

SARAHMED Éditions

Contactez-nous par courriel à l'adresse
leseditionssarahmed@gmail.com ou consultez notre site web :
<https://sarahmed.net/>

ISBN 978-9969-677-17-1

Mai 2026

Réseaux intelligents à forte part renouvelable : modélisation PV–éolien et contrôle de fréquence

**Modélisation avancée, architectures de
commande et contrôle primaire de
fréquence synthèse**

Dr. Chaouki Messasma

Département de l'automatisation et des systèmes intelligents

Université Sétif 1 — Algérie

Avant-propos

La décarbonation du secteur électrique constitue aujourd'hui l'un des défis techniques et industriels les plus complexes que l'humanité ait jamais eu à relever. Contrairement aux transitions énergétiques passées du bois au charbon au XIXe siècle, du charbon au pétrole au XXe siècle la transition vers les sources d'énergie renouvelables (SER) ne s'inscrit pas dans une logique de substitution progressive naturelle, mais s'impose sur un calendrier contraint par l'urgence climatique et les engagements politiques internationaux. L'Accord de Paris (2015) fixe l'objectif de limiter le réchauffement global à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels, ce qui suppose d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle mondiale avant 2050 selon les scénarios de l'Agence internationale de l'Énergie.

Dans ce contexte, les technologies photovoltaïques et éoliennes se sont imposées comme les piliers de la transition électrique. En 2023, ces deux filières représentaient à elles seules plus de 90 % des nouvelles capacités de production d'électricité installées dans le monde. Leur coût de production a chuté de manière spectaculaire de plus de 90 % pour le PV et de plus de 60 % pour l'éolien terrestre depuis 2010, les rendant compétitives sans subvention face à toutes les technologies conventionnelles dans la grande majorité des marchés mondiaux.

Mais cette domination croissante du PV et de l'éolien dans le mix électrique génère des défis techniques inédits pour les opérateurs de réseau. Ces sources produisent de l'électricité de manière variable, dépendante des conditions météorologiques, et sont raccordées au réseau via des convertisseurs d'électronique de puissance qui ne fournissent pas d'inertie physique. Ce déficit d'inertie modifie

profondément les dynamiques de fréquence du réseau lors de perturbations, augmentant le taux de variation de fréquence (ROCOF) et réduisant la marge de temps disponible pour les mécanismes de protection.

C'est précisément à ces enjeux que cet ouvrage s'attaque. Partant des fondements physiques et mathématiques des systèmes PV et éoliens, il progresse vers les architectures de commande les plus avancées, en mettant un accent particulier sur les techniques de contrôle primaire de fréquence (PFC). Les méthodes classiques — délestage, inertie virtuelle, stockage d'énergie, — sont présentées et comparées. Les approches d'intelligence artificielle — logique floue, réseaux de neurones, apprentissage par renforcement — sont analysées dans leur contexte applicatif au réseau électrique.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de master et de doctorat en génie électrique et en génie des systèmes énergétiques, aux chercheurs travaillant sur l'intégration des énergies renouvelables et la stabilité des réseaux, ainsi qu'aux ingénieurs confrontés aux problématiques de gestion de réseau dans un contexte de forte pénétration des SER. Une connaissance des bases de l'électrotechnique, de l'électronique de puissance et des systèmes de contrôle est supposée.

La structure de l'ouvrage est la suivante. Le Chapitre 1 présente le panorama global des sources d'énergie renouvelables et les enjeux de leur intégration. Le Chapitre 2 développe la modélisation détaillée des systèmes photovoltaïques, des cellules individuelles aux grandes centrales connectées au réseau. Le Chapitre 3 traite des systèmes éoliens : aérodynamique, modélisation mécanique, générateurs et algorithmes MPPT. Le Chapitre 4 constitue le cœur de l'ouvrage et examine en profondeur les techniques de contrôle primaire de fréquence dans les systèmes renouvelables. Le Chapitre 5 ouvre des

perspectives sur les évolutions technologiques et réglementaires à venir. Des annexes mathématiques complètent l'exposé.

Les exemples numériques, les études de cas et les tableaux comparatifs qui jalonnent chaque chapitre visent à ancrer les concepts dans la réalité industrielle et à fournir des outils directement exploitables par le lecteur dans ses propres travaux de recherche ou d'ingénierie.

Remerciements

La réalisation de cet ouvrage a bénéficié du concours et du soutien de nombreuses personnes et institutions, auxquelles je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance.

Mes premiers remerciements vont à mes collègues du département de l'automatisation et des systèmes intelligents de l'Université Sétif 1, dont les échanges scientifiques et les débats techniques ont nourri de manière déterminante la réflexion qui sous-tend chaque chapitre de cet ouvrage. Les séminaires et projets collaboratifs menés au sein de ce département constituent le terreau intellectuel de ce travail.

