

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....	xiv
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS .....	xvi
RÉSUMÉ .....	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCTION .....	1
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
PROBLÉMATIQUE.....	8
MÉTHODOLOGIE.....	10
CHAPITRE 1 .....	11
LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET LA PRODUCTION D'ÉNERGIE .....	11
1.1    Définition de la production d'énergie.....	11
1.2    Différents types de production d'énergie .....	12
1.2.1    Les sources d'énergie traditionnelles (non renouvelables) .....	12
1.2.2    Les sources d'énergie renouvelable .....	15
1.2.3    La cogénération.....	22
1.3    Avantages, intérêts et perspectives de développement de la production d'énergie.....	23

1.3.1	Avantages économiques.....	24
1.3.2	Avantages climatiques et perspectives de développement.....	25
1.4	Conclusion.....	27
CHAPITRE 2 .....		28
ÉTUDE DES IMPACTS DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE		
RENOUVELABLE SUR LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION .....		28
2.1	Introduction .....	28
2.2	Étude des impacts de la production d'énergie sur les réseaux électriques.....	29
2.2.1	Impacts sur le système de distribution .....	29
2.2.1.1	Modification du transit de puissance.....	29
2.2.1.2	Impact sur le profil de la tension.....	31
2.2.1.3	Les surtensions induites par la connexion d'un générateur d'énergie.....	32
2.2.1.4	Indice de qualification.....	36
2.2.1.5	Illustration en simulation du problème de surtension .....	37
2.2.2	Impacts sur le système de transport .....	44
2.2.2.1	Risque de congestion.....	44
2.2.2.2	Incertitude du système électrique.....	44
2.2.2.3	Changement des marges d'exploitation .....	44
2.2.2.4	Apparition des flux d'énergie réactive.....	44
2.2.2.5	Fermeture des grandes centrales .....	45
2.2.2.6	Perte de la production d'énergie .....	45
2.3	Conclusions .....	45
CHAPITRE 3 .....		47
MODÉLISATION DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE .....		47

3.1	Introduction .....	47
3.2	Générateur d'énergie de type panneau solaire (PV).....	47
3.2.1	Modèle mathématique .....	48
3.2.2	Association des générateurs photovoltaïques.....	51
3.2.3	Configuration et raccordement dans le réseau électrique .....	52
3.2.4	Contrôle de la tension, du courant et de la puissance des générateurs PV.....	53
3.2.5	Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans Matlab®/Simulink® .....	55
3.2.5.1	Modèle semi-analytique de type circuit électrique .....	55
3.2.6	Caractéristiques statiques du panneau.....	57
3.3	Générateur d'énergie de type éolien.....	58
3.3.1	Différents types d'aérogénérateurs .....	59
3.3.1.1	Éoliennes à axe horizontal .....	59
3.3.1.2	Éoliennes à axe vertical.....	60
3.3.2	Modèle mathématique .....	61
3.3.2.1	Puissance récupérable par une éolienne.....	61
3.3.2.2	Régulation de la puissance d'une éolienne .....	64
3.3.3	Configuration et raccordement dans le réseau électrique .....	65
3.3.4	Contrôle de la tension, du courant et de la puissance des générateurs éoliens .....	67
3.3.5	Modélisation du générateur éolien dans Matlab®/Simulink® .....	70
3.4	Conclusion.....	71
	CHAPITRE 4 .....	73
	RÉGLAGE DE TENSION EN PRÉSENCE DE PRODUCTEURS D'ÉNERGIE SUR LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION.....	73
4.1	Introduction .....	73

4.2	Importance de réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électriques .....	74
4.2.1	Le maintien de la tension .....	74
4.2.2	Le maintien de la fréquence .....	76
4.3	Différents types de réglage de tension et de puissance .....	76
4.3.1	Types de réglage de tension pour les générateurs de type machine synchrone .....	77
4.3.1.1	Régulateur automatique de tension « Automatic Voltage Regulator (AVR) ».....	77
4.3.1.2	Régulateur de facteur de puissance « Power Factor (PF) » .....	78
4.3.1.3	Régulateur de la puissance réactive (VAR) .....	79
4.3.2	Types de réglage de tension pour les générateurs de type onduleur.....	81
4.3.2.1	La régulation en tension ou mode ( $P/V$ ) .....	81
4.3.2.2	La régulation en puissance ou mode ( $P/Q$ ).....	82
4.4	Modélisation de réglage de production pour un générateur de type panneau solaire .....	83
4.4.1	Réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ ).....	83
4.4.1.1	Présentation du modèle .....	83
4.4.1.2	Étude du modèle ( $P/Q$ ).....	86
4.4.1.3	Simulations du modèle ( $P/Q$ ).....	88
4.4.2	Réglage de production en puissance active et tension ( $P/V$ ).....	91
4.4.2.1	Présentation du modèle .....	91
4.4.2.2	Étude du modèle ( $P/V$ ) .....	93
4.4.2.3	Simulations du modèle ( $P/V$ ) .....	95
4.5	Modélisation de réglage de production pour un générateur de type éolien.....	96
4.5.1	Réglage de production en puissances ( $P/Q$ ).....	96

