



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

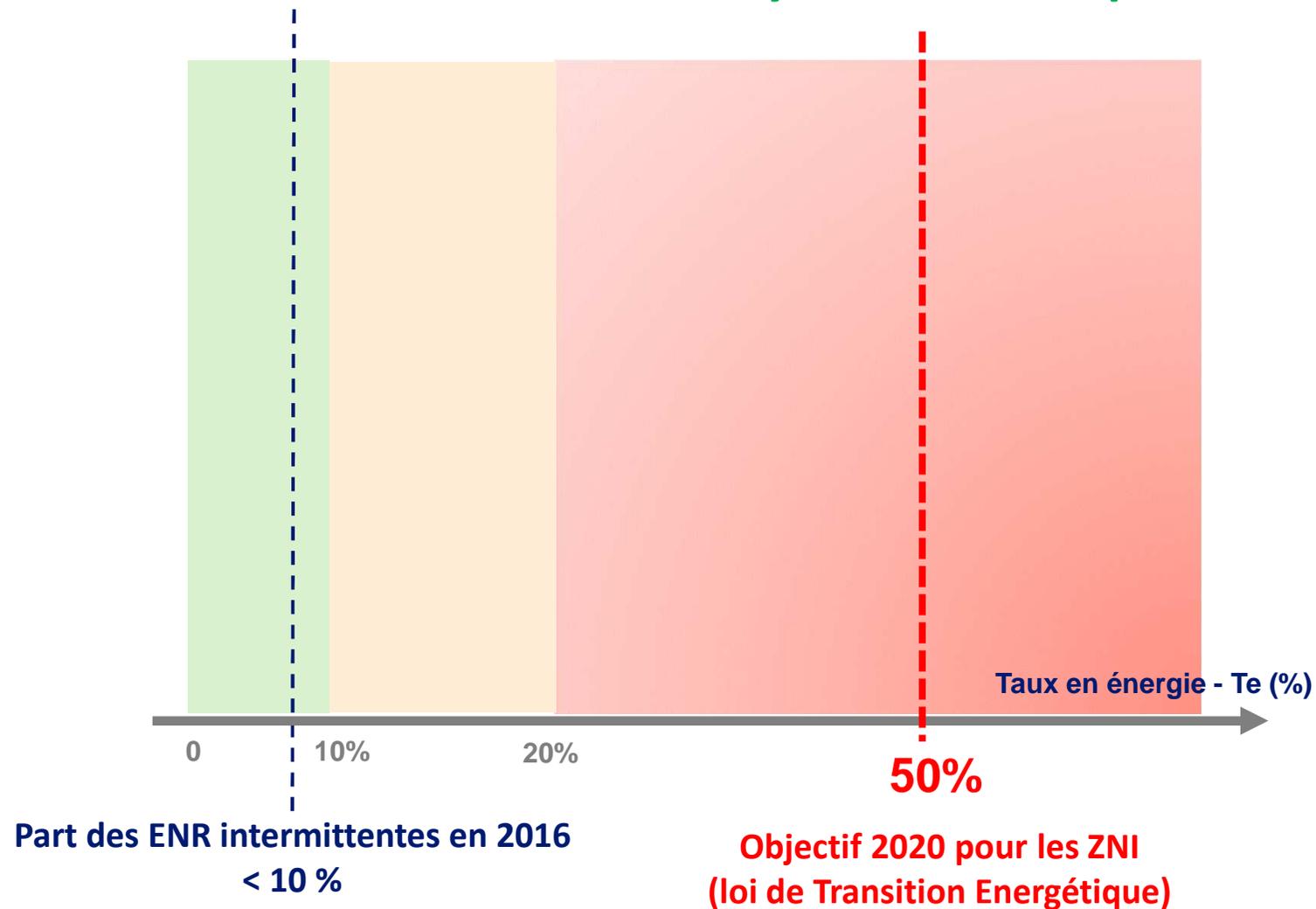
Intégration de contraintes de déploiement de la réserve primaire
dans un outil de placement journalier de production

Soirée des doctorants IEEE PES France – 31 mars 2016

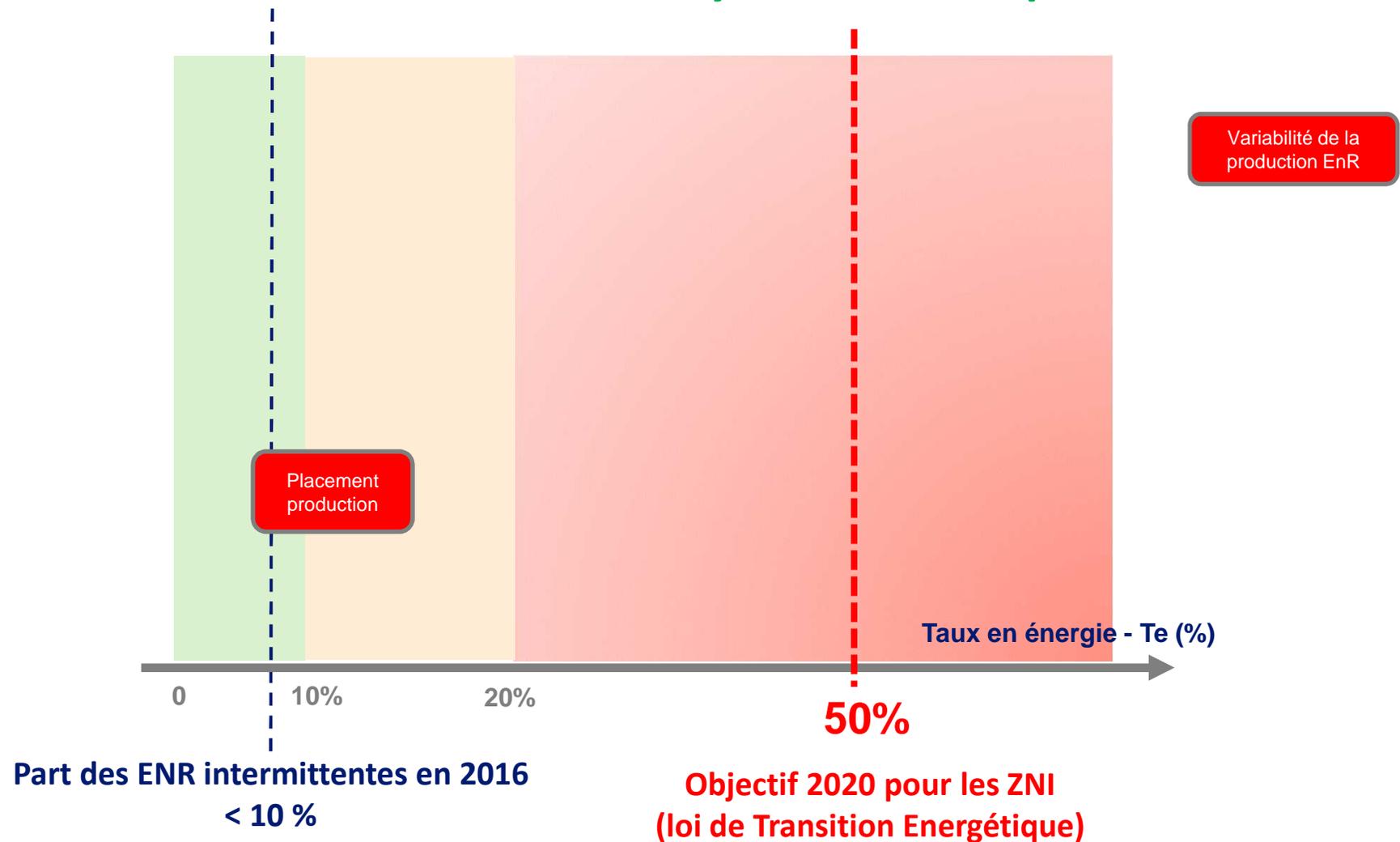
Laurent CAPELY

EDF R&D / Département EFESSE

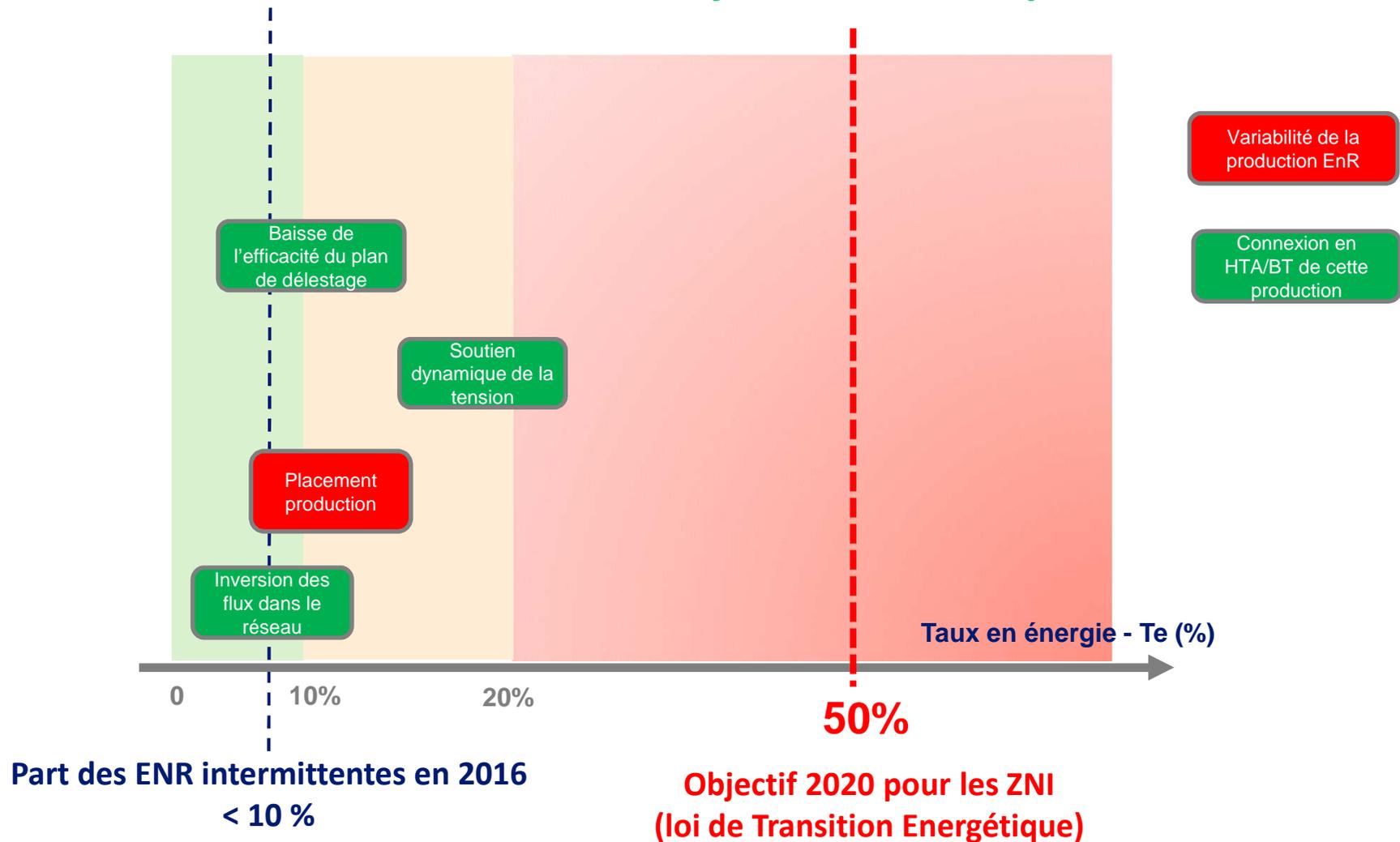
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



