

Au cœur de l'efficacité énergétique



Soutenance de thèse

Sujet : Contribution à l'évaluation du couple synchronisant et analyse de son impact sur un réseau électrique à faible inertie

Raphael Caire (on behalf of) Dr. Mamadou GOUNDIAM

16/12/2022

Examineur: Bertrand RAISON, Professeur des universités, Université Grenoble Alpes

Rapporteur: Marc PETIT, Professeur, Centrale Supélec

Rapporteur: Désiré Dauphin RASOLOMAMPIONONA, Professeur, Université Polytechnique de Varsovie

Directeur de thèse: Raphael CAIRE, MCF, Université Grenoble Alpes

Co-directeur de thèse: Vincent DEBUSSCHERE, MCF, Université Grenoble Alpes

Introduction

Rappel du contexte

■ Réchauffement climatique



Ouragan au Zimbabwe et en Malawi



Incendie en Australie et en Amérique du Nord



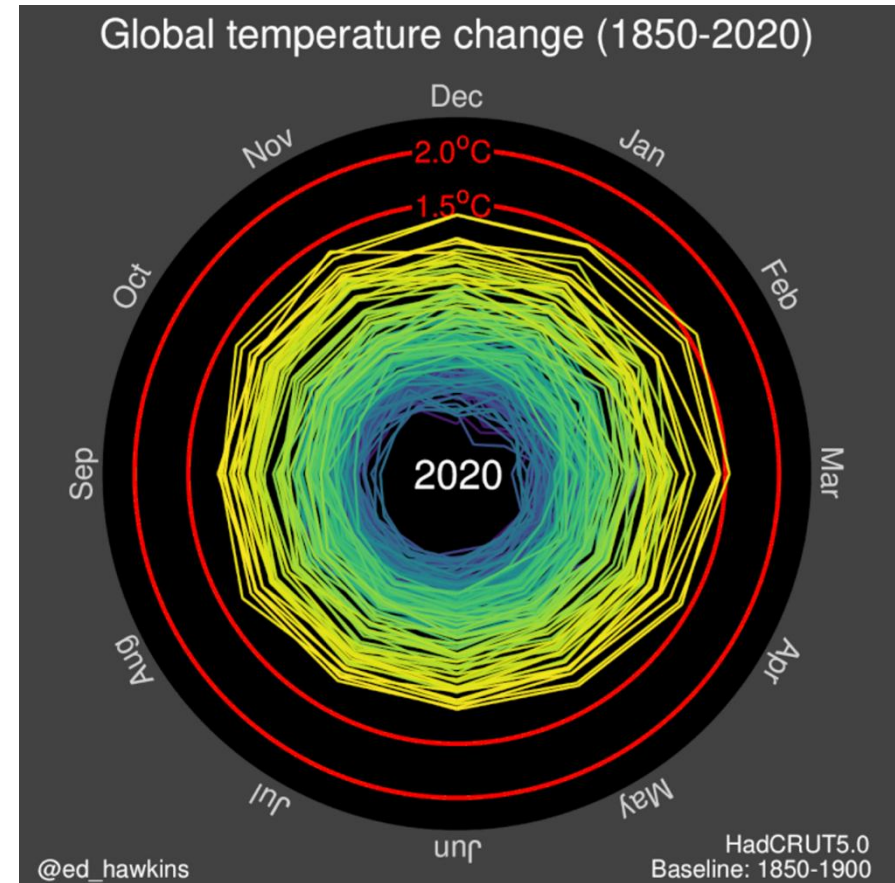
Sécheresse en Afrique de l'Est



Inondation en Asie du Sud

■ COP27

- Fond pour les pertes et dommages
- Limite de 1,5° C remise en cause



■ Une intégration des EnRs souhaitée mais délicate

- Intégration des puissances à interface d'électronique de puissance
 - Réseaux africains – forte ambition en terme de sources renouvelables
 - Système insulaire – Irlande
- 2016 - Mostafa Bakhtvar
 - « The replacement of synchronous generators by wind farms results in a reduced synchronizing torque and inertia case.»
- 2018 – Partenariat Huber Curien – Ulysses
 - Réduction de l'inertie – Réel enjeu pour le GRT
 - Risque de perte du synchronisme - Besoin d'approfondir le sujet

■ Impact de la réduction inertielle sur le couple synchronisant

Plan

- **Coefficient du Couple Synchronisant (CCS) en régime permanent**
- **Optimisation du CCS**
- **Evaluation du CCS par calcul dynamique**
- **Conclusions et perspectives**

■ Coefficient du Couple Synchronisant (CCS) en régime permanent

- Stabilité d'angle rotorique à petits signaux
- Evaluation analytique du CCS
- Validation : Réseaux 3 machines – 9 nœuds et 10 machines – 39 nœuds