4.5.1.1	Présentation du modèle .....	96
4.5.1.2	Simulations du modèle ( $P/Q$ ).....	98
4.5.2	Réglage de production en puissances ( $P/V$ ).....	100
4.5.2.1	Présentation du modèle .....	100
4.5.2.2	Simulations du modèle ( $P/V$ ) .....	101
4.6	Modélisation de générateur de type combiné	
	panneau solaire – éolienne.....	102
4.6.1	Présentation du système .....	102
4.6.2	Simulations du modèle ( $P/Q$ ).....	103
4.6.3	Simulations du modèle ( $P/V$ ) .....	104
4.7	Conclusions .....	105
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	106
	RECOMMANDATIONS.....	107
	BIBLIOGRAPHIE.....	108
	Annexe A .....	113
	Annexe B.....	115
	Annexe C.....	116
	Annexe D .....	124
	Annexe E.....	131
	Annexe F .....	133

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHÉMA D'UNE CENTRALE HYDRAULIQUE .....	15
FIGURE 2 : TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ / PHOTOVOLTAÏQUE / MOYENNE TENSION PCS 6000 STATCOM [49] .....	16
FIGURE 3 : LE PLUS GRAND PARC ÉOLIEN DANS LE MONDE [43].....	18
FIGURE 4 : CENTRALE GÉOTHERMIQUE .....	19
FIGURE 5 : CONNEXION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES AU RÉSEAU.....	20
FIGURE 6 : CENTRALE SOLAIRE THERMIQUE .....	20
FIGURE 7 : CENTRALE THERMIQUE À BIOMASSE [50] .....	21
FIGURE 8: CENTRALE MARÉMOTRICE.....	21
FIGURE 9 : CENTRALE HYDROLIENNE [48] .....	22
FIGURE 10 : SCHÉMA D'UNE CENTRALE THERMIQUE AU CHARBON .....	22
FIGURE 11 : SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ [29].....	26
FIGURE 12 : FLUX DE PIUSSANCE DANS LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION SANS ET AVEC GER .....	30
FIGURE 13 : FLUX D'ÉNERGIE SUR UN RÉSEAU DE DISTRIBUTION EN PRÉSENCE DE GER .....	30
FIGURE 14 : VARIATION DE LA TENSION LE LONG D'UN DÉPART HT SANS GER .....	32
FIGURE 15 : CHUTE DE TENSION AUX BORNES D'UNE IMPÉDANCE RL SANS GER.....	33
FIGURE 16 : DÉTERMINATION DE LA CHUTE DE TENSION SUR UNE LIGNE EN PRÉSENCE DE GER .....	33
FIGURE 17 : RÉSEAU GÉNÉRAL POUR L'ANALYSE.....	35
FIGURE 18 : RÉSEAU POUR L'INDICE DE QUALIFICATION.....	36
FIGURE 19 : RÉSEAU BT RURAL ÉTUDIÉ DE TYPE NORD-AMÉRICAIN.....	38
FIGURE 20 : RÉSEAU BT RURAL SIMULÉ SANS INSERTION DE GER .....	39
FIGURE 21 : PROFIL DE TENSION POUR DEUX RÉGIMES DE CHARGE SANS PRÉSENCE DE GER POUR LA ZONE 1 .....	40
FIGURE 22 : PROFIL DE TENSION POUR DEUX RÉGIMES DE CHARGE SANS PRÉSENCE DE GER POUR LA ZONE 2 .....	40
FIGURE 23 : RÉSEAU BT SIMULÉ AVEC 2 ÉOLIENNES RACCORDÉES AUX NŒUDS 11 ET 14 .....	41
FIGURE 24 : PROFIL DE TENSION POUR DEUX RÉGIMES DE CHARGE EN PRÉSENCE DE GER POUR LA ZONE 1 .....	42
FIGURE 25 : PROFIL DE TENSION POUR DEUX RÉGIMES DE CHARGE EN PRÉSENCE DE GER POUR LA ZONE 2 .....	42
FIGURE 26 : INDICE DE QUALIFICATION POUR LA ZONE 1 .....	43