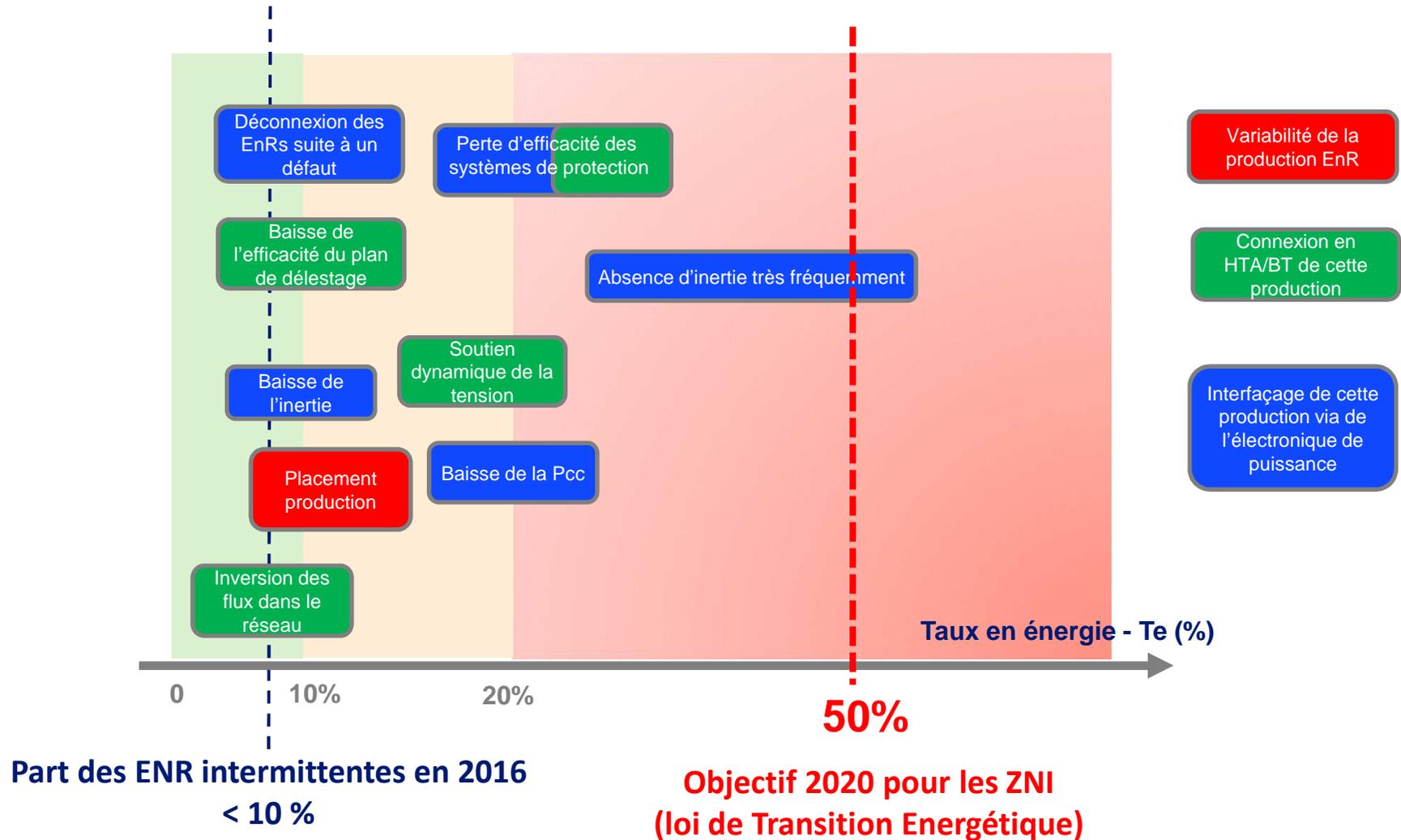
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



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



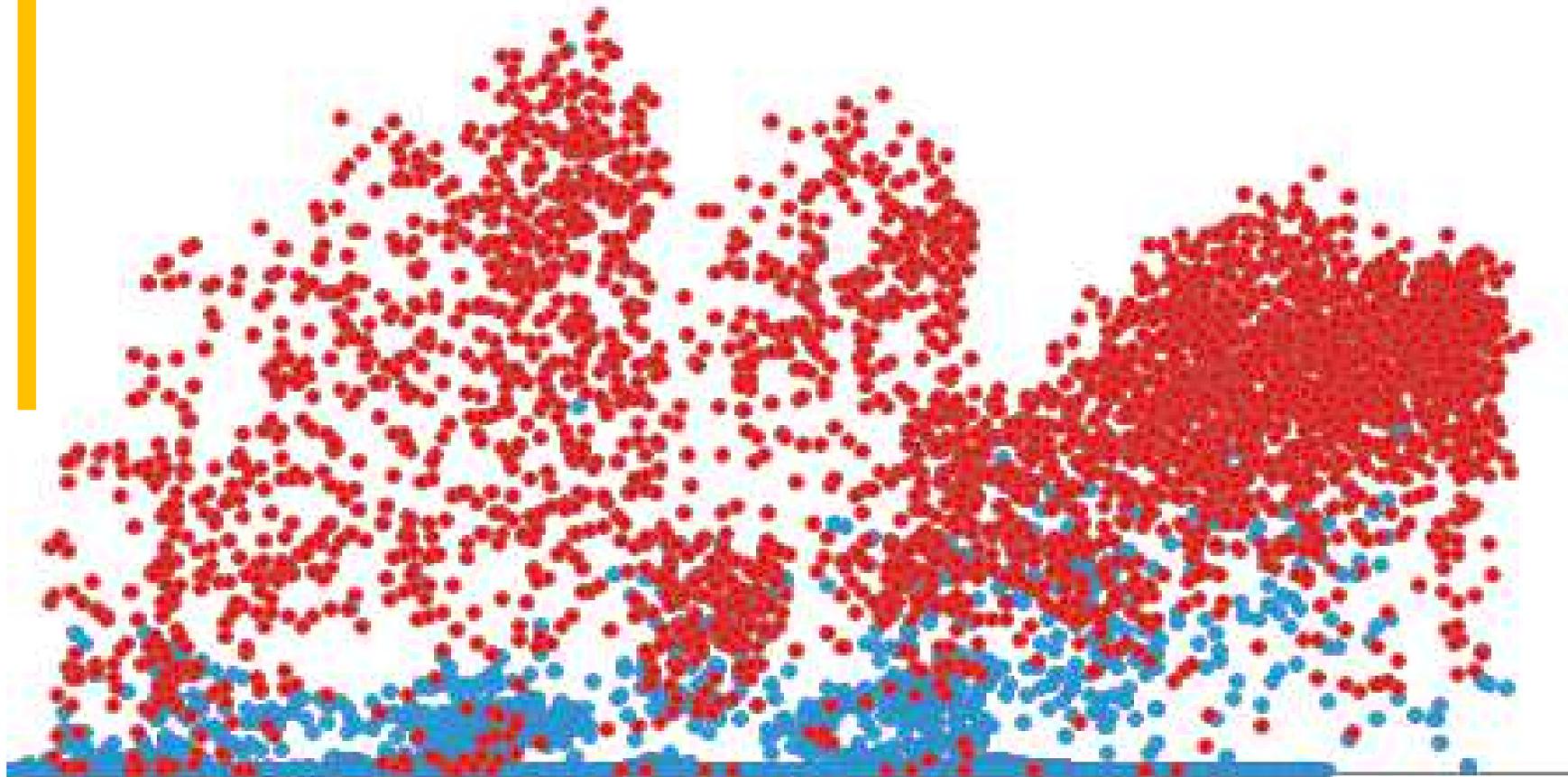
Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



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

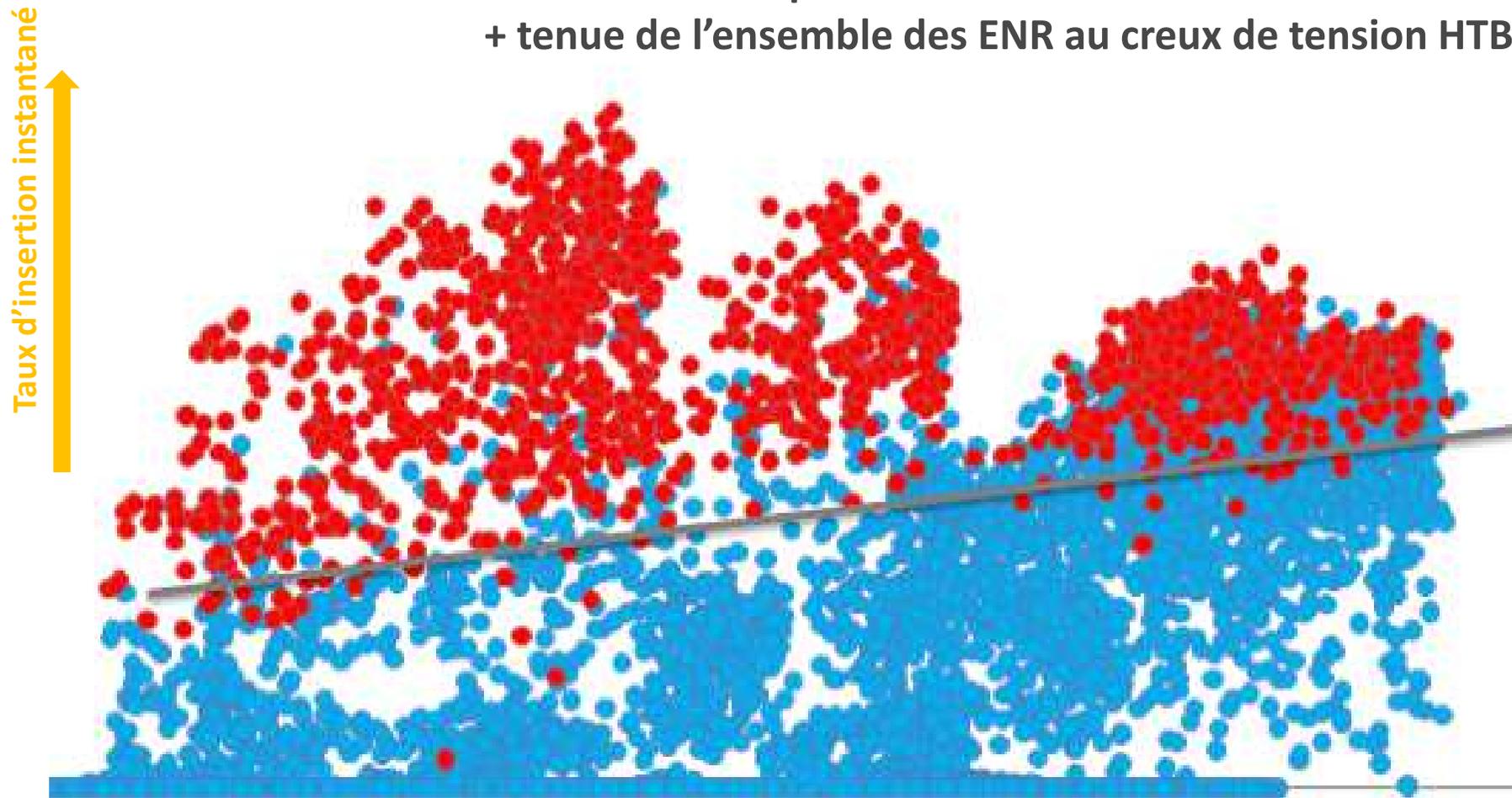


● Politique risque respectée

● Politique risque non respectée

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

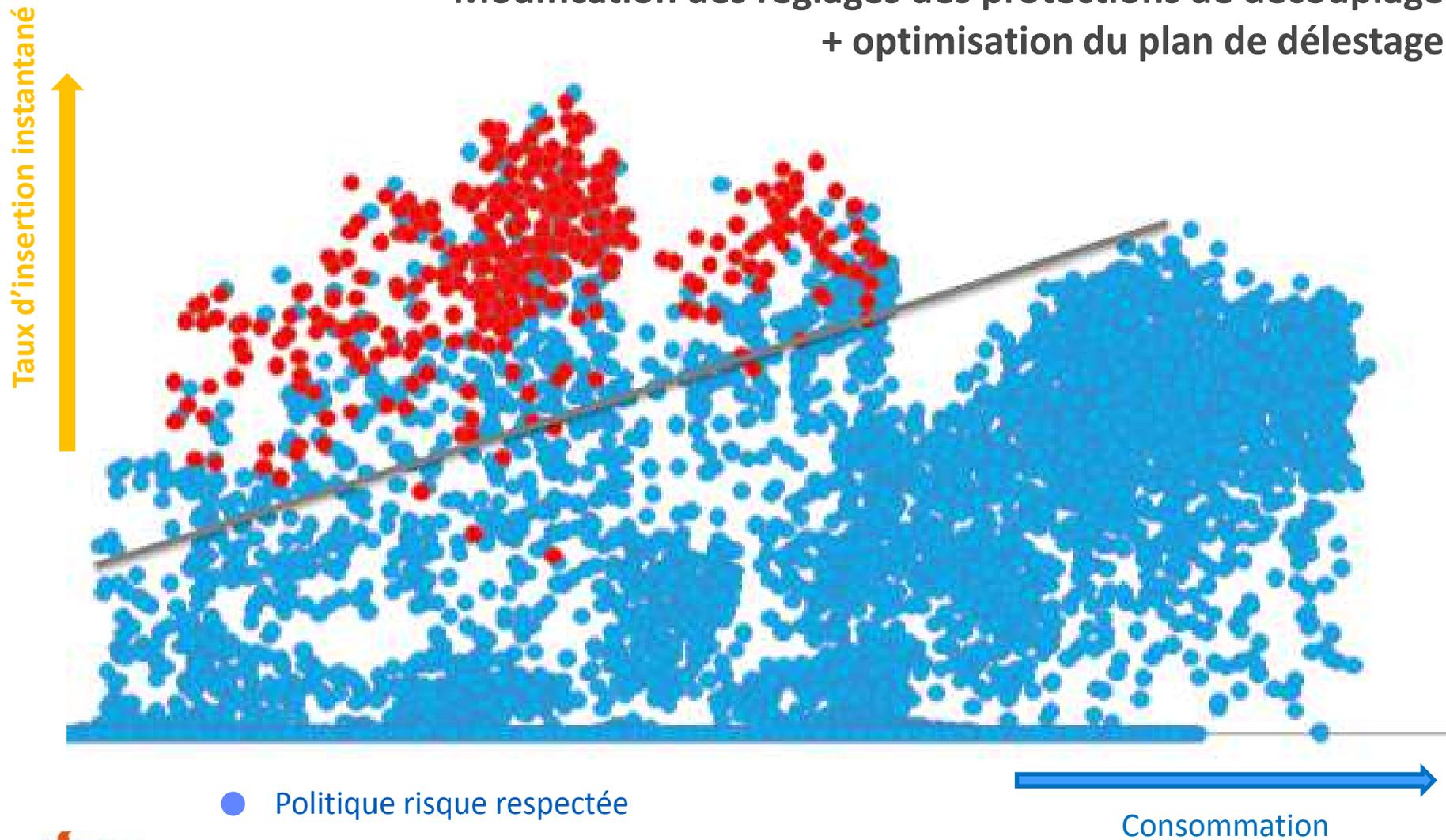
Compensation de la variabilité infra-horaire
+ tenue de l'ensemble des ENR au creux de tension HTB