■ Optimisation du CCS

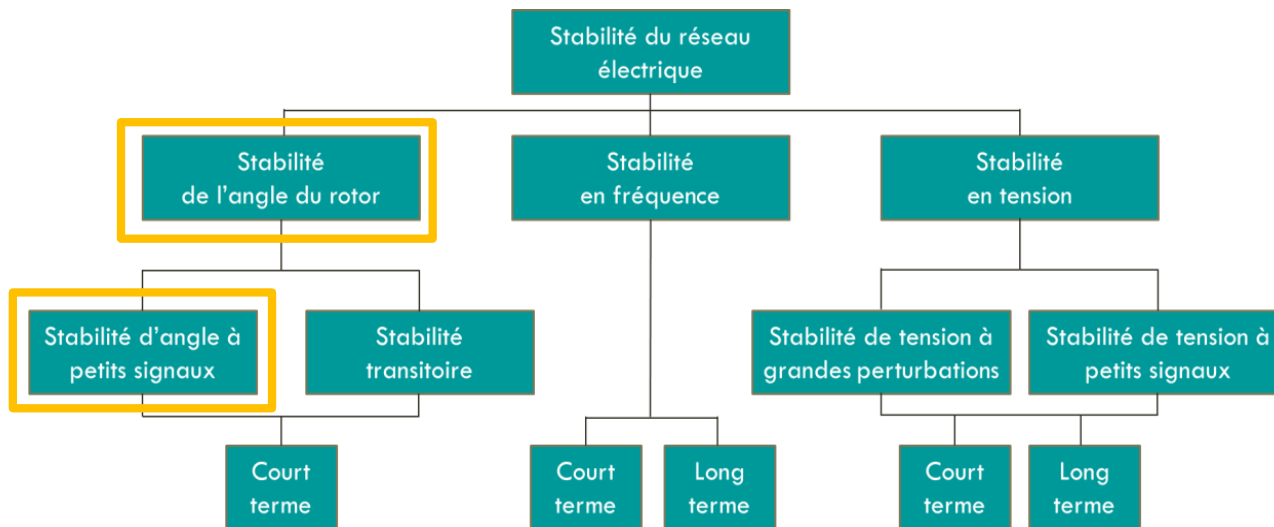
■ Evaluation du CCS par calcul dynamique

■ Conclusions et perspectives

Coefficient du couple synchronisant

Stabilité d'angle rotorique à petits signaux

■ Stabilité d'angle à petits signaux



Schématisation basée sur les travaux de Kundur

$$\Delta T_e = K_D \Delta \omega + K_S \Delta \delta$$

ΔT_e la variation du couple électrique
 K_S le coefficient du couple synchronisant

K_D le coefficient du couple d'amortissement

$\Delta \delta$ la variation de l'angle du rotor

$\Delta \omega$ la variation de la vitesse du rotor

Coefficient du couple synchronisant

Evaluation analytique du CCS

■ Modèle analytique basé sur Heffron-Phillips

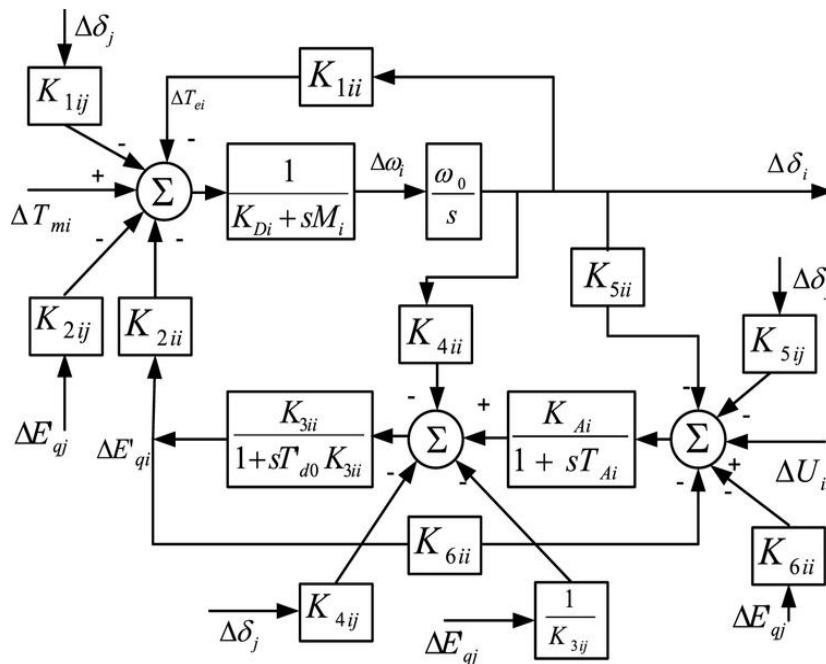


Illustration du modèle équivalent multi-machine d'Heffron-Phillips
[3]

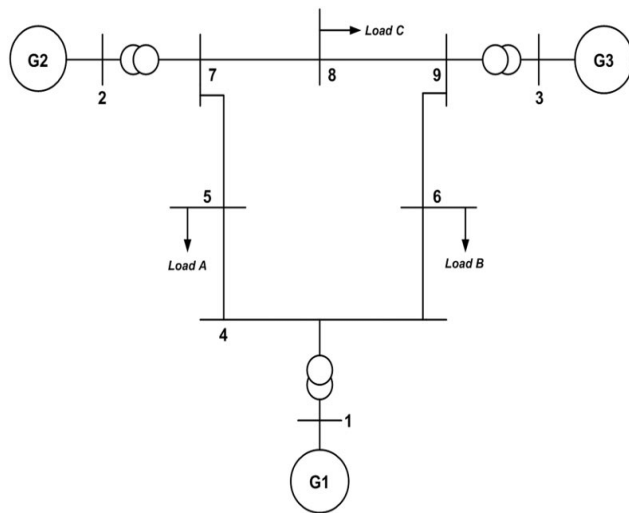
$$K_S = \begin{bmatrix} K_{S1,1} & K_{S1,2} & \dots & K_{S1,n} \\ K_{S2,1} & K_{S2,2} & \dots & K_{S2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Sn,1} & K_{Sn,2} & \dots & K_{Sn,n} \end{bmatrix}$$