Je remercie chaleureusement les relecteurs anonymes qui ont accepté d'examiner le manuscrit dans ses versions préliminaires. Leurs observations précises et constructives, parfois exigeantes, ont permis d'améliorer sensiblement la rigueur scientifique de l'exposé, la clarté des développements mathématiques et la cohérence de la progression pédagogique.

Ma gratitude va également aux équipes de recherche internationales dont les travaux publiés ont abondamment alimenté cet ouvrage. Les avancées rapides dans les domaines du contrôle de fréquence, du stockage d'énergie et de l'intelligence artificielle appliquée aux réseaux électriques rendent tout travail de synthèse ambitieux : j'espère avoir rendu justice à la richesse et à la diversité de cette littérature.

Enfin, et surtout, je remercie ma famille pour sa patience, ses encouragements constants et sa compréhension face aux longues heures consacrées à la rédaction et à la révision de ce texte. Ce livre leur est dédié.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

1. SOURCES D'ENERGIE RENOUELABLES : PANORAMA, ENJEUX ET PERSPECTIVES	1
1.1. LA CRISE ENERGETIQUE ET CLIMATIQUE MONDIALE	1
1.1.1. LES COMBUSTIBLES FOSSILES ET LEURS LIMITES	1
1.1.2. L'URGENCE DE LA TRANSITION VERS LES RENOUELABLES	2
1.2. DEFINITION ET CLASSIFICATION DES ENERGIES RENOUELABLES	2
1.2.1. DEFINITION	2
1.2.2. PANORAMA MONDIAL DES SER	3
1.2.3. CLASSIFICATION DES FILIERES	4
1.2.4. PV ET ÉOLIEN : LES TECHNOLOGIES DOMINANTES	7
1.3. ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	8
1.3.1. HISTOIRE ET EVOLUTION TECHNOLOGIQUE	8
1.3.2. TECHNOLOGIES DE CELLULES	9
1.3.3. STRUCTURE ET ASSEMBLAGE DES MODULES	10
1.4. ÉNERGIE EOLIENNE	11
1.4.1. RESSOURCE EOLIENNE MONDIALE	11
1.4.2. ÉVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE EOLIENNE	12
1.5. HYDROELECTRICITE, GEOTHERMIE, BIOMASSE ET STOCKAGE	12
1.5.1. HYDROELECTRICITE ET POMPAGE-TURBINAGE	12
1.5.2. GEOTHERMIE ET BIOMASSE	13

1.6. DEFIS DE L'INTEGRATION DES RENOUVELABLES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES	14
1.6.1. L'INTERMITTENCE ET LA VARIABILITE	14
1.6.2. L'INERTIE DU RESEAU ET LA STABILITE DE FREQUENCE	15
1.6.3. INFRASTRUCTURE RESEAU ET COUTS DE RESEAU	16
1.7. RESEAUX INTELLIGENTS ET PROSOMMATEURS	17
1.8. TENDANCES MONDIALES ET PROJECTIONS A 2050	18
2. SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES : PHYSIQUE, MODELISATION ET COMMANDE	20
2.1. PHYSIQUE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE	20
2.1.1. PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS ET EFFET PV	20
2.1.2. LIMITE DE SHOCKLEY-QUEISSER	21
2.2. MODELISATION ELECTRIQUE DES CELLULES ET MODULES PV	22
2.2.1. MODELE A UNE DIODE — DERIVATION COMPLETE	22
2.2.2. MODELE A DEUX DIODES	24
2.2.3. EXTENSION AU RESEAU PV	24
2.3. CARACTERISTIQUES I-V ET P-V : ANALYSE APPROFONDIE	25
2.3.1. POINTS CARACTERISTIQUES DE LA COURBE I-V	25
2.3.2. EFFETS DE L'IRRADIATION ET DE LA TEMPERATURE — RELATIONS QUANTITATIVES	26
2.3.3. OMBRAGE PARTIEL ET MAXIMA MULTIPLES	29
2.4. ARCHITECTURE DES SYSTEMES PV RACCORDES AU RESEAU	30
2.4.1. TOPOLOGIES GENERALES	30
2.4.2. CONVERTISSEUR DC-DC — ROLE ET TOPOLOGIES	31
2.4.3. ONDULEUR TRIPHASE DC-AC — COMMANDE EN COURANT	33
2.4.4. FILTRE LCL — CONCEPTION ET AMORTISSEMENT	34