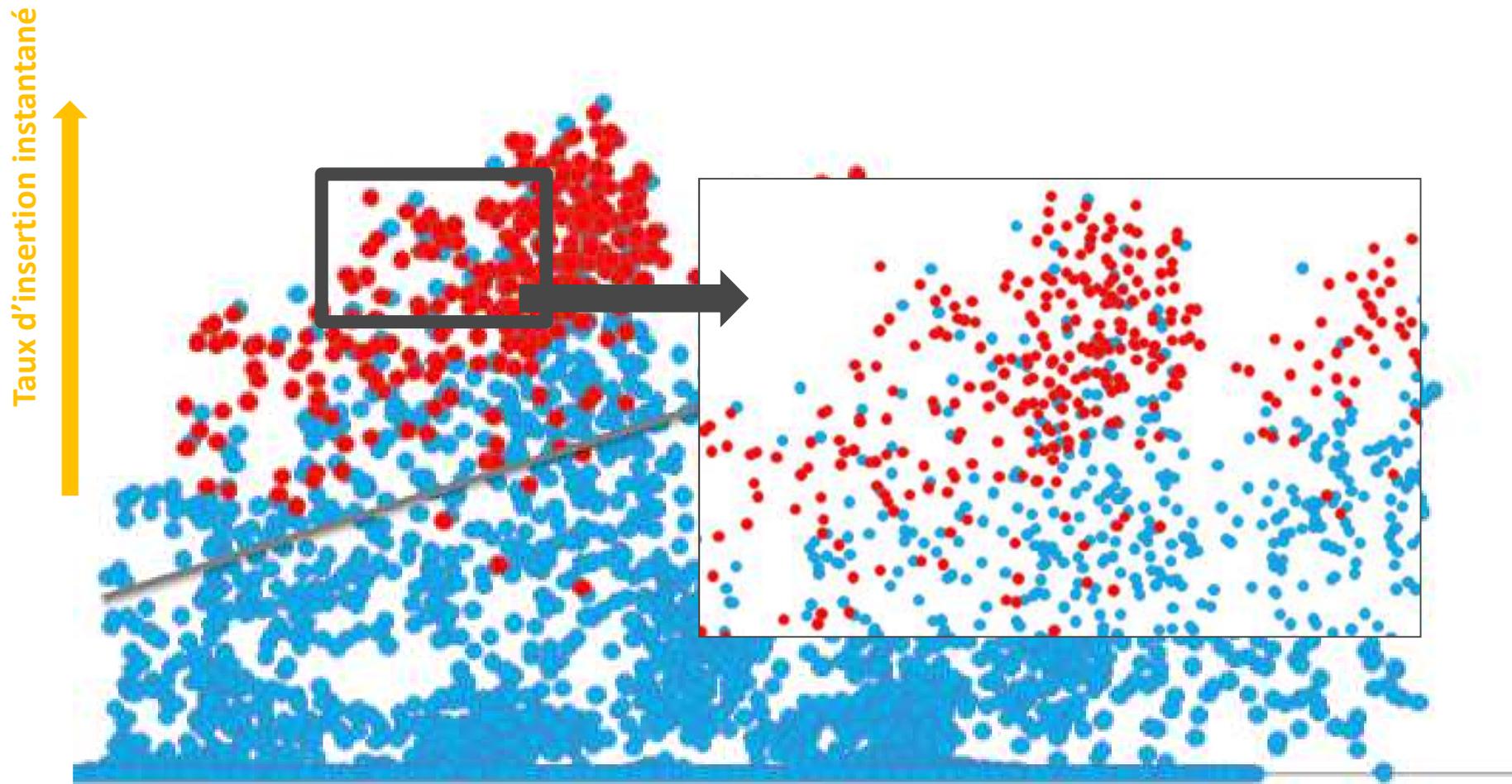
- Politique risque respectée
- Politique risque non respectée

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

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

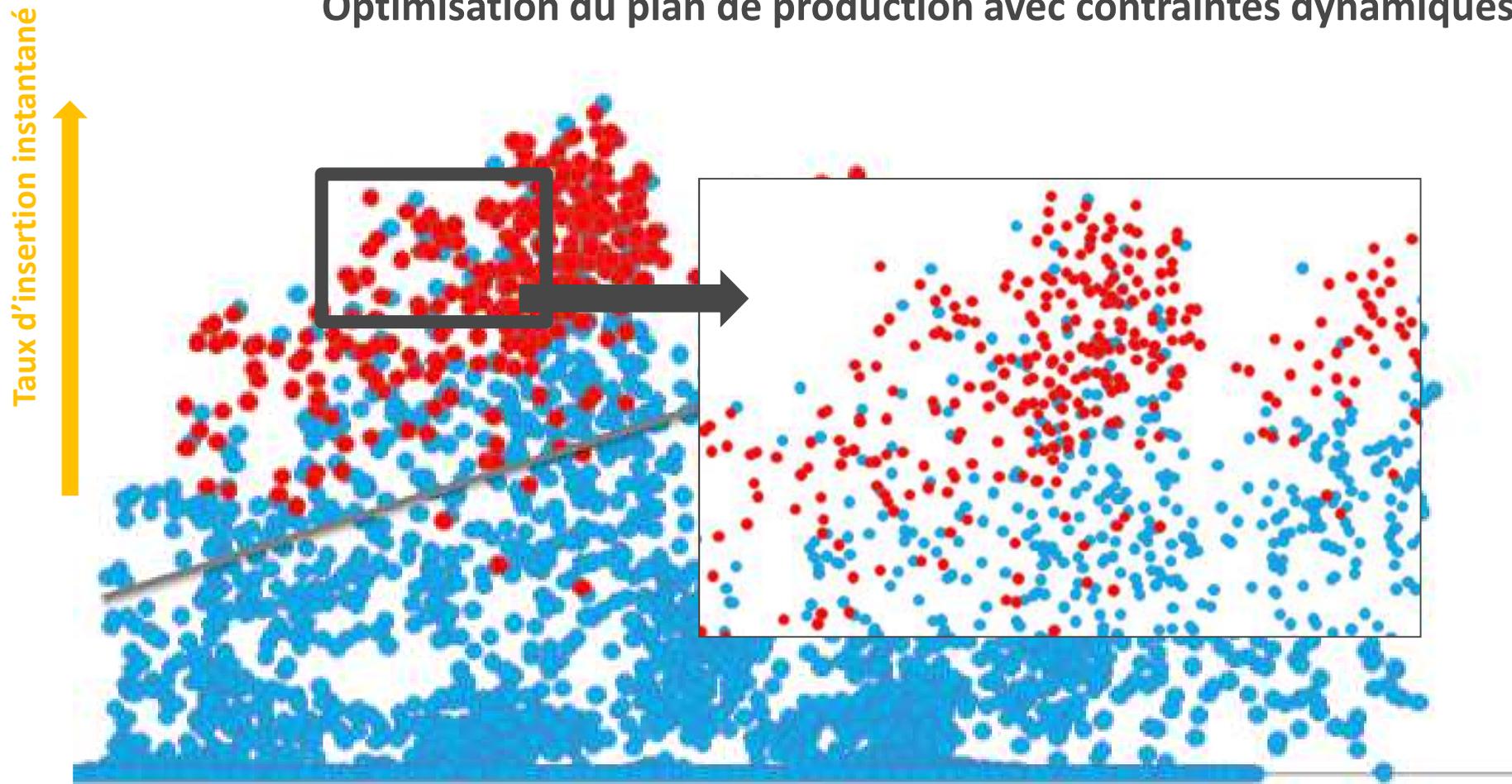


Impacts des ENR intermittentes sur le fonctionnement d'un système électrique insulaire



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

$$\begin{array}{ll} \text{minimiser} & f_0(g, u) \\ \text{sous contraintes} & f_i(g, u) \leq 0 \quad i = 1, \dots, i, \\ & g_\ell(g, u) = 0 \quad \ell = 1, \dots, l, \end{array}$$

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

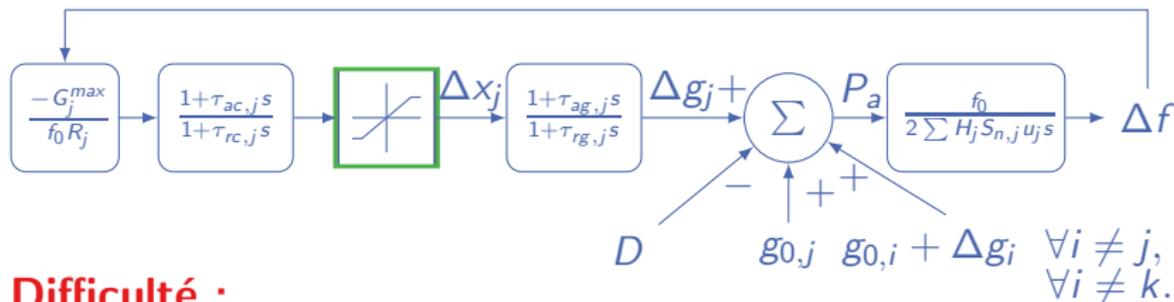


Limitations

Calcul paramètres

Complexité / Hypothèses

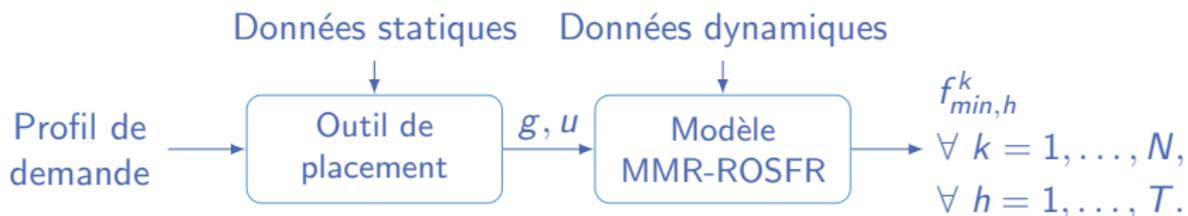
On propose une version modifiée du modèle *Multi-Machine* avec saturation de la puissance produite.

**Difficulté :**

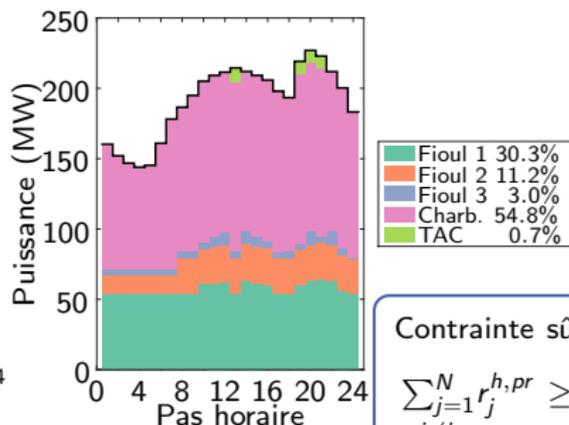
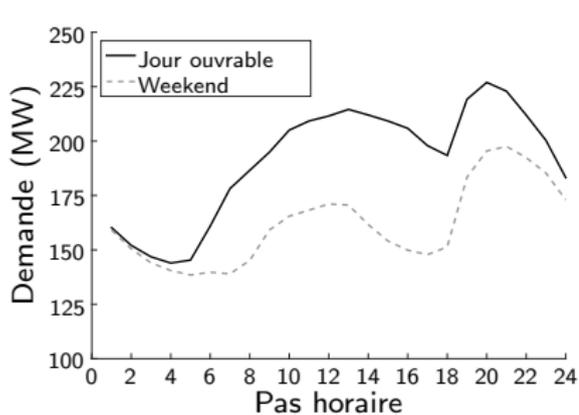
Pas d'expression analytique pour $f_{min}(g, u, D(t), \Delta P, \dots)$.

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.

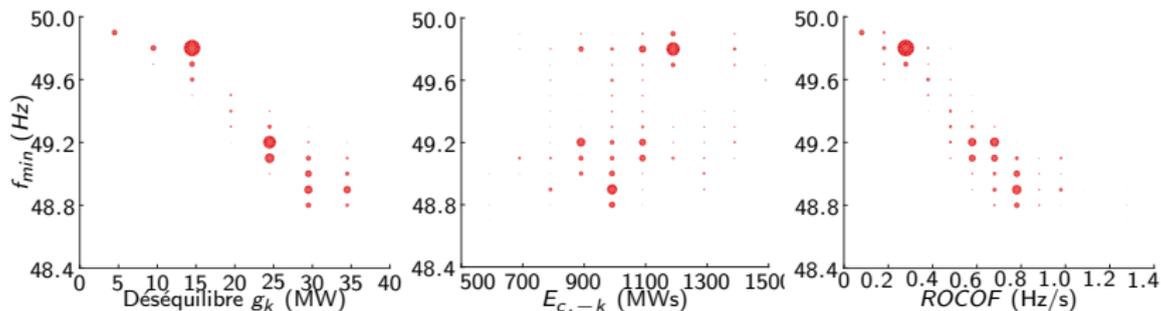


Contrainte sûreté

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

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.