FIGURE 27 : INDICE DE QUALIFICATION POUR LA ZONE 2 .....	43
FIGURE 28 : CELLULE, MODULE (PANNEAUX) ET CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE .....	48
FIGURE 29 : DIFFÉRENTS SCHÉMAS ÉQUIVALENTS D'UNE CELLULE PV .....	48
FIGURE 30 : SCHÉMA ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	49
FIGURE 31 : CONFIGURATION TYPIQUE D'UN PANNEAU SOLAIRE RACCORDÉ AU RÉSEAU .....	52
FIGURE 32 : SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UN CONTRÔLE TYPIQUE D'UN GÉNÉRATEUR PV RACCORDÉ AU RÉSEAU .....	53
FIGURE 33 : MODÉLISATION D'UN GÉNÉRATEUR PV SOUS MATLAB®/SIMULINK® .....	56
FIGURE 34 : SOUS BLOCS DU MODÈLE SIMPOWERSYSTEM® .....	57
FIGURE 35 : CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DU PANNEAU POUR UNE VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT .....	57
FIGURE 36 : CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DU PANNEAU POUR UNE VARIATION DE TEMPÉRATURE AMBIANTE .....	58
FIGURE 37 : SCHÉMA D'UNE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL .....	59
FIGURE 38 : VUE INTÉRIEURE D'UNE NACELLE D'UN GÉNÉRATEUR D'ÉNERGIE DE TYPE ÉOLIEN .....	60
FIGURE 39 : ÉOLIENNES À AXE VERTICAL .....	60
FIGURE 40 : ÉOLIENNE À AXE VERTICAL « <i>DARIEUS</i> » .....	61
FIGURE 41 : ILLUSTRATION DE LA THÉORIE DU DISQUE .....	61
FIGURE 42 : COEFFICIENT DE PUISSANCE DES TURBINES À VENT RAPIDE .....	62
FIGURE 43 : ÉVOLUTION DU RENDEMENT AÉRODYNAMIQUE EN FONCTION DE $C_p(\lambda)$ ET DU NOMBRE DE PALE .....	63
FIGURE 44 : ÉVOLUTION TYPIQUE DU RENDEMENT AÉRODYNAMIQUE EN FONCTION DE $C_p(\lambda)$ ET DU MODÈLE D'ÉOLIENNE .....	63
FIGURE 45 : PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE EN FONCTION DE LA VITESSE .....	64
FIGURE 46 : CONFIGURATION TYPIQUE DOS-À-DOS (REDRESSEUR/ONDULEUR) D'UN GÉNÉRATEUR ÉOLIEN CONNECTÉ AU RÉSEAU VIA UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ .....	66
FIGURE 47 : SCHÉMA D'UN CONTRÔLE TYPIQUE D'UN DOUBLE CONVERTISSEUR PWM AVEC UN GÉNÉRATEUR À INDUCTION .....	68
FIGURE 48 : MODÈLE SIMULINK® D'UN GÉNÉRATEUR ÉOLIEN RACCORDÉ AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE .....	70
FIGURE 49 : RÉSULTATS DE SIMULATION DU GÉNÉRATEUR ÉOLIEN CONNECTÉ AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE .....	71
FIGURE 50 : SCHÉMA DU RÉGULATEUR DE TENSION AUTOMATIQUE AVR .....	78