- **Matrice du coefficient synchrone sur la base de 6 coefficients K1-K6 d'Heffron-Phillips**
- **Des CCS propres sur le diagonale et des CCS relatifs intermachines hors diagonale**

Coefficient du couple synchronisant

Etudes de cas

■ Réseau 3 machines – 9 nœuds



Réseau WSCC 3-machines, 9 nœuds

Référence [4]						Coefficients estimés					
[K1]			[K2]			[K1]			[K2]		
2,369	-1,480	-0,884	2,492	-0,946	-0,591	2,368	-1,482	-0,885	2,491	-0,945	-0,591
-1,539	2,240	-0,701	1,079	3,105	-0,425	-1,538	2,240	-0,702	1,078	3,105	-0,425
-1,072	-0,840	1,912	0,392	-0,671	2,363	-1,071	-0,841	1,912	0,392	-0,671	2,363
[1/K3]			[K4]			[1/K3]			[K4]		
1,177	-0,107	-0,100	0,028	0,000	-0,028	1,177	-0,107	-0,100	-0,028	0,000	0,028
-0,082	3,131	-0,771	-1,220	1,904	-0,684	-0,082	3,131	-0,771	1,220	-1,904	0,684
-0,423	-1,260	3,703	-1,302	-1,037	2,338	-0,423	-1,261	3,703	1,301	1,036	-2,338
[K5]			[K6]			[K5]			[K6]		
-0,006	-0,008	0,015	1,000	0,000	0,001	-0,006	-0,008	0,015	0,882	0,071	0,068
-0,057	0,027	0,030	0,458	0,463	0,196	-0,057	0,027	0,030	0,455	0,518	0,176
-0,076	-0,052	0,128	0,498	0,204	0,426	-0,076	-0,052	0,128	0,491	0,181	0,473

$$K_s = [K1] + \frac{[K2][K4] - [KA][K2][K5]}{[KA][K6] + \left[\frac{1}{K3}\right]}$$

Matrice Ks (pu/rad)		
2,066	-1,383	-0,684
-1,319	1,551	-0,233
-0,568	-0,249	0,817

Coefficient du couple synchronisant

Etudes de cas

■ Réseau 10 machines – 39 nœuds

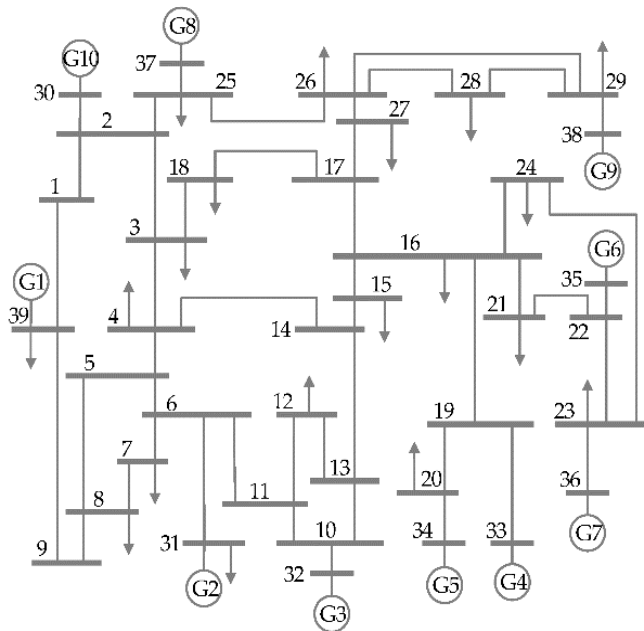


Diagramme du réseau IEEE 10 machines – 39 nœuds

	K_s propre (pu/rad)
G1	15,99
G2	7,38
G3	8,84
G4	8,59
G5	6,54
G6	8,86
G7	7,64
G8	7,66
G9	9,09
G10	10,73

Coefficient du couple synchronisant

Etudes de cas

Conclusion

- La méthode analytique est applicable aux réseaux simples comme complexes ;
- Contribution : Adaptation d'une méthode de calcul du coefficient du couple synchronisant
- Méthode validée à travers des études de cas

- Coefficient du Couple Synchronisant (CCS) en régime permanent
- **Optimisation du CCS**
 - Définition du problème
 - Etudes de cas : réseaux Kundur et New England
- Evaluation du CCS par calcul dynamique
- Conclusions et perspectives