2.5. ALGORITHMES MPPT — DESCRIPTION ET COMPARAISON APPROFONDIE	35
2.5.1. METHODE PERTURBER-ET-OBSERVER (P&O)	35
2.5.2. CONDUCTANCE INCREMENTALE (INC)	36
2.5.3. METHODES INTELLIGENTES	37
2.6. BOUCLE DE CONTROLE DE L'ONDULEUR — CONTROLE EN COURANT ET SYNCHRONISATION	40
2.6.1. SYNCHRONISATION AVEC LE RESEAU : BOUCLE A VERROUILLAGE DE PHASE (PLL)	40
2.6.2. 2.6.2 CONTROLE DE LA TENSION DC	41
2.6.3. PARTICIPATION A LA REGULATION DE FREQUENCE — CONTEXTE REGLEMENTAIRE	41
2.7. PROTECTION ET QUALITE DE L'ENERGIE	42
2.7.1. ANTI-ILOTAGE	42
2.7.2. QUALITE DE L'ENERGIE INJECTEE	43
3. SYSTEMES EOLIENS : AERODYNAMIQUE, MODELISATION ET CONTROLE	44
3.1. INTRODUCTION :	44
3.2. RESSOURCE EOLIENNE ET AERODYNAMIQUE FONDAMENTALE	45
3.2.1. LA LIMITE DE BETZ — DEMONSTRATION	45
3.2.2. COEFFICIENT DE PUISSANCE C_p ET COURBES DE PERFORMANCE	47
3.2.3. PUISSANCE MECANIQUE ET COUPLE AERODYNAMIQUE	48
3.3. COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A VITESSE VARIABLE	48
3.3.1. STRUCTURE MECANIQUE	48
3.3.2. MODELE DYNAMIQUE DE LA TRANSMISSION MECANIQUE	50
3.3.3. GENERATEUR DFIG — PRINCIPE ET MODELE	51

3.3.4. GENERATEUR PMSG ET CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE	52
3.4. REGIONS D'OPERATION ET STRATEGIES DE CONTROLE	53
3.4.1. COURBE DE PUISSANCE ET REGIONS D'OPERATION	53
3.4.2. CONTROLE DE LA VITESSE DU ROTOR (REGION II — MPPT)	55
3.4.3. CONTROLE DE L'ANGLE DE CALAGE (REGION III)	55
3.4.4. CONTROLE DU CONVERTISSEUR RSC EN REPERE DQ	56
3.5. ALGORITHMES MPPT POUR EOLIENNES — COMPARAISON DETAILLÉE	57
3.5.1. CONTROLE PAR RATIO DE VITESSE EN BOUT DE PALE (TSR)	58
3.5.2. CONTROLE INDIRECT PAR COUPLE OPTIMAL (OTC)	59
3.5.3. METHODES DIRECTES EN COURANT ET EN PUISSANCE	59
3.5.4. ALGORITHMES INTELLIGENTS POUR EOLIENNES	60
3.6. 3.5 PROTECTION ELECTRIQUE ET CODES DE RESEAU	62
3.6.1. LOW VOLTAGE RIDE-THROUGH (LVRT)	62
3.6.2. QUALITE DE L'ENERGIE ET HARMONIQUES	62
4. CONTROLE PRIMAIRE DE FREQUENCE DANS LES SYSTEMES RENOUVELABLES	64
4.1. INTRODUCTION	64
4.2. STABILITE DE FREQUENCE : FONDEMENTS THEORIQUES	65
4.2.1. LA FREQUENCE COMME INDICATEUR D'EQUILIBRE	65
4.2.2. DYNAMIQUE DE FREQUENCE — ANALYSE APPROFONDIE	65
4.2.3. TROIS NIVEAUX DE CONTROLE DE FREQUENCE	66
4.3. PFC DANS LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	68
4.3.1. STRATEGIES DE DELESTAGE — ANALYSE QUANTITATIVE	68
4.3.2. INERTIE VIRTUELLE POUR SYSTEMES PV	70
4.3.3. GRID-FORMING CONVERTERS POUR PV	72
4.4. SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE POUR LE PFC — ANALYSE APPROFONDIE	73