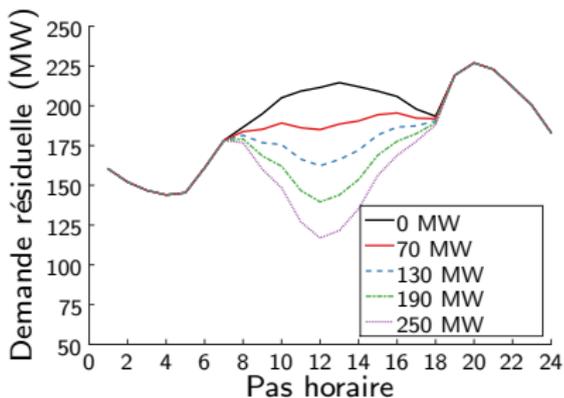
Plan de la présentation

- 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

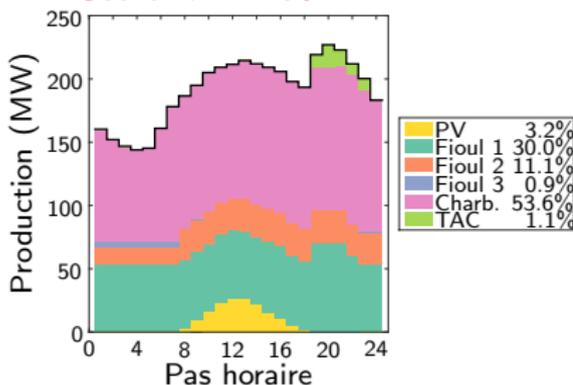
Scénarios de développement du PV

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

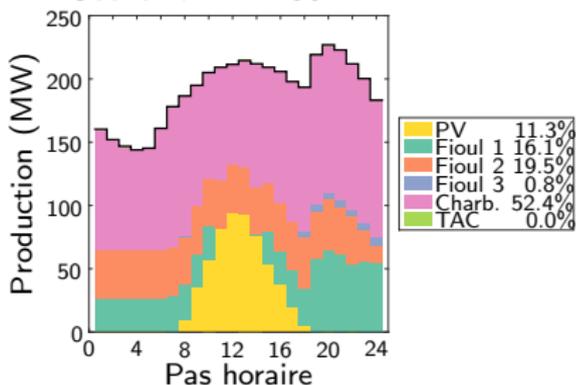
4 scénarios de capacité installée.



Scenario 1 = 70 MW



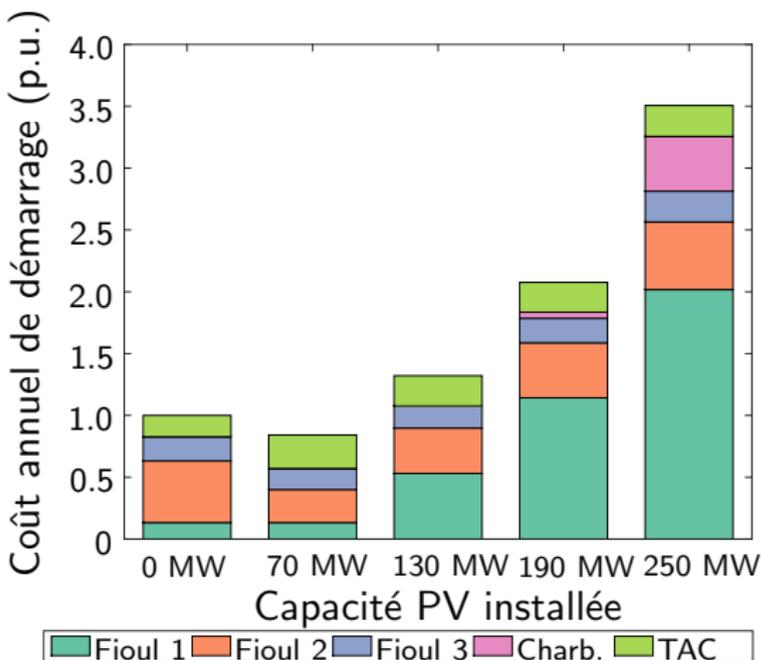
Scenario 4 = 250 MW



Modification des programmes d'appel

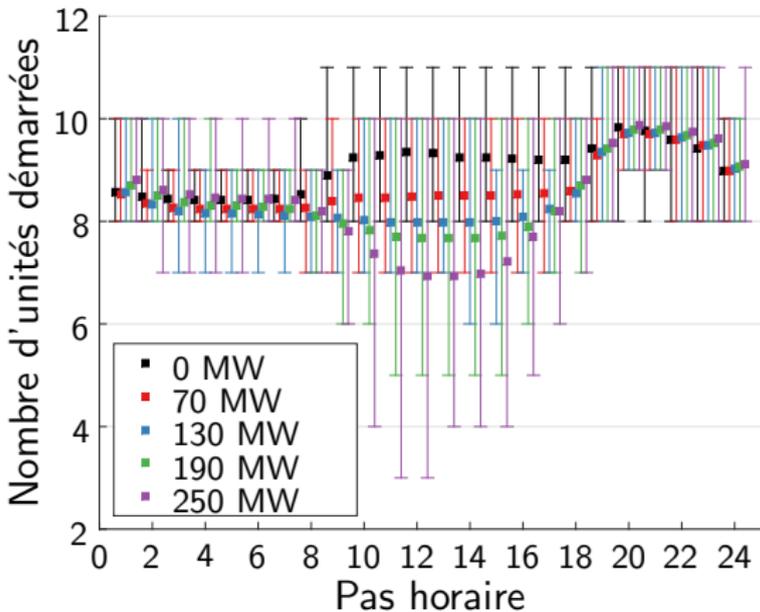
1 ⇕ Marges

2 ↑ Arrêt/Démarrage



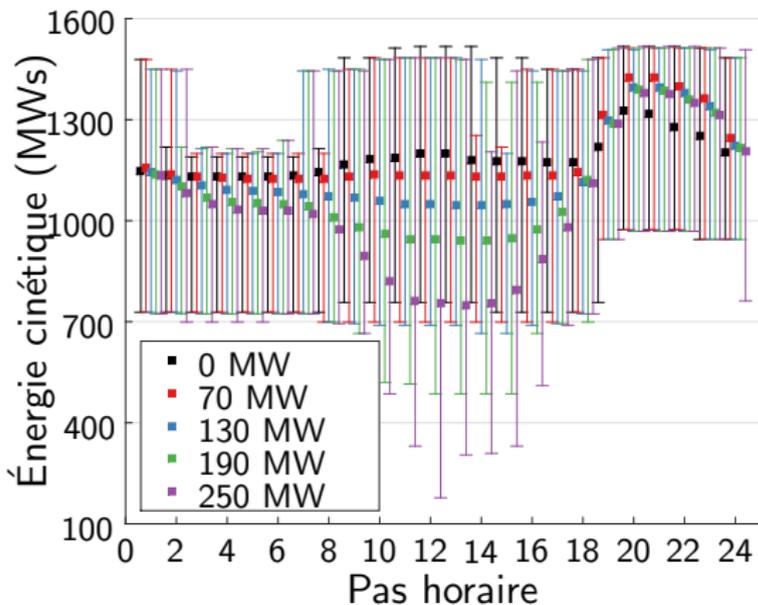
Modification des programmes d'appel

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



Modification des programmes d'appel

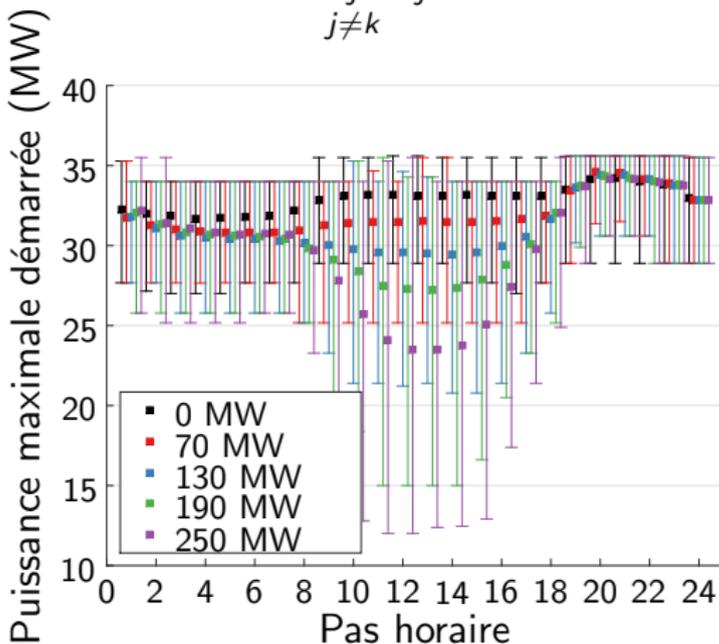
- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités
- 4 ↓ Énergie cinétique



Modification des programmes d'appel

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

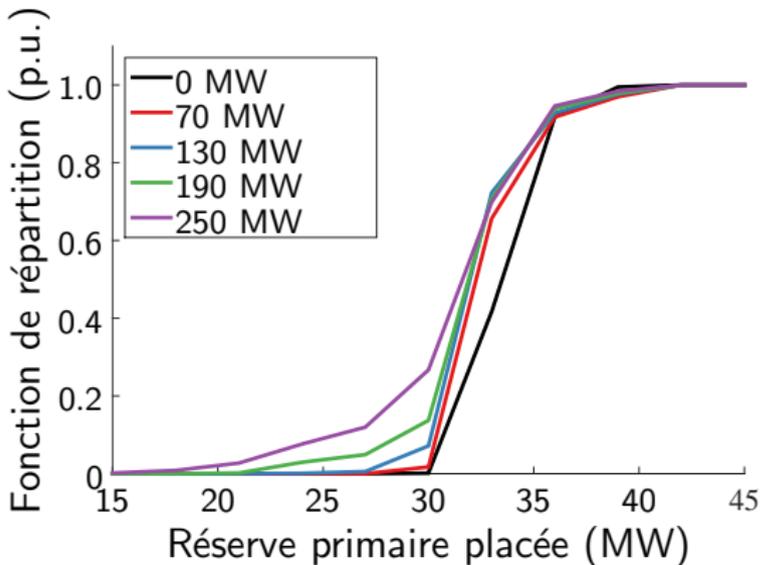
$$\text{Rappel : } \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N r_j^{h,pr} \geq g_k^h$$



Modification des programmes d'appel

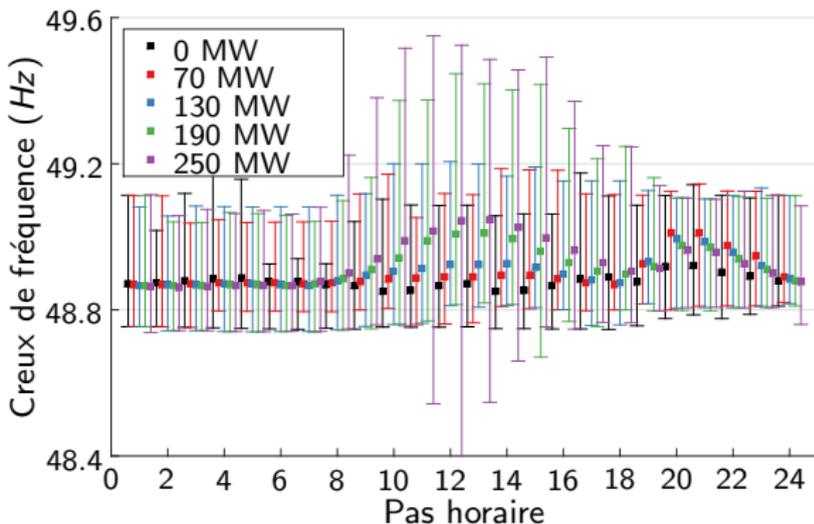
- 1 ⇕ Marges
- 2 ↑ Arrêt/Démarrage
- 3 ↓ Nombre d'unités
- 4 ↓ Énergie cinétique
- 5 ↓ Puissance démarrée
- 6 ↓ Besoin de réserve primaire

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



Impact sur l'évolution de la fréquence

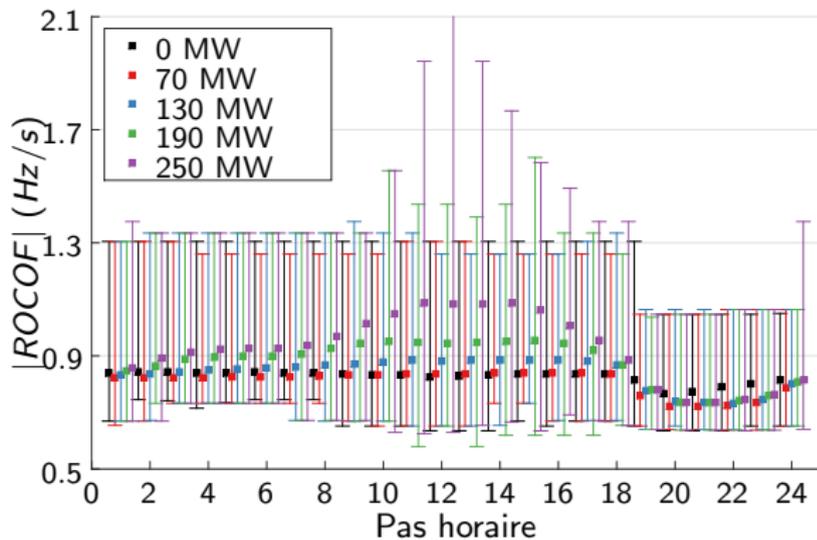
① ⇕ f_{min}



Impact sur l'évolution de la fréquence

1 ⇕ f_{min}

2 ↑ $|ROCOF|$

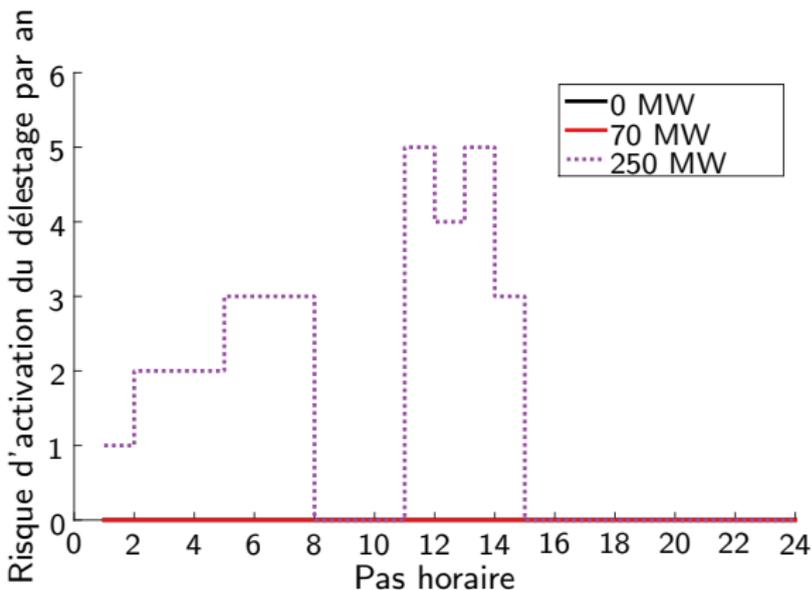


Impact sur l'évolution de la fréquence

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).