Optimisation du CCS

Définition du problème

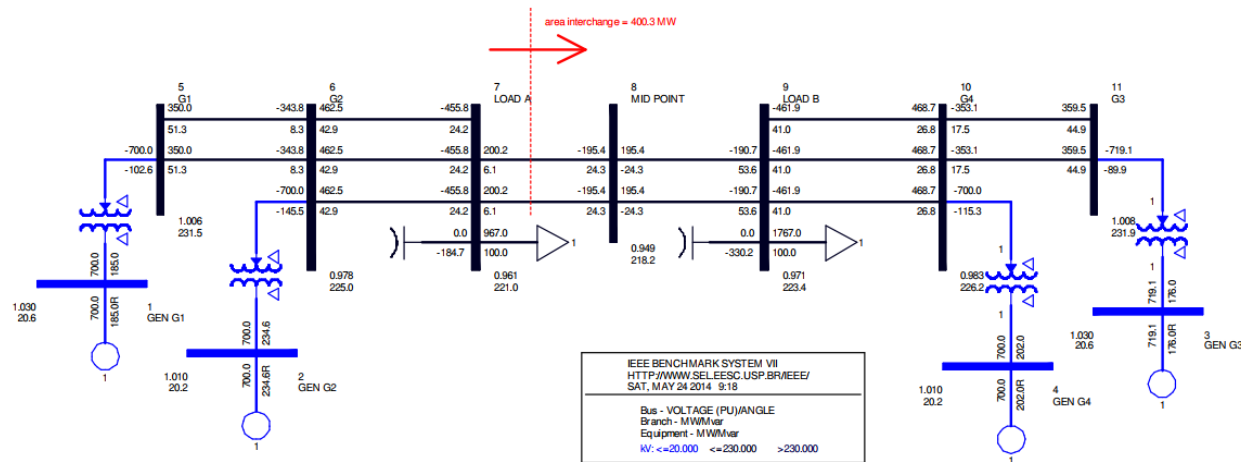
Différents scenarii d'optimisation

Cas	Formulation du problème			
Cas 0	$x = (P_{i:i \in \mathbf{G}}, Q_{i:i \in \mathbf{G}}, V_1, \dots, V_N, \delta_2, \dots, \delta_N)$			
	min	$\sum_{ik \in \mathbf{L}} P_{losses,ik},$		
	s.t.	$ P_i^{sp} - P_i^{cal} \leq tol$	$\forall i \in \mathbf{N},$	$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}$
		$ Q_i^{sp} - Q_i^{cal} \leq tol$	$\forall i \in \mathbf{N},$	$\delta_i^{min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{max}$
		$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}$	$\forall i \in \mathbf{G},$	$S_{flow,ik} \leq S_{flow,ik}^{max}$
	$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max}$	$\forall i \in \mathbf{G},$	$\forall ik \in \mathbf{L}.$	
Cas A	Comme le cas 0 avec une contrainte supplémentaire :			
	s.t.	$K_{s,i} \geq 0$	$\forall i \in \mathbf{G}.$	
Cas B	Comme le cas 0 mais avec un changement de fonction objectif :			
	max	$\sum_{i \in \mathbf{G}} K_{s,i}$		
Cas C	Comme le cas A mais avec un changement de fonction objectif :			
	max	$\sum_{i \in \mathbf{G}} K_{s,i}^2$		
Cas D	Comme le cas C mais avec toutes les tensions des générateurs au max :			
		$x = (P_{i:i \in \mathbf{G}}^G, Q_{i:i \in \mathbf{G}}^G, \delta_2, \dots, \delta_N, V_{G+1}, \dots, V_N)$		
	$V_i = V_i^{max}$	$\forall i \in \mathbf{G}.$		

Optimisation du CCS

Etude de cas

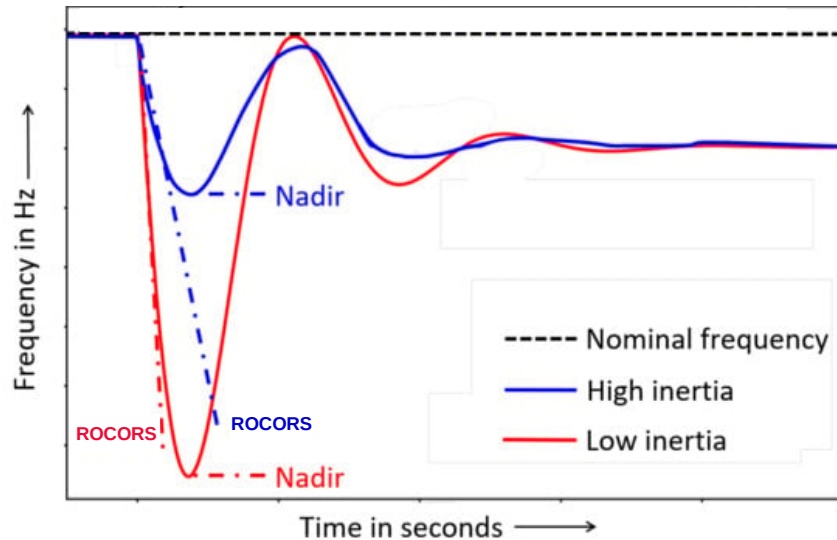
■ Réseau Kundur : 4 machines – 2 zones



		Cas 0: Min Pertes	Cas A : Min Pertes, $K_{s,i} \geq 0$	Cas B : Max Total CCS propre, $K_{s,i} \geq 0$	Cas C : Max Carré du total CCS propre, $K_{s,i} \geq 0$	Cas D : Max Somme des carrés des CCS propres, $V_g = 1,05$ $K_{s,i} \geq 0$
CCS propre (pu/rad)	G1	3,19	3,19	↓ 2,36	↓ 2,34	↓ 2,36
	G2	2,81	2,81	↑ 3,32	↑ 3,53	↑ 3,32
	G3	2,78	2,78	↑ 3,06	↓ 1,43	↑ 2,91
	G4	3,81	3,81	↑ 4,78	↑ 5,56	↑ 4,92