FIGURE 51 : SCHÉMA DU RÉGULATEUR DE TENSION AUTOMATIQUE AVR POUR UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE.....	78
FIGURE 52 : MODÈLE DE RÉGULATION DE FACTEUR DE PUISSANCE ( $PF$ ) .....	79
FIGURE 53 : MODÈLE DE RÉGULATION DE LA PUISSANCE RÉACTIVE ( $VAR$ ).....	79
FIGURE 54 : BILAN DE PUISSANCE.....	80
FIGURE 55 : PLAGE NORMALISÉE ( $\pm 6\%$ ) DE LA TENSION PHASE-PHASE (V) [46] .....	82
FIGURE 56 : MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) D'UN PANNEAU SOLAIRE CONNECTÉ AU RÉSEAU .....	83
FIGURE 57 : SCHÉMA DE PRINCIPE DU RÉGULATEUR ( $P/Q$ ) .....	85
FIGURE 58 : PROFIL DE TENSION DE $V_D$ ET $V_Q$ EN UTILISANT LA BOUCLE PLL.....	85
FIGURE 59 : BOUCLE DE RÉGULATION DE LA PUISSANCE ACTIVE .....	86
FIGURE 60 : RÉSEAU BT SIMULÉ AVEC 2 PANNEAUX SOLAIRES RACCORDÉS AUX NŒUDS 11 ET 14 .....	88
FIGURE 61 : PROFIL DE LA TENSION AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX PANNEAUX SOLAIRES CONNECTÉS AU RÉSEAU (ZONE 1).....	89
FIGURE 62 : PROFIL DE LA TENSION AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX PANNEAUX SOLAIRES CONNECTÉS AU RÉSEAU (ZONE 2).....	89
FIGURE 63 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX PANNEAUX SOLAIRES CONNECTÉS AU RÉSEAU .....	90
FIGURE 64 : MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/V$ ) D'UN PANNEAU SOLAIRE CONNECTÉ AU RÉSEAU .....	92
FIGURE 65 : BOUCLE DE RÉGULATION DE LA TENSION .....	93
FIGURE 66 : REPRÉSENTATION DE L'INDUCTANCE $X$ INTERVENANT DANS L'EXPRESSION DE $A_3$ .....	94
FIGURE 67 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/V$ ) POUR DEUX PANNEAUX SOLAIRES CONNECTÉS AU RÉSEAU .....	95
FIGURE 68 : MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) D'UNE ÉOLIENNE CONNECTÉE AU RÉSEAU .....	97
FIGURE 69 : RÉGULATION DE LA TENSION DE SORTIE DE LA GÉNÉRATRICE .....	97
FIGURE 70 : PROFIL DE LA TENSION AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX ÉOLIENNES CONNECTÉES AU RÉSEAU (ZONE 1).....	98
FIGURE 71 : PROFIL DE LA TENSION AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX ÉOLIENNES CONNECTÉES AU RÉSEAU (ZONE 2).....	98
FIGURE 72 : PROFIL DE TENSION D'EXCITATION $V_F$ (PU) .....	99
FIGURE 73 : PROFIL DE TENSION DE SORTIE $V_{ABC}$ (PU).....	99
FIGURE 74 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR DEUX ÉOLIENNES CONNECTÉES AU RÉSEAU .....	100
FIGURE 75 : MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/V$ ) D'UNE ÉOLIENNE CONNECTÉE AU RÉSEAU.....	101

FIGURE 76 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/V$ ) POUR DEUX ÉOLIENNES CONNECTÉES AU RÉSEAU .....	101
FIGURE 77 : RÉSEAU BT SIMULÉ AVEC UN PANNEAU SOLAIRE RACCORDÉ AU NŒUD 11 ET UNE ÉOLIENNE CONNECTÉE AU NŒUD 14.....	102
FIGURE 78 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/Q$ ) POUR UN PANNEAU SOLAIRE ET UNE ÉOLIENNE CONNECTÉS AU RÉSEAU .....	103
FIGURE 79 : PROFIL DE PUISSANCES AVEC LE MODÈLE DE RÉGLAGE ( $P/V$ ) POUR UN PANNEAU SOLAIRE ET UNE ÉOLIENNE CONNECTÉES AU RÉSEAU.....	104
FIGURE 80 : MODULES PV CONNECTÉ AU RÉSEAU VIA UN ONDULEUR.....	116
FIGURE 81 : MODULES PV CONNECTÉ EN SÉRIE AU RÉSEAU VIA UN ONDULEUR .....	116
FIGURE 82 : SCHÉMA D'UN PANNEAU PV AVEC SON CONVERTISSEUR CC/CC ET SA COMMANDE MPPT .....	117
FIGURE 83 : MODULES PV RELIÉS PAR UN CONVERTISSEUR DC-DC ET CONNECTÉS AU RÉSEAU VIA UN ONDULEUR COMMUN.....	118
FIGURE 84 : MODULES PV RELIÉS ENSEMBLE PAR DES ONDULEURS (AC-MODULE).....	119
FIGURE 85 : MODULES PV MONOPHASÉ À SEUL NIVEAU CONNECTÉS AU RÉSEAU VIA UN TRANSFORMATEUR.....	120
FIGURE 86 : RACCORDEMENT MONOPHASÉ (MULTI NIVEAU) DE PLUSIEURS PV.....	121
FIGURE 87 : RACCORDEMENT TRIPHASÉ DE PLUSIEURS PV (TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ) .....	122
FIGURE 88 : RACCORDEMENT TRIPHASÉ DE PLUSIEURS PV (TRANSFORMATEUR HAUTE-FRÉQUENCE).....	123
FIGURE 89 : ÉOLIENNE À VITESSE FIXE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À CAGE.....	124
FIGURE 90 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À CAGE ET UN CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE .....	126
FIGURE 91 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE À NOMBRE ÉLEVÉ DE PÔLES ET UN CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE .....	126
FIGURE 92 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE ET UN CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE .....	127
FIGURE 93 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS ET UN CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE.....	127
FIGURE 94 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION (MASDA).....	128

