

Workshop

« Digitalisation, protection et
stabilité des réseaux »

Modélisation dynamique des réseaux de distribution à forte présence de convertisseur d'électronique de puissance

Julia Chêne, 1ère année de doctorat

Nouredine Hadjsaïd, Professeur, Directeur de these

Jérôme Buire, Maître de Conférence, Co-encadrement

G2Elab – Equipe SYREL – Chaire Smartgrid avec Enedis

12 juin 2025

Sommaire

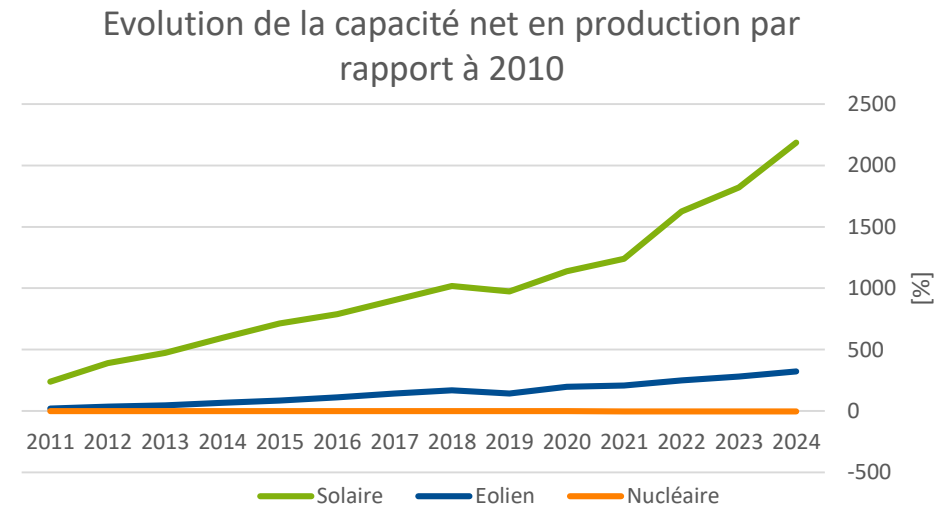
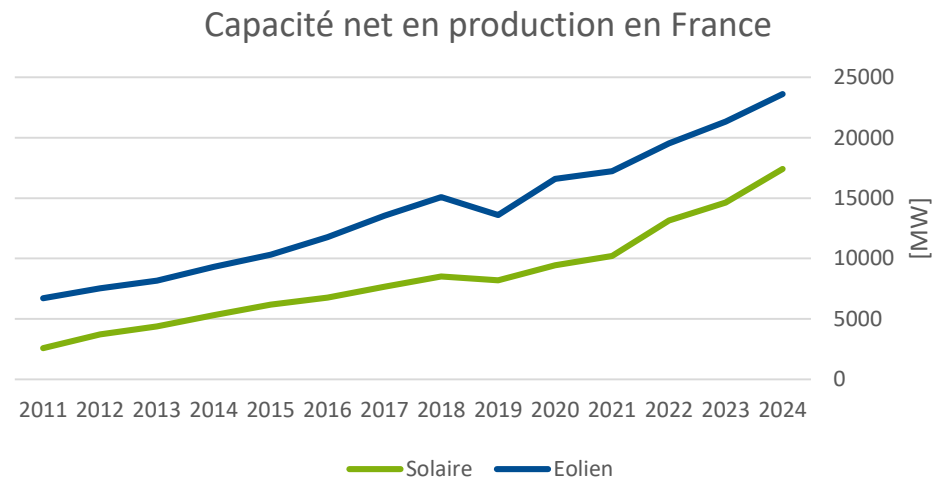
1. Contexte des travaux
2. Approche proposée du problème de stabilité
3. Méthodologie
4. Conclusion

Contexte

L'évolution du réseau

EnR : énergies renouvelables

- Objectif du gouvernement français issu de la loi Energie-Climat de novembre 2019 : 33% de part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie pour 2030 (chauffage, électricité et transport) : **22.2% en 2023**



87% de la production éolienne et solaire directement raccordée au réseau de distribution en 2021

Source données :