Optimisation du CCS

Etude de cas



Réponse fréquentielle du réseau à fort et faible inertie [5]

	G1	G2	G3	G4
	10^{-4} (Hz)			
Cas 0	1,56	2,63	68,8	14,1
Cas A	1,56	2,63	68,8	14,1
Cas B	↓ 0,86	↓ 1,46	↓ 65,4	↓ 12,8
Cas C	↓ 0,99	↓ 1,60	= 68,8	↑ 14,4
Cas D	↓ 1,54	↓ 2,24	= 68,8	↓ 14,0

ROCORS du système 4 Machines – 2 zones – Perturbation sur le bus 3

	G1	G2	G3	G4
	10^{-4} (Hz)			
Cas 0	0,41	0,47	6,21	1,67
Cas A	0,41	0,47	6,21	1,67
Cas B	↓ 0,26	↓ 0,24	↓ 5,91	↓ 1,50
Cas C	↓ 0,28	↓ 0,3	↑ 6,25	↑ 1,70
Cas D	↓ 0,39	↓ 0,41	↑ 6,26	↑ 1,69

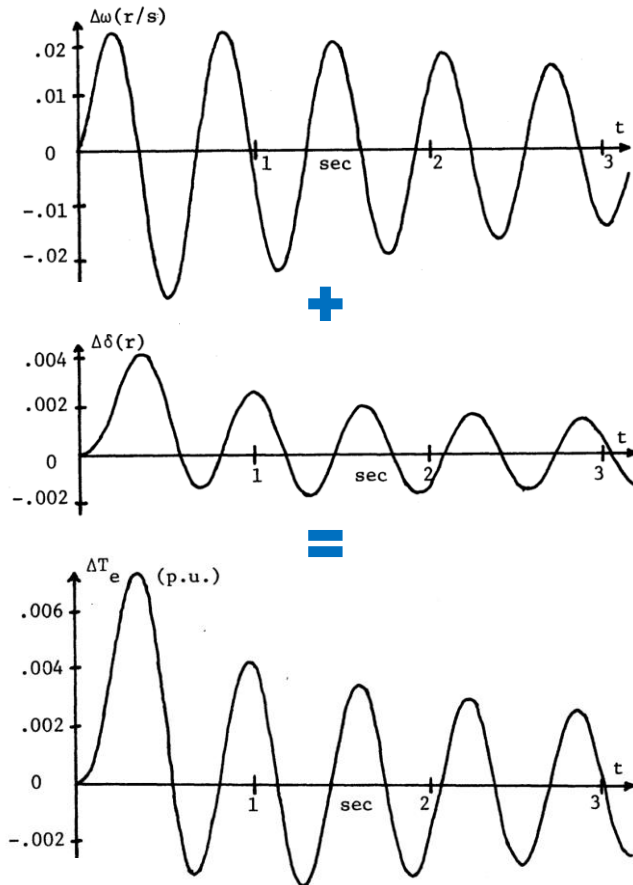
Nadir de la vitesse rotorique du système 4 Machines – 2 zones – Perturbation sur le bus 3

Conclusion

- Contribution : Optimisation du coefficient du couple synchronisant
- Tendance d'amélioration du ROCORS et du Nadir de la vitesse rotorique
- Besoin d'approfondir l'étude

- Coefficient du Couple Synchronisant (CCS) en régime permanent
- Optimisation du CCS
- **Evaluation du CCS par calcul dynamique**
 - Contribution à la méthodologie de Shaltout
 - Réduction inertielle par le développement de l'autoconsommation
 - Etude de cas
 - Réduction inertielle par substitution de machines synchrones par des parcs éoliens
 - Modèles de parcs DFIG et PMSG
 - Etudes de cas
- Conclusions et perspectives

