim} ↗
- Plus le **producteur est loin**, plus a_{lim} ↗

Généralisation du critère de stabilité pour **UN** producteur



Définir le "pire cas" pour exprimer \overline{a}_{lim} .

Si $a > \overline{a}_{lim}$ **alors** le filtre stabilise tous les systèmes.

Influence des paramètres sur a_{lim} :

- Plus le **producteur est gros**, plus $a_{lim} \nearrow$
- Plus le **producteur est loin**, plus $a_{lim} \nearrow$



$$\left. \begin{array}{l} P_{prod} = 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} = 40 \text{ km} \end{array} \right\} \overline{a}_{lim} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau}_{lim} = 3s$$

Généralisation du critère de stabilité pour **UN** producteur



Définir le "pire cas" pour exprimer \overline{a}_{lim} .

Si $a > \overline{a}_{lim}$ **alors** le filtre stabilise tous les systèmes.

Influence des paramètres sur a_{lim} :

- Plus le **producteur est gros**, plus $a_{lim} \nearrow$
- Plus le **producteur est loin**, plus $a_{lim} \nearrow$



$$\left. \begin{array}{l} P_{prod} = 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} = 40 \text{ km} \end{array} \right\} \overline{a}_{lim} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau}_{lim} = 3s$$

Conclusion :

Si le filtre est **suffisamment lent** i.e. $\tau > 3 \text{ s}$



Le fonctionnement sera **stable quel que soit le réseau**

Généralisation du critère de stabilité pour **UN** producteur



Définir le "pire cas" pour exprimer \overline{a}_{lim} .

Si $a > \overline{a}_{lim}$ **alors** le filtre stabilise tous les systèmes.

Influence des paramètres sur a_{lim} :

- Plus le **producteur est gros**, plus $a_{lim} \nearrow$
- Plus le **producteur est loin**, plus $a_{lim} \nearrow$



$$\left. \begin{array}{l} P_{prod} = 6 \text{ MW} \\ d_{prod \leftrightarrow PS} = 40 \text{ km} \end{array} \right\} \overline{a}_{lim} = 0,65 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{\tau}_{lim} = 3s$$

Conclusion :

Si le filtre est **suffisamment lent** i.e. $\tau > 3 \text{ s}$

\Rightarrow

Le fonctionnement sera **stable quel que soit le réseau**

\Rightarrow Et à N producteurs ?

Généralisation du critère de stabilité pour N producteurs

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas ?

Généralisation du critère de stabilité pour N producteurs

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas ?



On peut montrer que :

N producteurs de puissance
 P_i répartis sur un réseau

a_{lim_N}



Un producteur de puissance ΣP_i
au bout de la plus longue ligne



$a_{lim_{\Sigma N}}$

Généralisation du critère de stabilité pour N producteurs

Problème : Le critère n'est pas explicite

⇒ Comment définir le pire cas ?



On peut montrer que :

N producteurs de puissance
 P_i répartis sur un réseau

a_{lim_N}



Un producteur de puissance ΣP_i
au bout de la plus longue ligne

$a_{lim_{\Sigma N}}$

Conclusion :

Les cas à N producteurs sont toujours **moins contraignants** que le pire cas défini à 1 producteur
 $\tau > 3s \Rightarrow$ Le système est stable

Discussion de l'ordre de grandeur

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage $Q(U)$ doit répondre en moins de 10 secondes

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage $Q(U)$ doit répondre en moins de 10 secondes



Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage $Q(U)$ doit répondre en moins de 10 secondes



Réglage $Q(U)$ doit répondre entre 10 et 60 secondes

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage $Q(U)$ doit répondre en moins de 10 secondes



Réglage $Q(U)$ doit répondre entre 10 et 60 secondes



Discussion de l'ordre de grandeur

Comparaison avec quelques exemples de grid codes :



Réglage $Q(U)$ spécifié mais sans contrainte dynamique



Réglage $Q(U)$ doit répondre en moins de 10 secondes



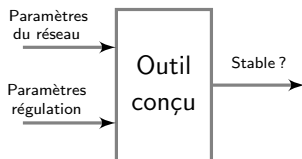
Réglage $Q(U)$ doit répondre entre 10 et 60 secondes



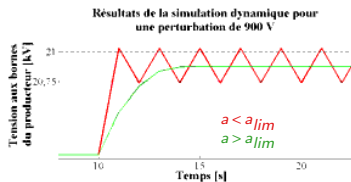
Que devient le critère de stabilité avec une moyenne glissante ?

- 1 Contexte et objectifs de la thèse
- 2 Méthode d'analyse de la stabilité
- 3 Critère de réglage de stabilité pour un producteur
- 4 Critère général de stabilité
- 5 Conclusion et perspectives

Construire un outil d'analyse de la stabilité



Formuler un critère de stabilité



Proposer un réglage à intégrer aux codes de réseaux



$$\tau > 3s$$

Étudier les interactions avec :

- ★ des filtres différents
- ★ d'autres acteurs
- ★ d'autres régulations

Rédiger le mémoire !

Merci de votre attention
Avez vous des questions ?