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

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)

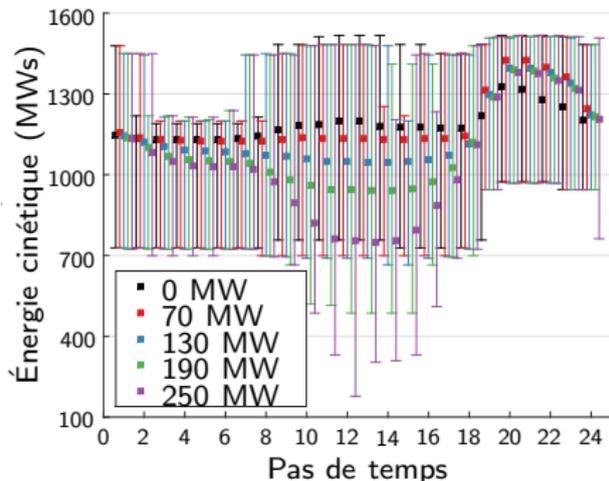


minimiser $f_0(g, u)$
 $g \in \mathbb{R}^{m_1}, u \in \{0,1\}^{m_2}$

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
frequence

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

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

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

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).

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

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

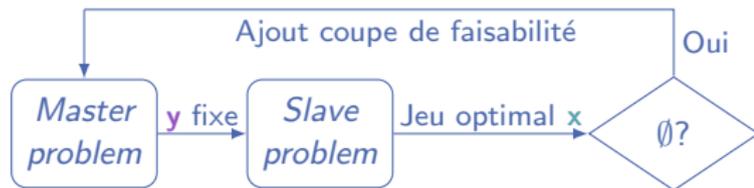
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

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

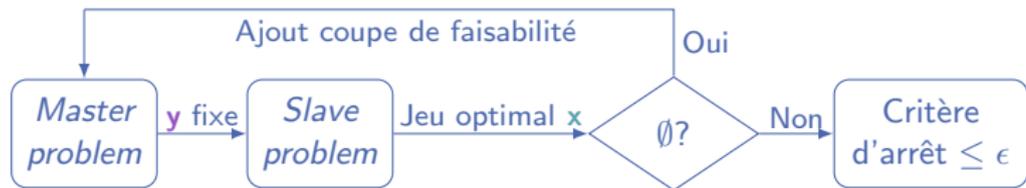
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

y → état des groupes

x → puissance (MW)

q_m → creux de fréquence (Hz)

\underline{q} → seuil de sûreté (Hz).



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

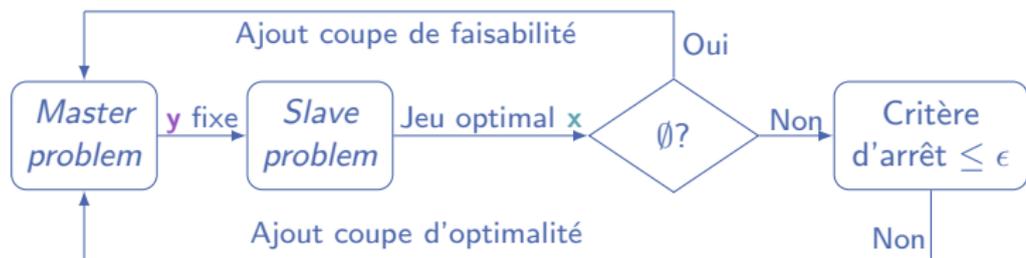
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

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

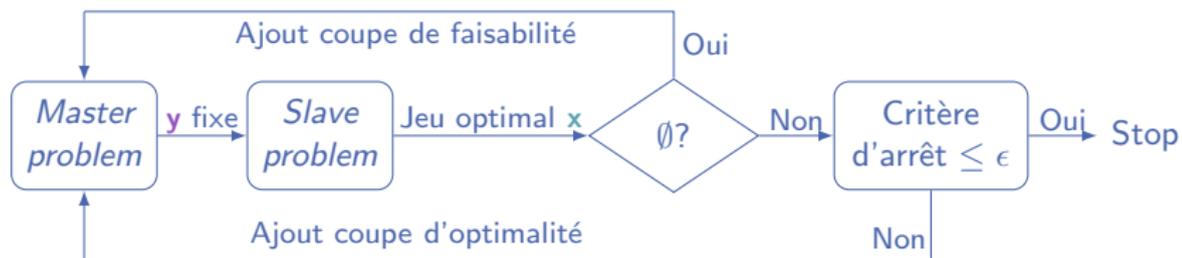
$\underline{q} - q_m(x, y) \leq 0, \quad \forall m = 1, \dots, M.$

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)

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

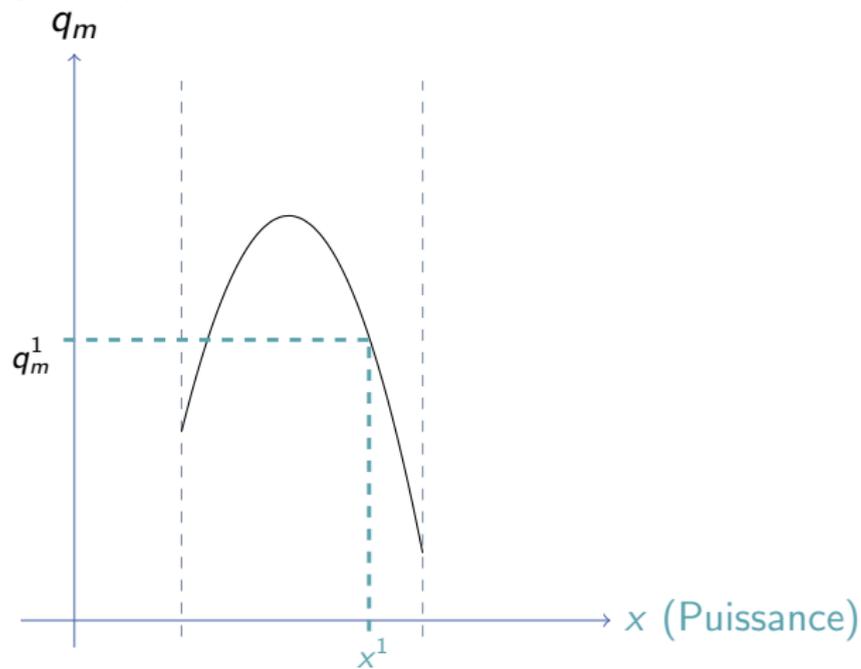
$$\text{sous contraintes} \quad G(x, \bar{y}^i) \leq 0,$$

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

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

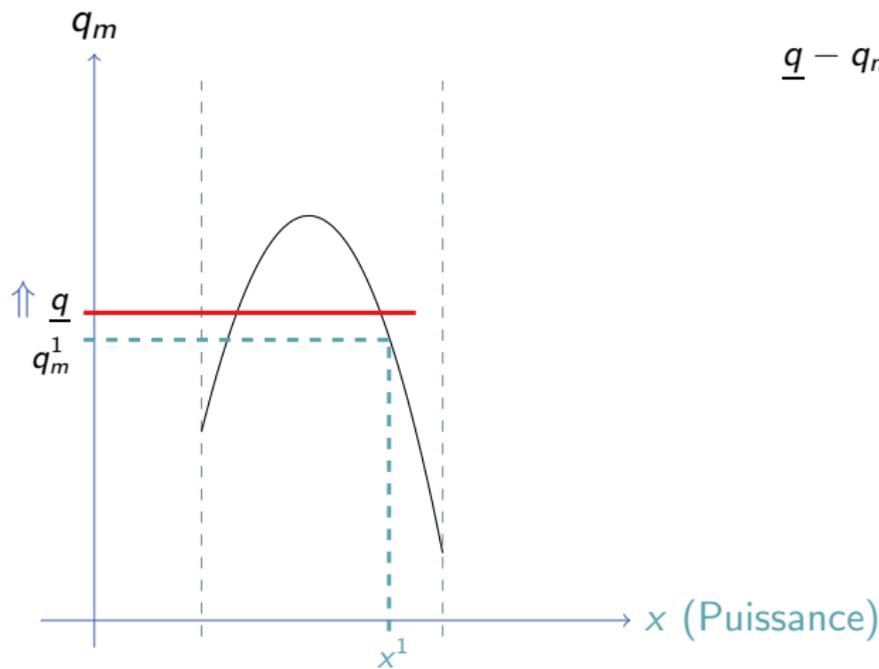
Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

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



Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

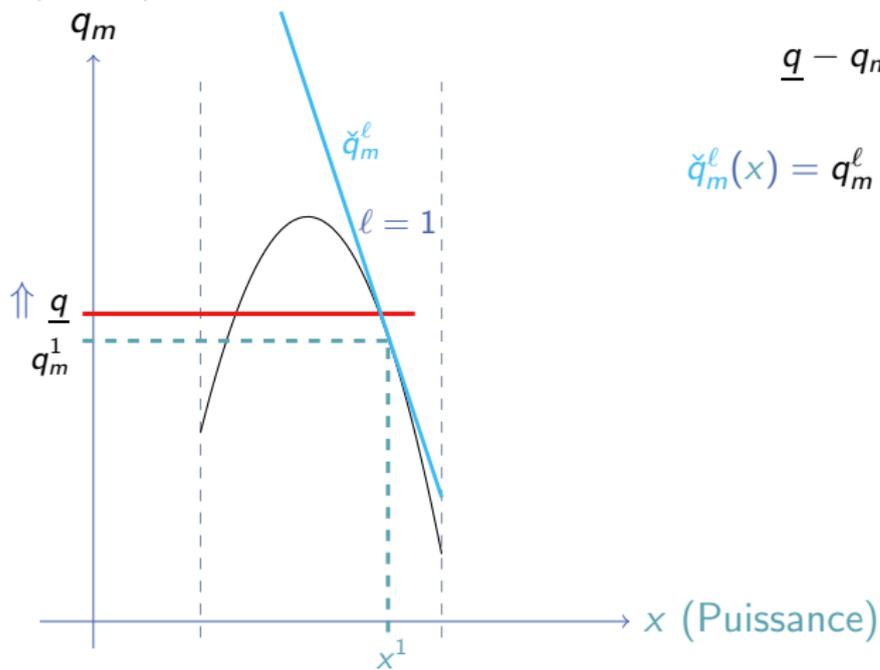
Hypothèses : q_m est une fonction concave par rapport aux x
(Creux)