■ Méthode de Shaltout



$$\Delta T_e = K_D \Delta \omega + K_S \Delta \delta$$

$$E(t) = \Delta T_e(t) - [K_D \Delta \omega(t) + K_S \Delta \delta(t)]$$

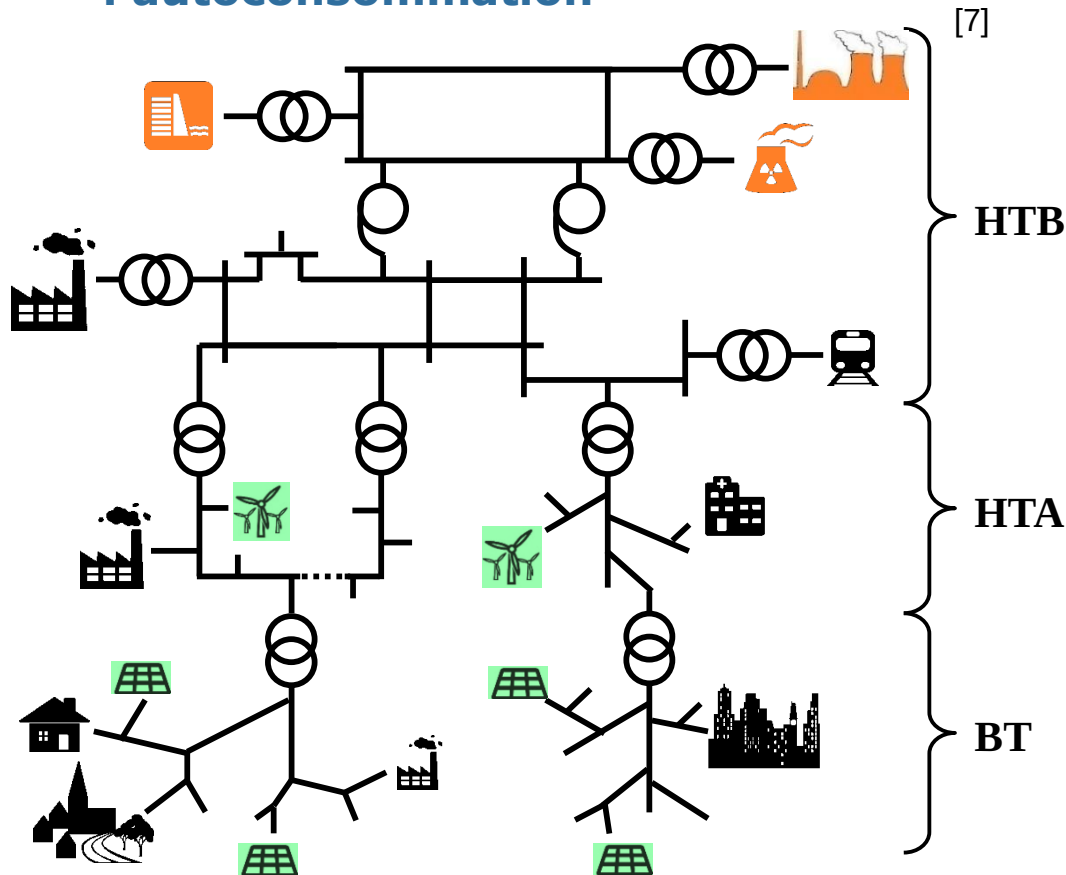
$$K_S = \frac{\int_{t_i}^{t_i+T} \Delta T_e(t) \cdot \Delta \delta(t) \cdot dt - K_D \int_{t_i}^{t_i+T} \Delta \omega(t) \cdot \Delta \delta(t) \cdot dt}{\int_{t_i}^{t_i+T} \Delta \delta(t)^2 \cdot dt}$$

$$K_D = \frac{\int_{t_i}^{t_i+T} \Delta T_e(t) \cdot \Delta \omega(t) \cdot dt - K_S \int_{t_i}^{t_i+T} \Delta \delta(t) \cdot \Delta \omega(t) \cdot dt}{\int_{t_i}^{t_i+T} \Delta \omega(t)^2 \cdot dt}$$

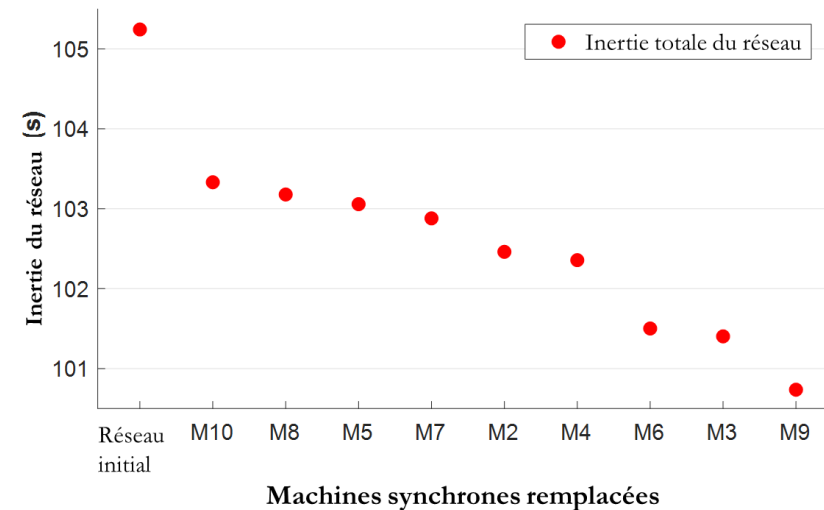
Evaluation du CCS par calcul dynamique

Réduction inertielle par autoconsommation

Hypothèse forte : délestage des charges par accroissement de l'autoconsommation



$$H_{sys} = \frac{\sum H_{SG} S_{SG}}{\sum S_{SG}} = \frac{\sum E_{SG}}{S_{sys}} \quad [8]$$