<https://www.entsoe.eu/data/power-stats/>

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables/>

<https://www.enedis.fr/presse/le-reseau-public-de-distribution-delectricite-en-2050>

L'évolution du réseau et les défis du GRD

GRD : Gestionnaire
de Réseau de
Distribution

- Décentralisation de la production
 - Raccord majoritaire des productions par les EnR sur le réseau de distribution
 - Flux bidirectionnels de puissance
- Electrification des usages
 - Raccordement de plus en plus de clients
 - Mobilité électrique (EnR pour le transport)
 - Technologie des convertisseurs qui introduisent de nouvelles formes d'instabilités
- D'une production centralisée dominée par les générateurs synchrones à un réseau qui évolue vers une production décentralisée basée sur les EnR : La définition de la stabilité évolue en même temps que le réseau, sa technologie, son exploitation, sa structure et les besoins des consommateurs

Approche de la question de la stabilité

Classification de référence de la stabilité

La classification sectionne les phénomènes d'instabilité :

- Pour adapter les outils et procédures aux phénomènes ciblés
 - Permet de séparer les acteurs
 - Admet que les catégories ne sont pas distinctes
 - Chute de tension entre deux machines qui se désynchronisent
 - Chute de tension suite à une excursion de fréquence
-
- Décrit des phénomènes observés et étudiés a posteriori
 - Identifie les effets d'une instabilité
 - Dominé par les générateurs synchrones
-
- Décrit les CDS comme une cause d'instabilité sur des cas précis
 - Introduit des phénomènes d'instabilité dans toutes les autres catégories