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

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

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

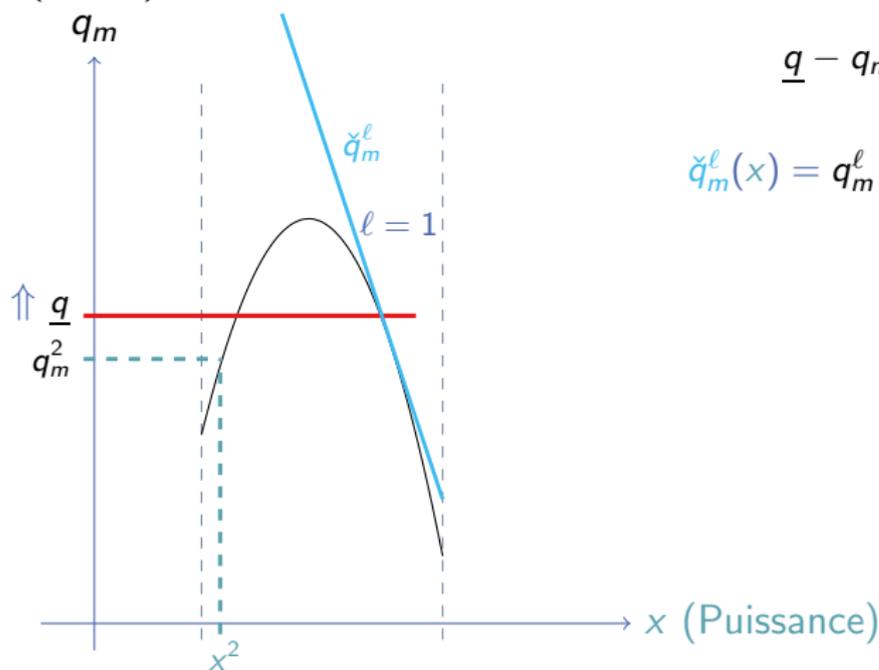


$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

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

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

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

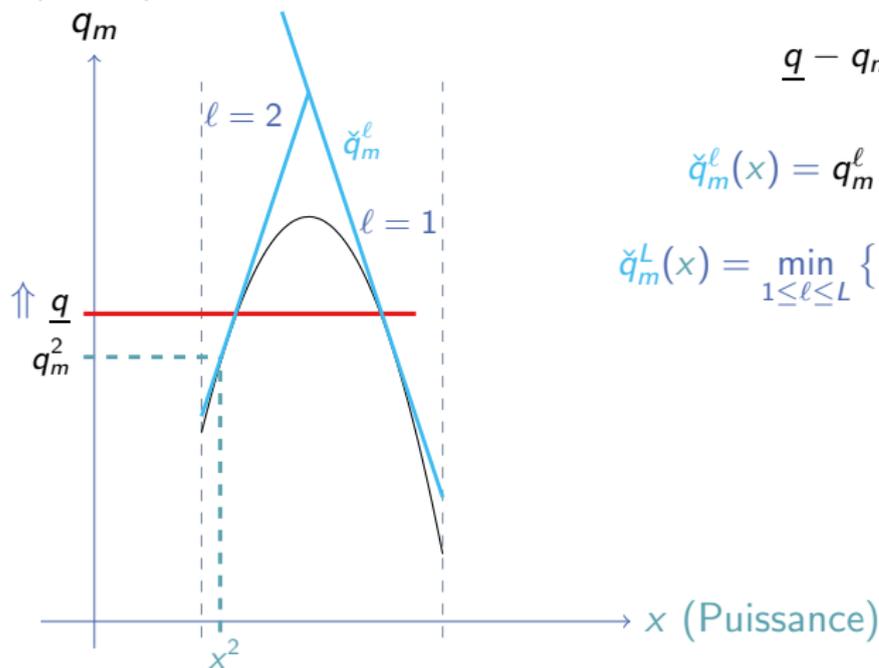


$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

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

Modèle de plans sécants pour le creux de fréquence

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



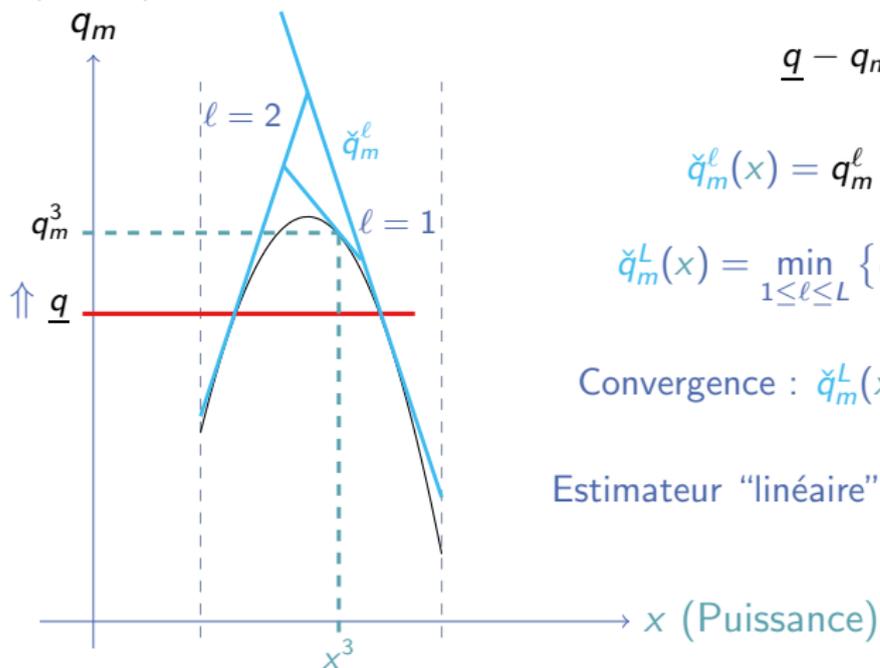
$$\underline{q} - q_m(x) \leq 0$$

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

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

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

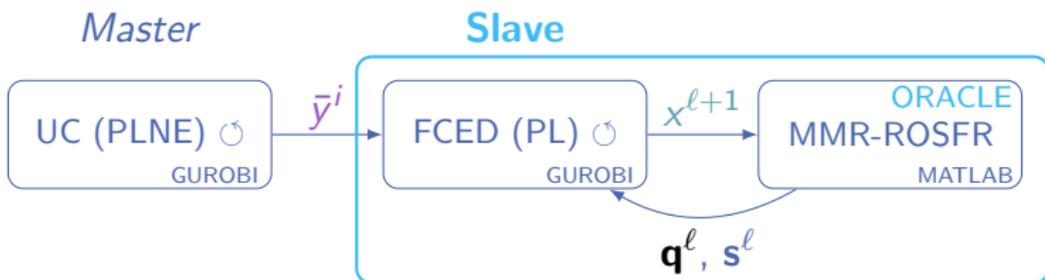
$$\mathcal{V}(y) = \min_{x \in X, w \in Y} f_1(x)$$

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

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

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

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



Slave problem

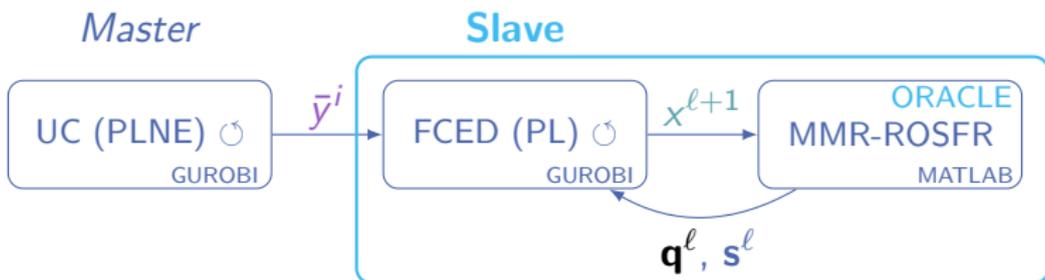
$$\mathcal{V}(y) = \min_{x \in X, w \in Y} f_1(x)$$

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

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

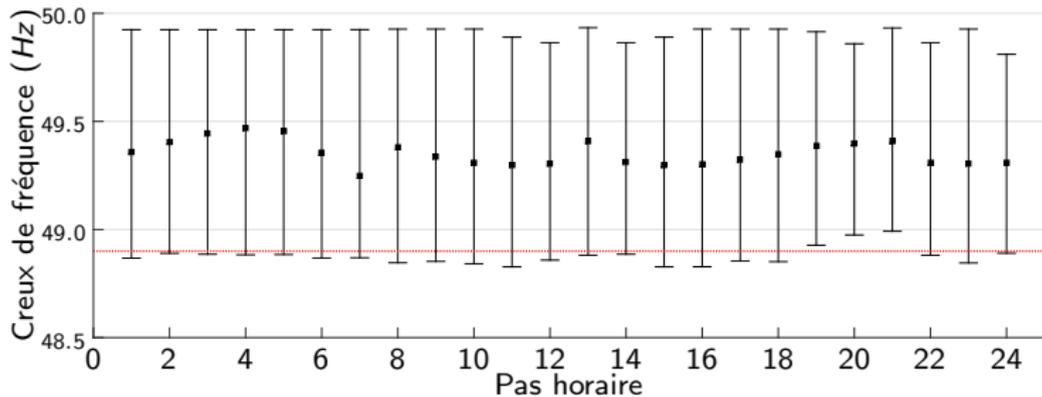
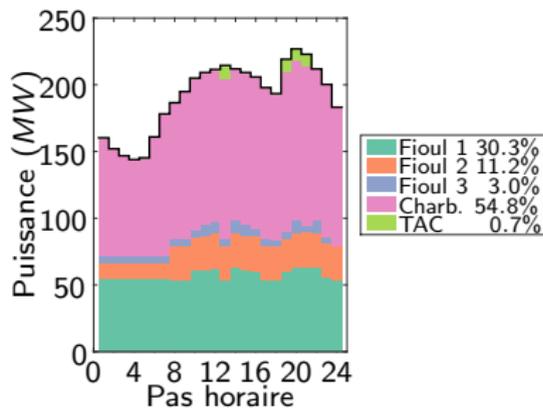
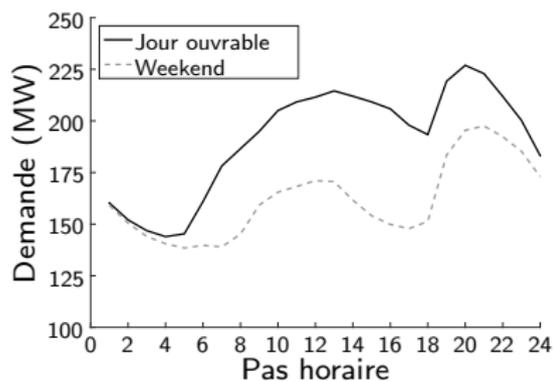
$$\underline{q} - q_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i) - \langle s_m^\ell(\bar{y}_{-m}^i), x - x^\ell \rangle \leq 0, \quad \forall \ell = 1 \dots L, \forall m = 1, \dots, M,$$

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

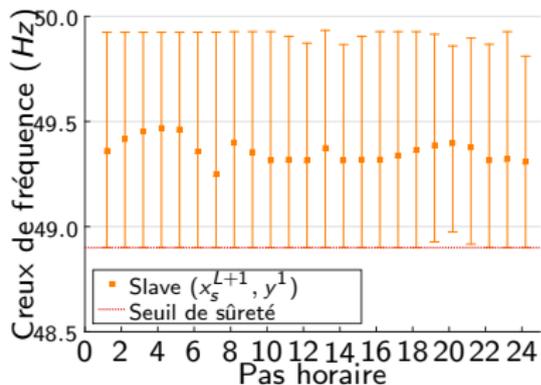
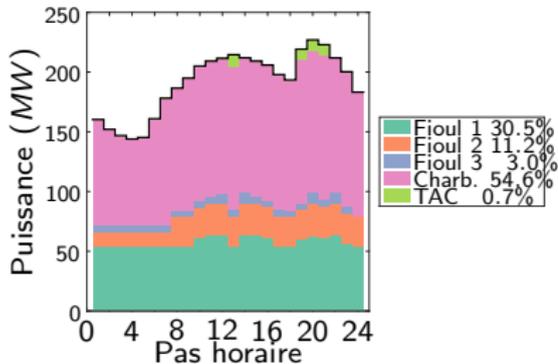
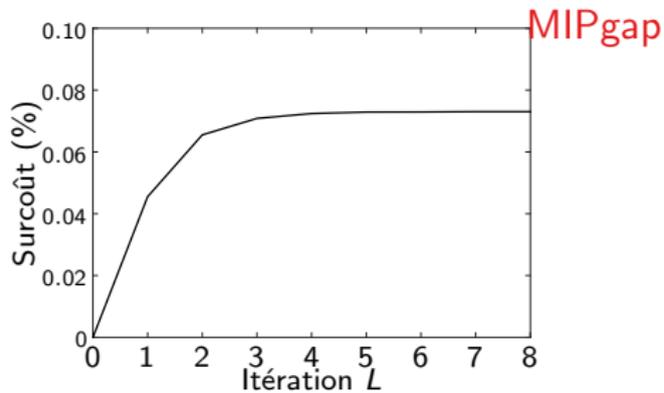
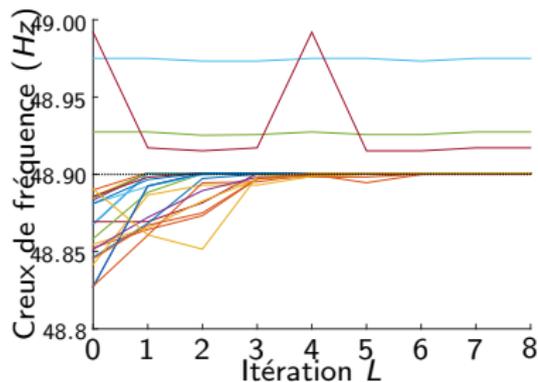


Convergence: $\check{q}_m^L(x^{\ell+1}) - q_m(x^{\ell+1}) \leq \epsilon \Rightarrow (\tilde{x}^i, \mathcal{V}^i, \lambda^i) \parallel \bar{y}^i$ irréalisable