4.4.1. BATTERIES LITHIUM-ION POUR LE PFC	73
4.4.2. VOLANTS D'INERTIE POUR REPONSE ULTRA-RAPIDE	75
4.4.3. SUPER-CONDENSATEURS POUR INERTIE VIRTUELLE	76
4.4.4. STOCKAGE HYDRAULIQUE PAR POMPAGE (STEP)	77
4.5. PFC DANS LES SYSTEMES EOLIENS — STRATEGIES AVANCEES	77
4.5.1. INERTIE SYNTHETIQUE — CONCEPTION ET LIMITATIONS	77
4.5.2. DELESTAGE EOLIEN — COORDINATION RSC ET CONTROLE DE PAS (PAC)	79
4.5.3. CONTROLE DE STATISME POUR EOLIENNES	81
4.6. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LE CONTROLE DE FREQUENCE	83
4.6.1. CONTROLEURS A LOGIQUE FLOUE (FLC)	83
4.6.2. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS POUR LE PFC	84
4.6.3. APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT PROFOND (DEEP RL)	85
4.6.4. 4.5.4 TECHNIQUES HYBRIDES ET MULTI-AGENTS	86
4.7. COMPARAISONS ET SYNTHESE DES TECHNIQUES PFC	88
4.7.1. TABLEAU COMPARATIF GLOBAL	88
4.7.2. CAS D'ÉTUDE : RESEAU ALGERIEN A HAUTE PENETRATION RENOUELABLE	91
5. PERSPECTIVES : RESEAUX DU FUTUR ET TECHNOLOGIES EMERGENTES	93
5.1. RESEAUX A TRES HAUTE PENETRATION RENOUELABLE	93
5.1.1. SCENARIOS 100 % RENOUELABLESS	93
5.1.2. GRID-FORMING A GRANDE ECHELLE	95
5.2. STOCKAGE DE LONGUE DUREE	95
5.2.1. HYDROGENE VERT	95
5.2.2. STOCKAGE THERMIQUE DE LONGUE DUREE	97

5.3. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET AUTOMATISATION DU RESEAU	99
5.3.1. JUMEAU NUMERIQUE DU RESEAU	99
5.3.2. PREVISION ET ANTICIPATION	101
5.3.3. MARCHES DE SERVICES SYSTEME ADAPTES	101
5.4. ENJEUX DE CYBERSECURITE	102
5.5. VERS UN RESEAU ELECTRIQUE RESILIENT ET DECARBONE	104
6. CONCLUSION GENERALE	106
7. ANNEXES : RAPPELS MATHEMATIQUES ET TRANSFORMATIONS	109
7.1. TRANSFORMATION DE CLARKE (AB)	109
7.2. TRANSFORMATION DE PARK (DQ)	109
7.3. PARAMETRES DES MODELES PV ET EOLIEN	110
8. BIBLIOGRAPHIE	112

Liste des Figures

Figure 1. Tendances mondiales de la croissance des capacités pour l'énergie éolienne et photovoltaïque	8
Figure 2. Assemblage des modules PV	10
Figure 3. Intégration sectorielle des SER dans la consommation finale en 2021	14
Figure 4. Rapport puissance, inertie et stabilité de la fréquence....	15
Figure 5. Sources SER, PV et éolienne, connectées au réseau	17
Figure 6. Réseau intelligent (Smart grid)	18
Figure 7. Tendances mondiales de la production d'électricité par source d'énergie	19
Figure 8. Modèle à une seule diode d'un réseau de cellules solaires	22
Figure 9. Courbes I-V et P-V	26
Figure 10. Influence du rayonnement solaire (A) et de la température (B).....	28
Figure 11. Configuration du réseau PV	31
Figure 12. Convertisseurs DC-DC : (a) Buck; (b) Boost; (c) Buck–Boost.....	32
Figure 13. Onduleur triphasé avec filtre RLC	35
Figure 14. Principe et algorithme d'une P&O MPPT	36
Figure 15. Boucle de contrôle dans une chaîne PV	40
Figure 16. Systèmes d'énergie éolienne.....	45
Figure 17. Flux d'air des éoliennes.....	46
Figure 18. Composants d'une éolienne	49
Figure 19. Régions de fonctionnement d'une éolienne	53
Figure 20. Contrôle du convertisseur RSC.....	57
Figure 21. Algorithme MPPT dans un système éolien.....	58

Figure 22. Algorithme MPPT dans un système éolien.....	64
Figure 23. Niveaux de contrôle de la fréquence	67
Figure 24. Principe de délestage pour les systèmes PV	69
Figure 25. Boucle de contrôle de délestage pour les systèmes PV ..	70
Figure 26. Boucle de la réserve de puissance (ΔP_{res})	71
Figure 27. Virtual Synchronous Machine (VSM)	73
Figure 28. Stratégie PFC PV-BSSE.....	75
Figure 29. Délestage pour les systèmes éoliens	79
Figure 30. Délestage RCS	80
Figure 31. Délestage PAC.....	81
Figure 32. Contrôle de statisme pour éoliennes	82
Figure 33. Contrôle PFC par : (A) FLC (B) RN	85
Figure 34. Réseaux avec haute pénétration	94
Figure 35. Stockage de longue durée.....	98
Figure 36. Jumeau numérique et application PFC	100
Figure 37. Prévision et marchés de services système adaptés	102
Figure 38. Cybersécurité : attaques et contre-mesures	103
Figure 39. Réseau du futur : décarboné, résilient et intelligemment décentralisé	105