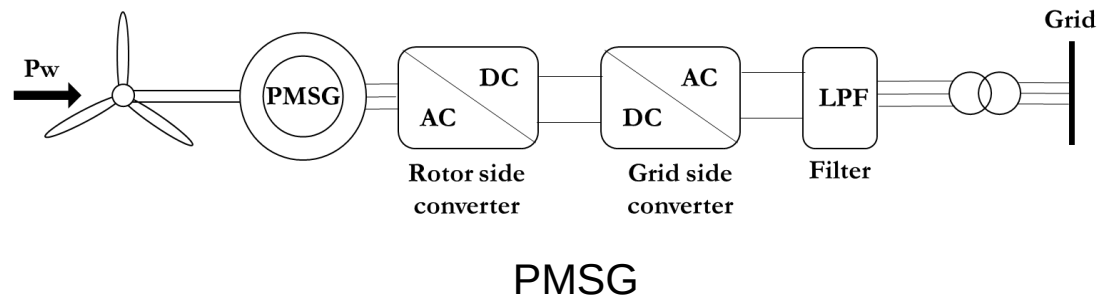
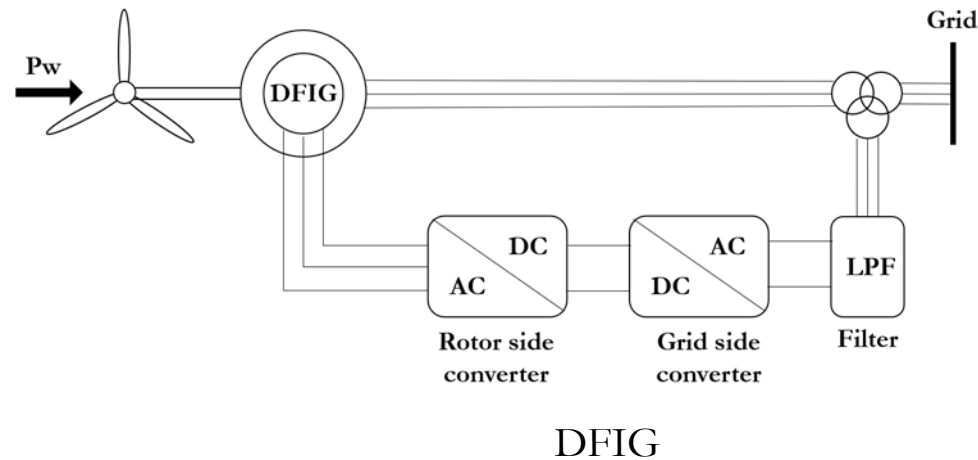
[7] Victor Gouin, « Évaluation de l'impact du Smart Grid sur les pratiques de planification en cas d'insertion de production décentralisée et de charges flexibles », 2015

[8] P. Tielens et D. Van Hertem, « The relevance of inertia in power systems, 2016

Evaluation du CCS par calcul dynamique

Réduction inertielle par substitution de machines synchrones par des parcs éoliens