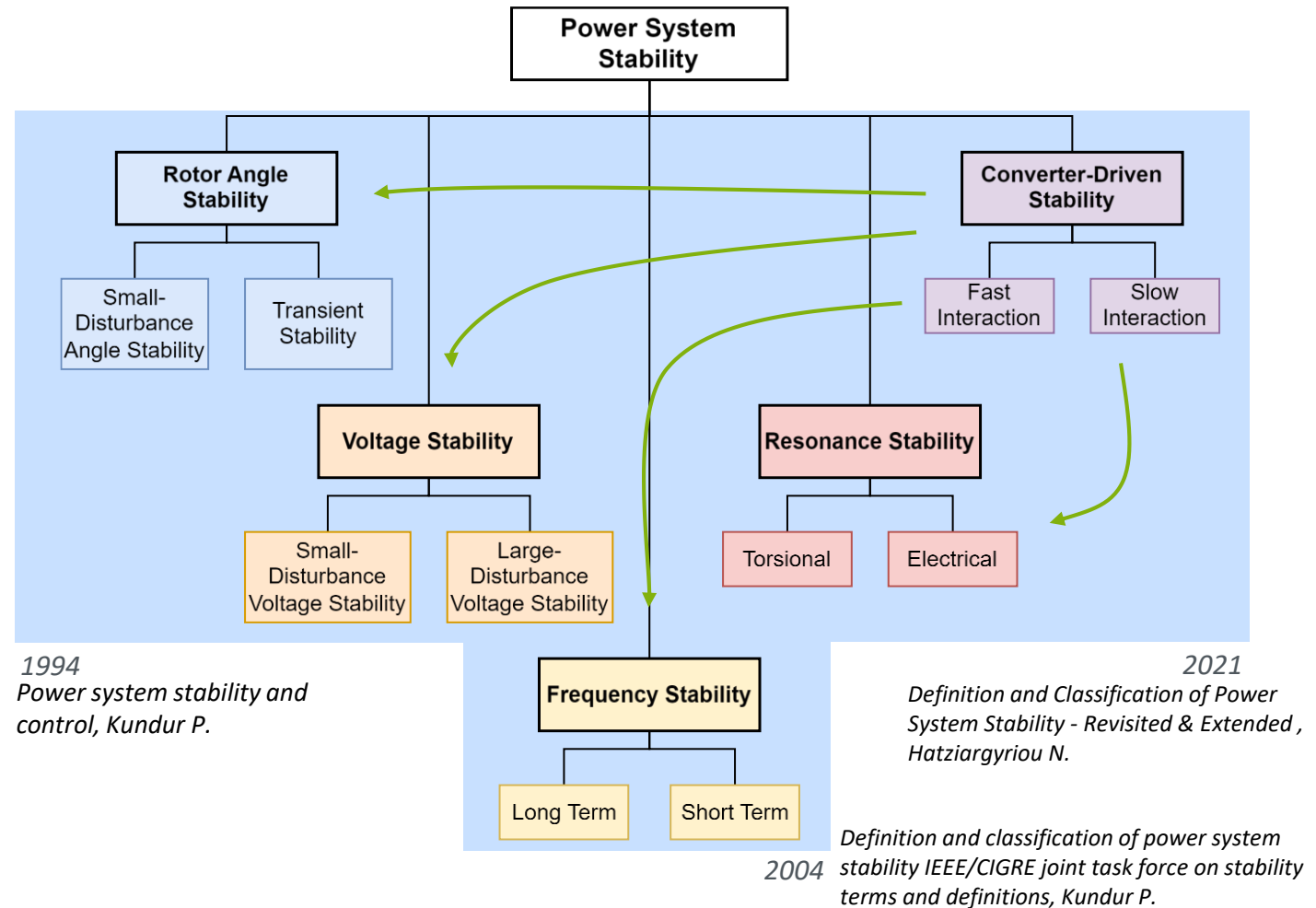


Figure – Classification des domaines d'instabilité selon les sources de référence

Intersectionnalité des domaines d'instabilités

- La classification sectionne sur des phénomènes empiriques les domaines d'instabilités
- La gestion de ces instabilités est elle-même sectionnée :
 - les machines par le fabricant
 - la fréquence sur le réseau de transport
 - la tension sur le réseau de distribution
- L'ajout des convertisseurs dans la classification rends les interdépendances entre les catégories encore plus floues

Est-ce que les causes et effets d'instabilités permettent toujours d'avoir la même efficacité que pour un réseau centralisé dominé par les générateurs synchrones pour la gestion de ces instabilités en terme de procédés et d'acteurs ?

Pouvons-nous penser une définition *continue* ou *quantifiable* de la stabilité d'un réseau électrique ?

Approche de la stabilité du réseau

*Qu'est-ce qu'on entend par **stabilité** ?*

- L'approche historique :
 - est empirique
 - ciblée sur l'électro-technique pour l'analyse des cas d'instabilité
- La stabilité est la notion centrale de la théorie du contrôle :
 - Lyapunov (générale)
 - Petits-sinaux (limite l'étude autour d'un point de fonctionnement)
 - Marge de stabilité (Bode ou Nyquist) } Peut-on la quantifier pour un système aussi complexe qu'un réseau de la même manière ?

} C'est un état, stable ou instable
- Une approche analytique des modèles pour prévenir les questions de stabilité plutôt qu'étudier à posteriori

Approche de la stabilité du réseau

Historiquement, la stabilité s'étudie

- Sur des sous-système du réseau indépendamment puis interconnectés
- Sur la base du mode dominant le plus lents – les modes électromécaniques des générateurs synchrones donc en négligeant toutes les autres dynamiques comme les flux du stator

Les onduleurs sur le réseau

- Hypothèse de flexibilité et de rapidité – on peut les supposer peu impactant sur les modes lents dominants donc pour le réseau

Cependant, on trouve des exemples d'oscillations qui apparaissent sur le réseau

En simulation

- Lorsque les dynamiques rapides ne sont plus négligées, sur la tension et la fréquence causé par la boucle de courant des onduleurs :
 - Conclusion des travaux de Fadi Kelada : présence d'instabilités entre la boucle de courant et le flux des stators dans les machines synchrones
- Les études montrent des instabilités :
 - Entre les machines synchrones et les onduleurs
 - Causés par une forte pénétration d'EnR
- En parallèle de leurs flexibilités, les onduleurs pêchent par :
 - La baisse de l'inertie du réseau
 - Une faible courant de court-circuit

Méthodologie

Introduction des modèles simplifiés

Comment comprendre les interactions que mettent en avant les onduleurs ?