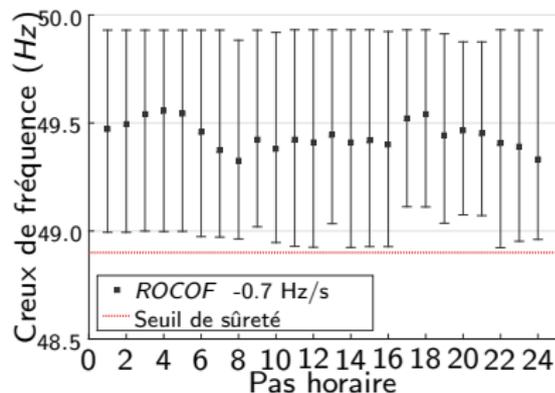
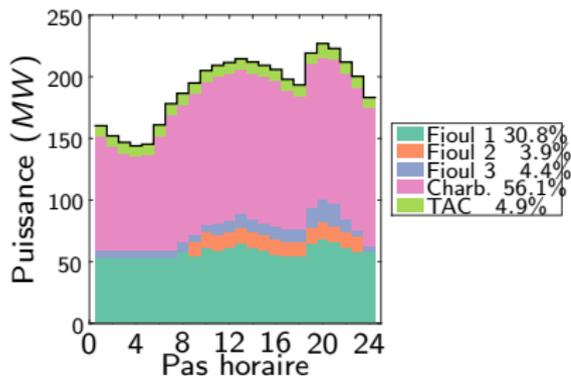
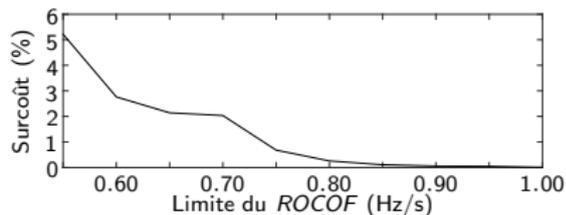
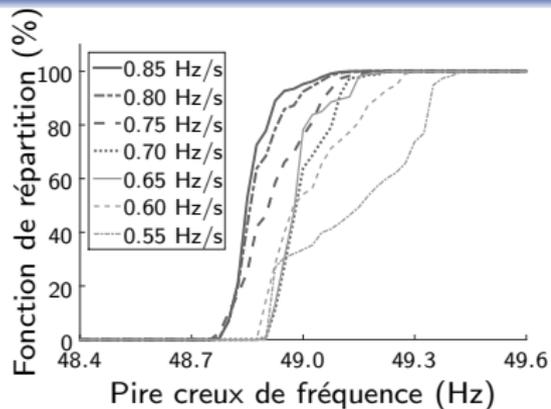
Cas d'étude



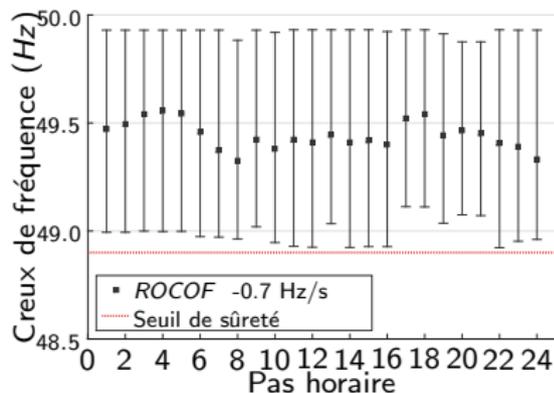
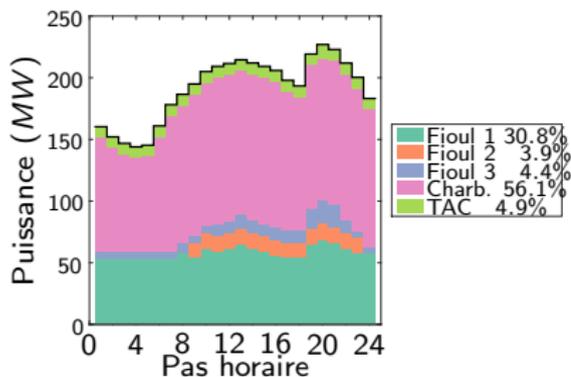
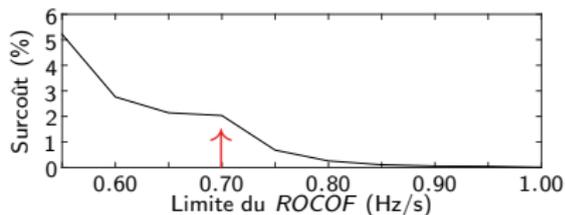
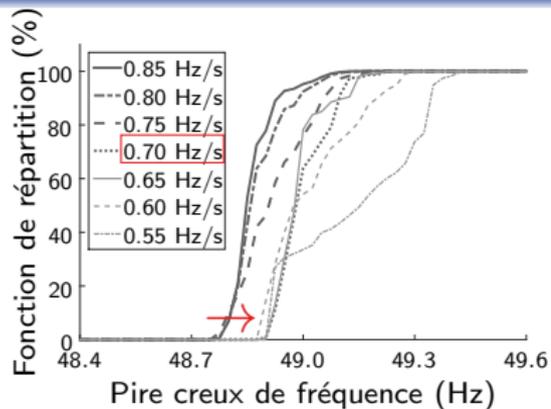
Redispatch du Slave → rapide, optimal et efficace !



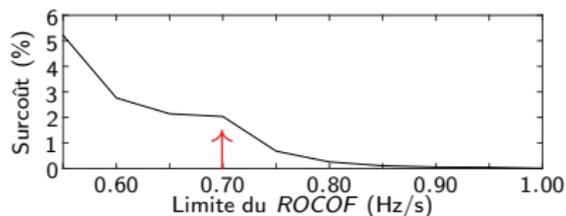
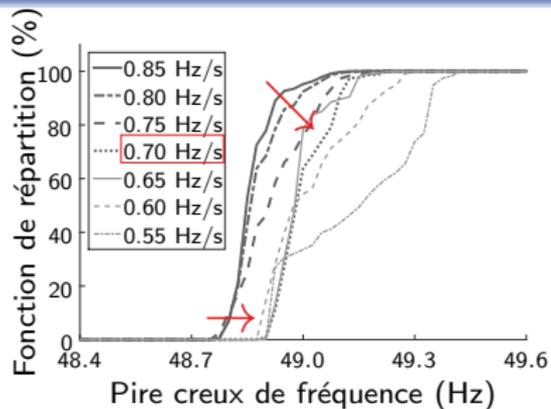
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



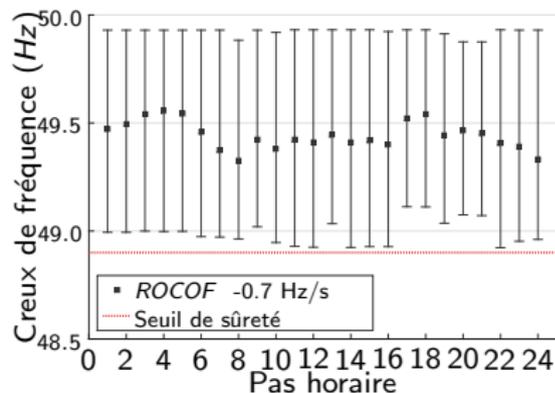
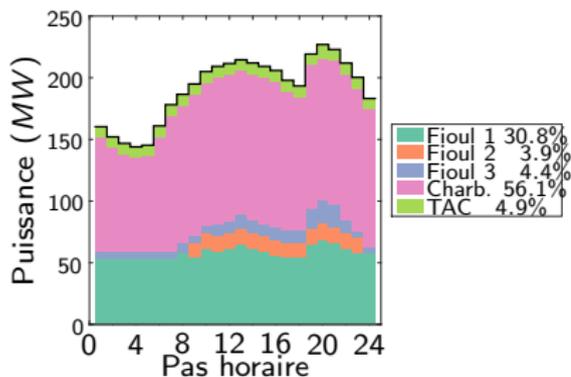
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



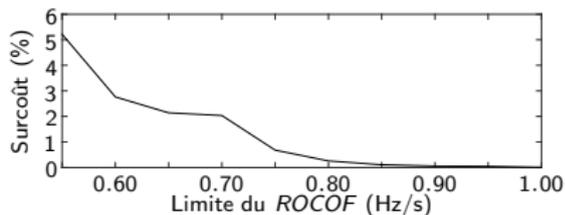
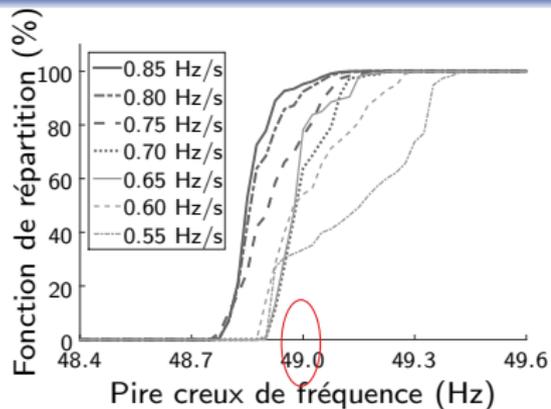
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



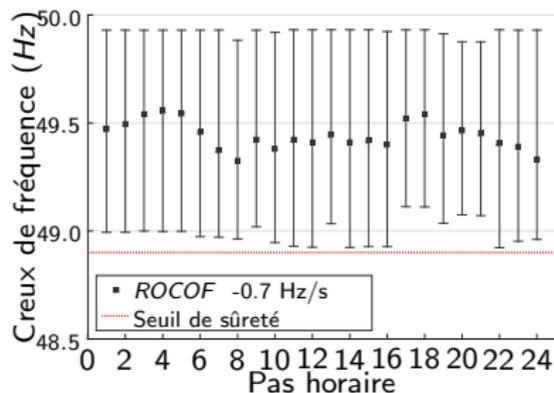
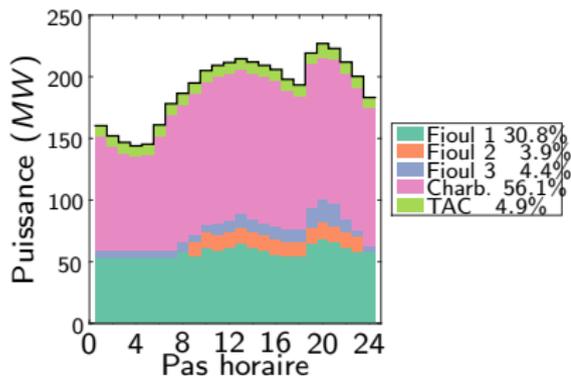
Sous-optimal



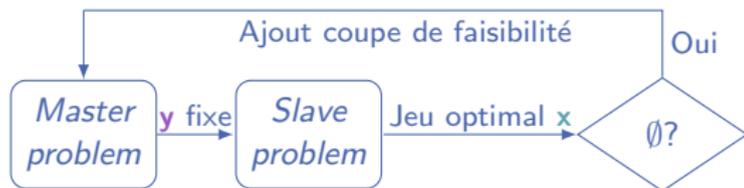
Comparaison avec une contrainte sur le *ROCOF*



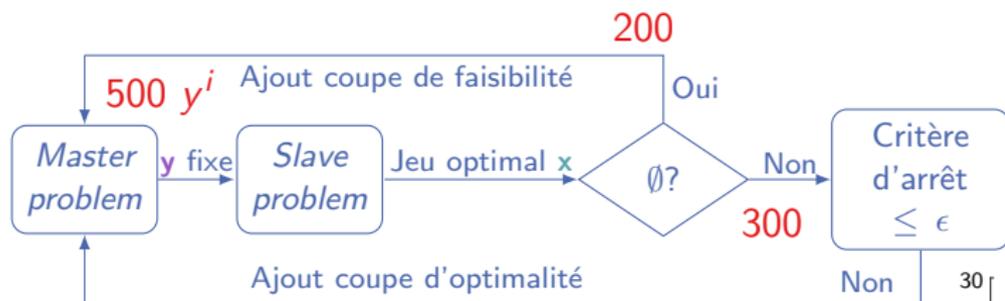
Sous-optimal et inefficace pour
seuil de sûreté plus élevé (49 Hz)



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

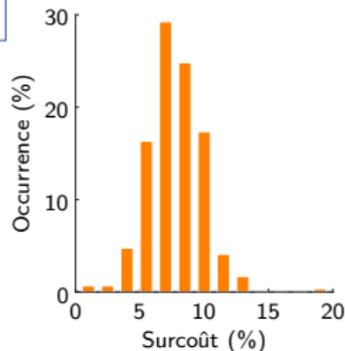


Nouvelle formulation du FCUC avec Benders ($q = 49\text{Hz}$)

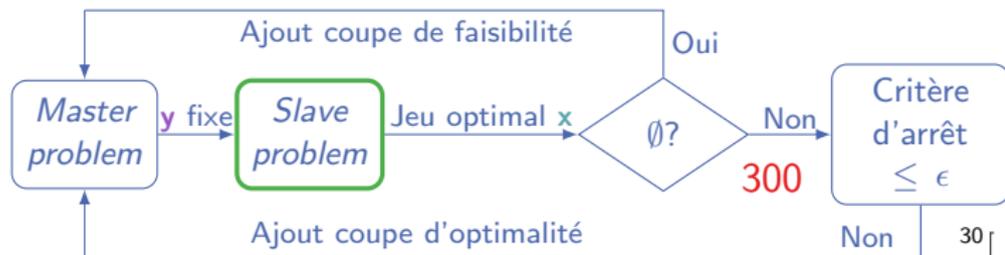


Master → convergence lente

Proposition de nombreux points réalisables



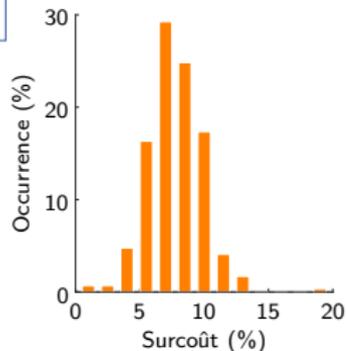
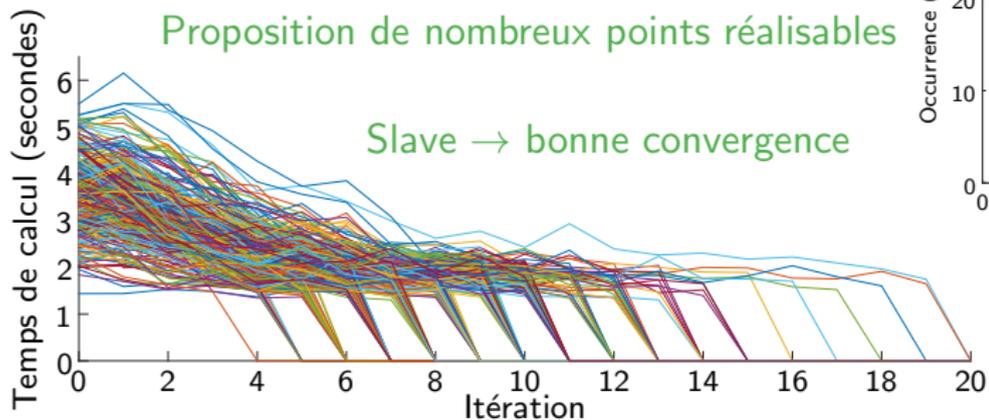
Nouvelle formulation du FCUC avec Benders ($q = 49\text{Hz}$)