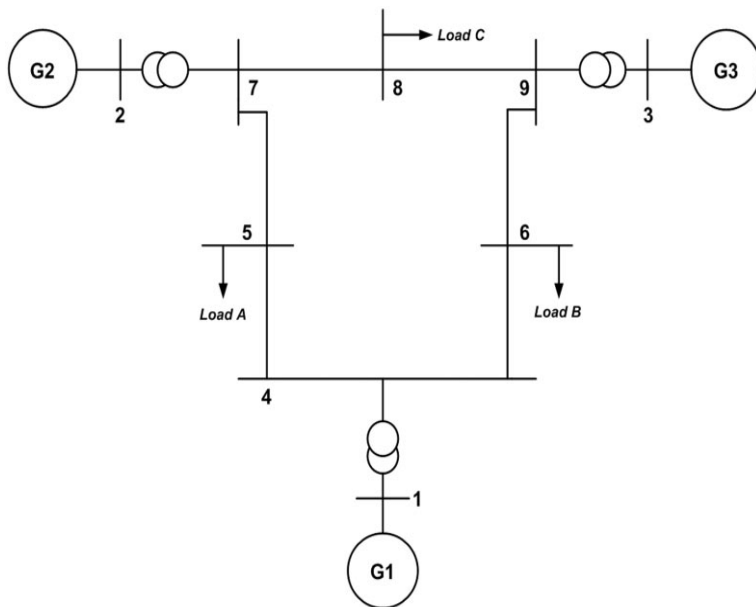
■ Modélisation des éoliennes



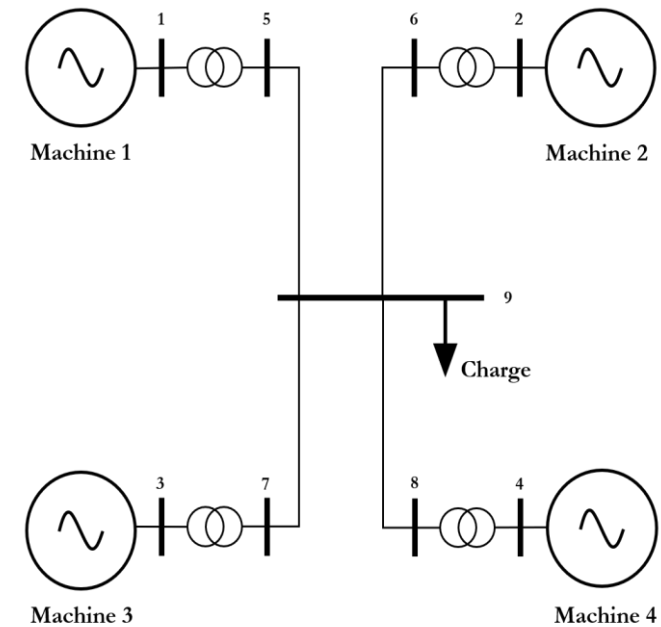
Evaluation du CCS par calcul dynamique

Etudes de cas

■ Réseau 3 machines – 9 nœuds modifié



Kennelly



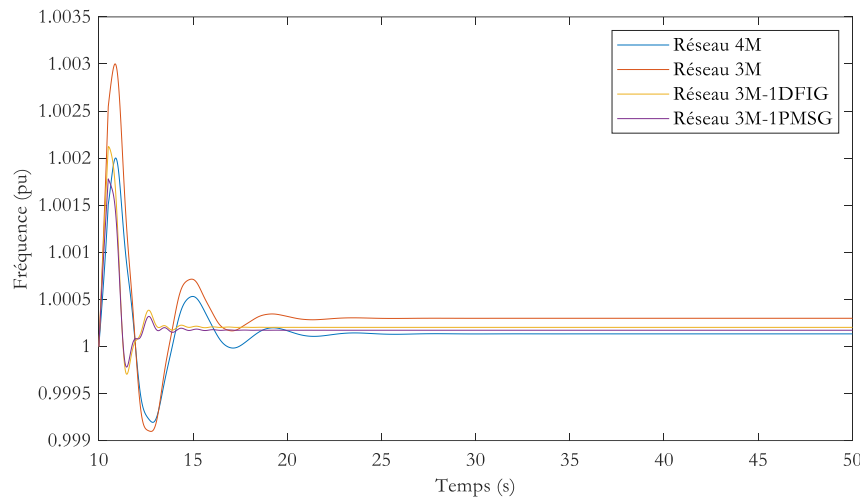
$$\Delta(T_e(i) - T_e(j)) = K_D \omega_B \Delta(s_m(i) - s_m(j)) + K_s \Delta(\delta(i) - \delta(j))$$

Evaluation du CCS par calcul dynamique

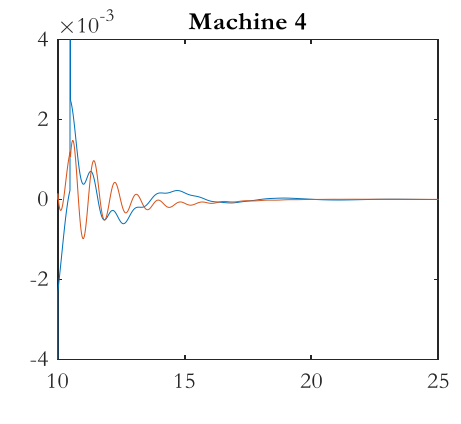
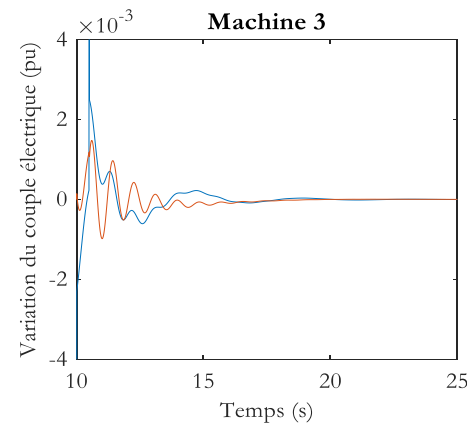
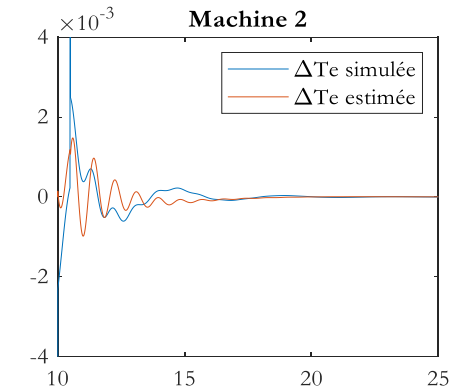
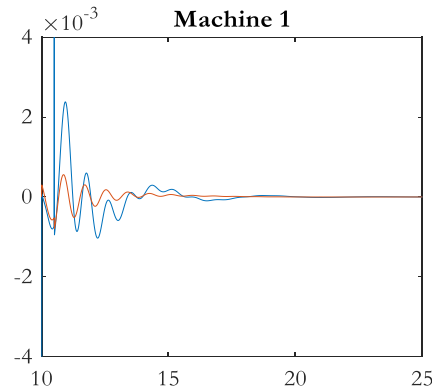
Etudes de cas

Réseau 3 machines – 9 nœuds modifié

● Perturbation de la charge réactive



	Ks (pu/rad)		
	G1	G2	G3
Variante 4M	2,173	5,939	5,939
Variante 3M	↓1,813	↓5,739	↓5,739
Variante DFIG	↑3,082	↓2,506	↓2,510
Variante PMSG	↓1,634	↓5,630	↓5,630



Plan

- Coefficient du Couple Synchronisant (CCS) en régime permanent
- Optimisation du CCS
- Evaluation du CCS par calcul dynamique
- **Conclusions et perspectives**

Conclusion générale

■ Les travaux menés ont pu montrer :

- La validité d'une approche analytique de l'évaluation du coefficient du couple synchronisant ;
- L'amélioration dans une certaine mesure des caractéristiques de stabilité du réseau à travers une optimisation du CCS ;
- La plus value d'une méthodologie dynamique de l'évaluation du CCS ;
- La tendance à diminuer du CCS dans un contexte de remplacement des machines synchrones par des parcs éoliens de type DFIG ou PMSG.

Perspectives

- **Des développements intéressants pourraient permettre une meilleure compréhension des phénomènes en jeu, notamment :**
 - L'analyse de l'impact des oscillations interzones sur le K_s , et notamment après usage de l'OPF ;
 - L'approfondissement de la compréhension du lien entre coefficients inter machines et coefficients propres ;
 - L'analyse de l'impact de la topologie et des transferts de puissance réactive ;
 - L'usage des contrôles-commandes des puissances à interface d'électronique de puissance à des fins d'amélioration de la stabilité sur le plan synchrone.

Au cœur de l'efficacité énergétique



Merci