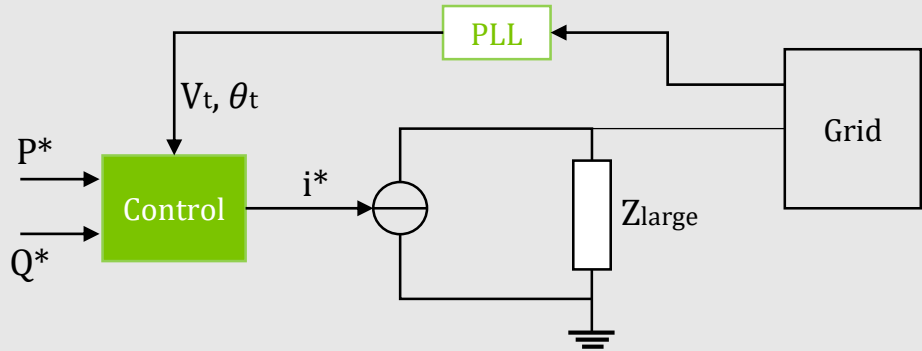
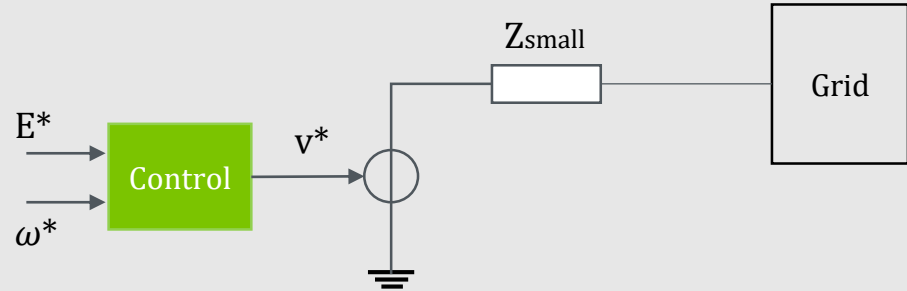
Point de départ

- Un réseau est grand, complexe, hautement non-linéaire et non constant dans le temps (en terme de paramètre et de topologie)
 - L'étude des réseaux utilise la réduction d'ordre du modèle et/ou la linéarisation – réduire l'ordre du système via un certain nombre d'hypothèses simplificatrices
- On souhaite prendre la direction opposée : partir d'un modèle simple pour le complexifier

Objectifs

- Réduire l'ordre du système complet en parlant d'un modèle très simplifié – un modèle DC
- Identifier les paramètres qui causent les interactions observées pour un set d'équation réduit
- Observer le comportement des phénomènes avec la complexification du modèle

Les onduleurs sur le réseau

Onduleur en Grid-Following	Onduleur en Grid-Forming
Injecte une quantité de puissance pour alimenter le réseau	Détermine la fréquence et la tension du réseau
Contrôle l'amplitude du courant de sortie et la phase	Contrôle l'amplitude de la tension et la fréquence
Nécessite de la synchronisation	Ne nécessite pas de synchronisation
Stable en court-circuit (Y infini) ou connecté à une source parfaite de tension, instable connecté à une source idéale de tension ($Y = 0$)	Stable en circuit ouvert (Z infini) ou connecté à une source de courant, instable connecté à une source idéale de courant ($Z = 0$)
 GFL : source courant	 GFM : source de tension

[1] *Grid Forming Inverters: EPRI Tutorial (2024)*. EPRI, Palo Alto, CA: 2024. 3002030937.

[2] Y. Li, Y. Gu, and T. C. Green, "Revisiting Grid-Forming and Grid-Following Inverters: A Duality Theory." *IEEE transactions on power systems*, vol. 37, no. 6, pp. 4541–4554, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3151851.