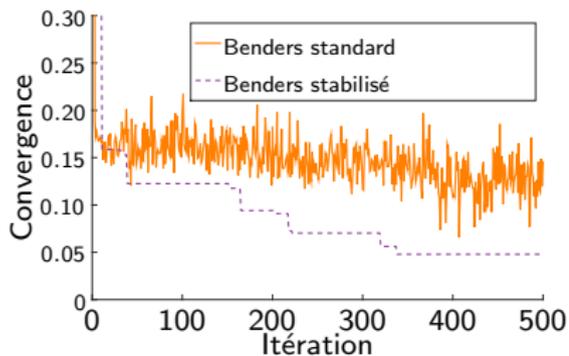
Master → convergence lente

Proposition de nombreux points réalisables

Slave → bonne convergence

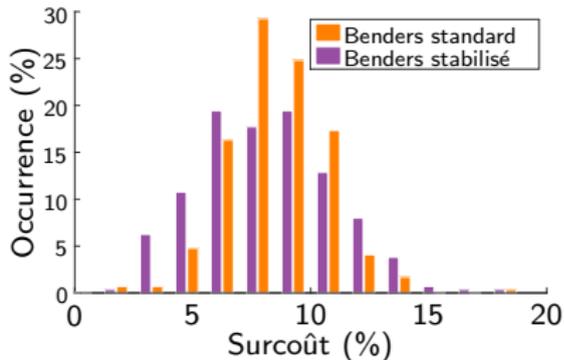
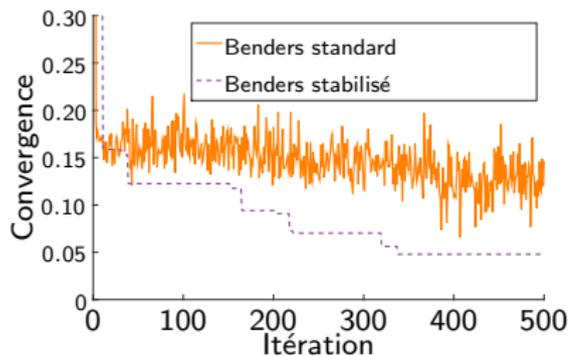


Ouverture vers une amélioration de la convergence



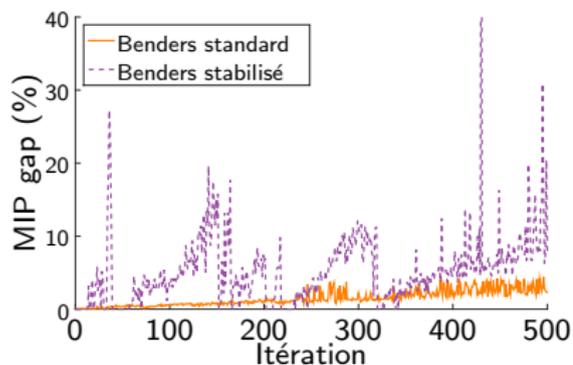
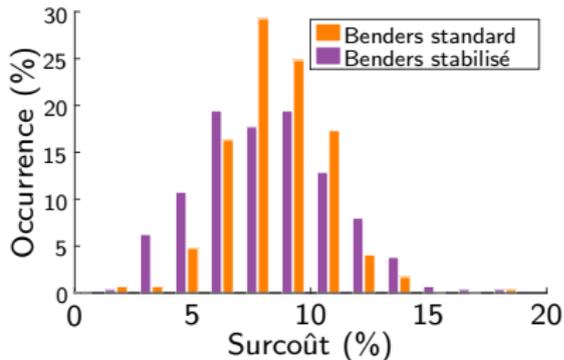
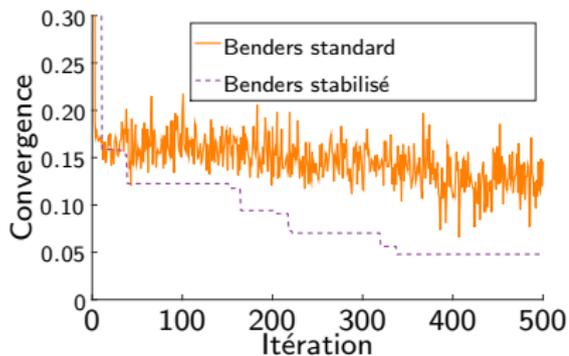
- ① 😊 Stabilisation du critère d'arrêt.

Ouverture vers une amélioration de la convergence



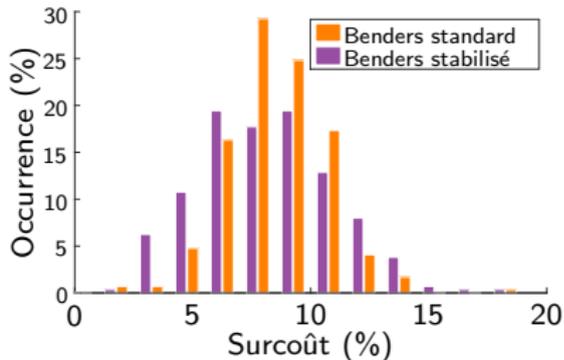
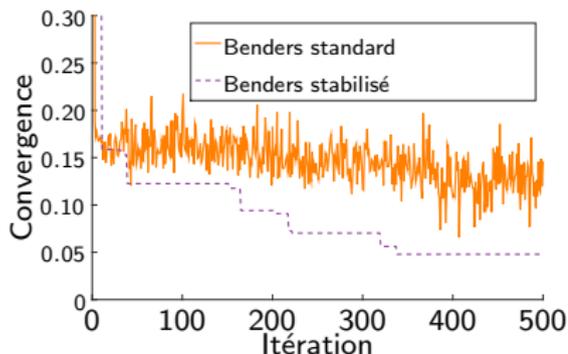
- 1 😊 Stabilisation du critère d'arrêt.
- 2 😊 Qualité accrue des solutions.

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

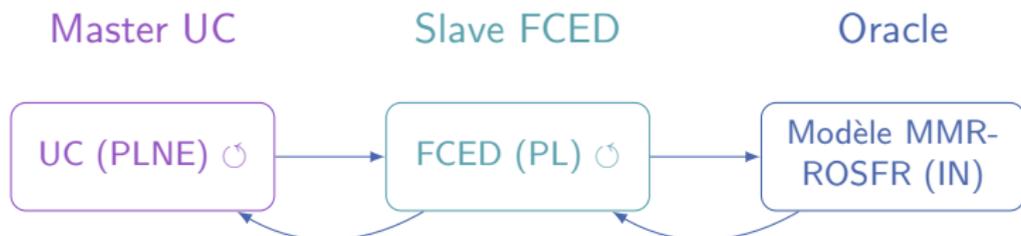
- 1 Modélisation
- 2 Intégration des EnR
- 3 Contraintes de sûreté renforcées
- 4 Nouvelle formulation du problème FCUC
- 5 Conclusions
 - Conclusions
 - Perspectives

Conclusions



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

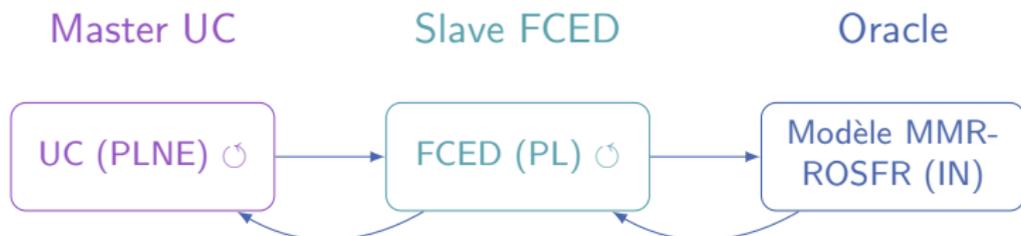
Conclusions



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



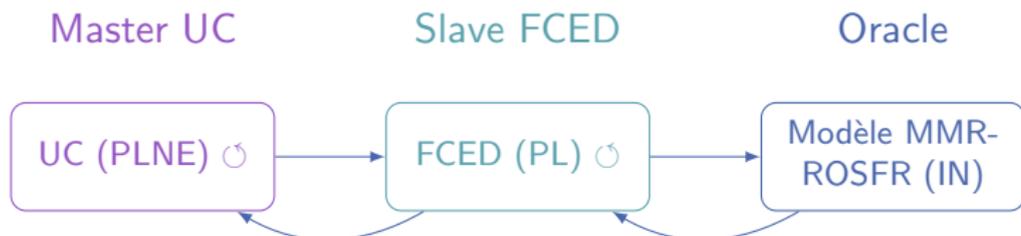
Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Définition de coupes
Formulation convexe
Convergence lente

Hypothèses de concavité
Bonne convergence

Modèle flexible

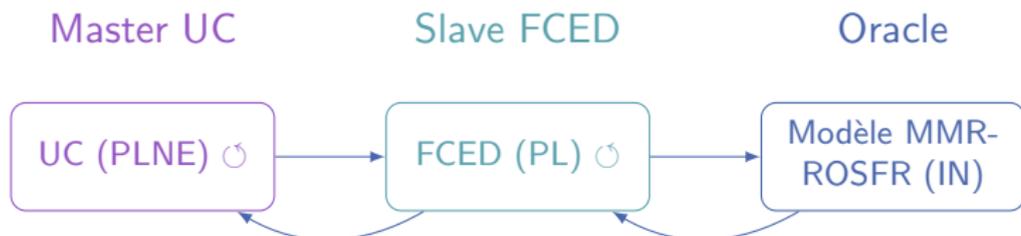
Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Perspectives

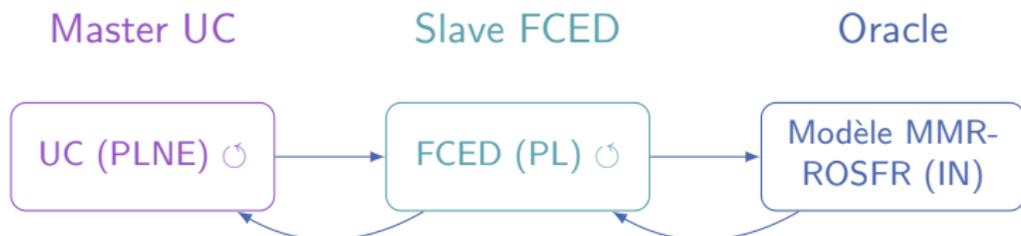


Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Perspectives



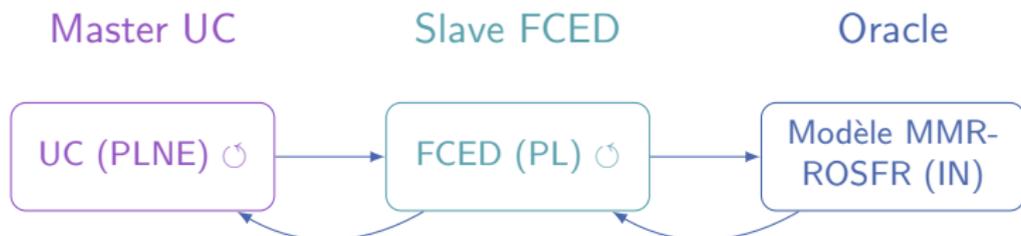
Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

Etudier la concavité

Pas variable
Parallélisation

Perspectives



Décomposition de Benders + Plans sécants + Euler explicite

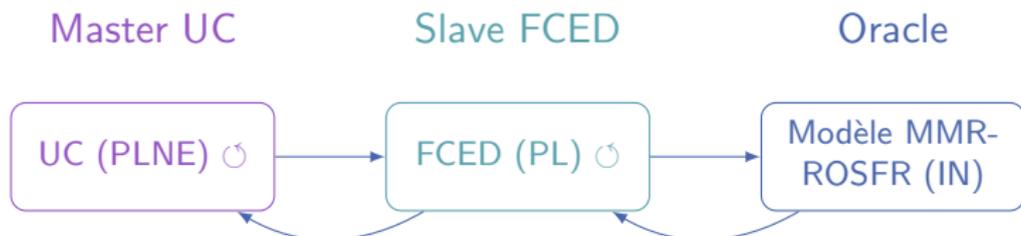
Améliorer la convergence
et les coupes de faisabilité

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.