Le mini-modèle DC initial

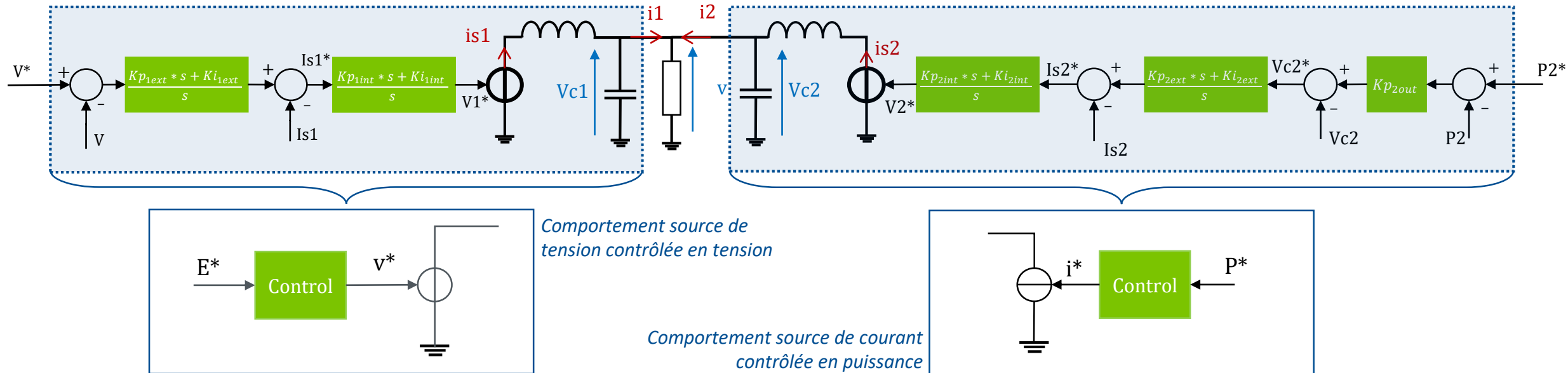


Figure – Schéma du mini-modèle DC – modèle simplifié de contrôle d'onduleurs

Equations physiques

$$\begin{aligned} \dot{I}_{s1} &= \frac{1}{L_1}(K_{1int}(I_{s1ref} - I_{s1}) + M_{1int} - V) \\ \dot{I}_{s2} &= \frac{1}{L_2}(K_{p2int}(I_{s2ref} - I_{s2}) + M_{2int} - V) \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{1 + C_2/C_1} \left(\dot{I}_{s2} - \frac{C_2}{C_1} \left(I_{s1} + \frac{I_1 - I_{s1}}{C_1 R} \right) \right) \\ \dot{I}_1 &= \frac{I_{s1} - I_1}{C_1 R} - \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Equations de contrôle

$$\begin{aligned} \dot{M}_{2ext} &= K_{i2ext}(V_{c2ref} - V) \\ \dot{M}_{2int} &= K_{i2int}(I_{s2ref} - I_{s2}) \\ \dot{M}_{1int} &= K_{i1int}(I_{s1ref} - I_{s1}) \\ \dot{M}_{1ext} &= K_{i1ext}(V_{ref} - V) \end{aligned}$$

Complexification de la structure

Complexifier les modèles vers une structure GFL/GFM sur un système AC triphasé – Quels phénomènes d'interactions vont apparaître, s'atténuer ou tenir sous des hypothèses *complexificatrices*

- Réduire ordre du système pour y voir plus claire :
 - Identifier les paramètres qui peuvent causer des interactions
 - Qualifier les non-linéarités
 - Voir le déplacement des modes (comportement physiques du système) pour :
 - Un set de perturbations
 - Variation de paramètres de contrôle ou de dimensionnement
 - Variation de structure de contrôle sur les interactions observées
- Voies de complexification :
 - Ajout d'inductance en sortie des sources (filtre LCL)
 - Ajout de modèles de ligne
 - Passage en AC triphasé – ajout de la synchronisation

Conclusion

Direction générale

- Aller vers la complexification des modèles pour comprendre les liens entre les dynamiques du réseau
- En identifiant les liens entre les phénomènes, peut-on encore séparer les phénomènes de stabilité
 - Sinon comment les déterminer et quels acteurs agissent sur quel domaine de stabilité

Les autres objectifs de la thèse

- Idée de quantifier la stabilité par des paramètres, marges, fonctions continues, ou toute combinaison, etc...
- Beaucoup de questions
 - Est-ce qu'un équipement GFL peut être neutre/contribuer à la marge de stabilité du réseau ou sa quantification
 - Sinon, peuvent-ils être coordonnés



Merci



Des questions ?