FIGURE 95 : ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU VIA UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS ET UN CONVERTISSEUR PLEINE PUISSANCE.....	129
FIGURE 96 : GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE MADA COMPOSÉ D'UN CONVERTISSEUR PWM À BASE D'IGBT (AC-DC-AC) RACCORDE AU RÉSEAU VIA UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE.....	130
FIGURE 97 : SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA PLL TRIPHASÉ DANS LE DOMAINE DE PARK .....	131

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DE LA TENSION DANS LE RÉSEAU NORD-AMÉRICAIN [46] .....	82
TABLEAU 2 : PARAMÈTRES DU TRANSFORMATEUR HT/BT .....	113
TABLEAU 3 : PARAMÈTRES DES LIGNES DU RÉSEAU .....	114
TABLEAU 4 : PARAMÈTRES DE CHARGES DU RÉSEAU BT .....	114
TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DU PRODUCTEUR D'ÉNERGIE DE TYPE ÉOLIENNE .....	115
TABLEAU 6 : CARACTÉRISTIQUES DU PRODUCTEUR D'ÉNERGIE DE TYPE PANNEAU SOLAIRE .....	133

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Courant ou tension alternative
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
AVR	Automatic Voltage Regulator
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
BT	Basse tension
COP21	Conférence de Paris de 2015 sur le climat
CSP	Concentrating Solar Power Plant
CV	Constant Voltage
DC	Courant ou tension continue
DFIG	Doubly-Fed Induction Generators
GER	Générateur d'énergie renouvelable
GIE IDEA	Groupement d'intérêts Économique Inventer la Distribution Électrique de l'Avenir
GW	Gigawatt
HT	Haute tension
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)
IPD	Indicateurs de passage de défaut
kVA	Kilovoltampère
kVar	Kilovoltampère réactive
kW	Kilowatt
MAS	Machine asynchrone
MASDA	Machine asynchrones à double alimentation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MT	Moyenne tension
MVA	Mégavoltampère
MW	Mégawatt
OMD	Optimisation Mixte Découplée
OV	Open Voltage
PCB	Carte de circuit imprimé intégré des composants magnétiques
PF	Power Factor
PLL	Phase Locked Loop
P&O	Perturber et observer
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion MLI)
pu	Per unit (unité réduite sans dimension)
PV	Panneau solaire photovoltaïque
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
STATCOM	Static Synchronous Compensator
ST1	Système d'excitation statique de type

SVC	Static VAR Compensator
TW	Térawatt
TWh	Térawatt-heure (unité de mesure d'énergie)
VAR	Régulation de la puissance réactive

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

A	Facteur de qualité de la diode
$a$	Surface balayée par le rotor (pâles) (m <sup>2</sup> )
$C_p$	Coefficient de puissance
$C_{PI}(s)$	Correcteur PI
$F_{BF}(s)$	Fonction de transfert du système en boucle fermée
G	Irradiation (éclairement) (W/m <sup>2</sup> )
$G_r$	Irradiation (éclairement) de référence (W/m <sup>2</sup> )
$H(s)$	Fonction de transfert (transformée de Laplace)
$I_{a,b,c}$	Courant triphasé mesuré (A)
$I_{cc}$	Courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards (A)
$I_{cell}$	Courant fourni par la cellule PV (A)
$I_d$	Courant de la diode (A)
$I_d$	Composante directe du courant produit par la GER (A)
$I_{ph}$	Courant produit par les cellules PV (A)
$I_{pmax}$	Courant maximum produit par la cellule PV (A)
$I_{pv}$	Courant produit par les cellules PV (A)
$I_q$	Composante quadratique du courant produit par la GER (A)
$I_t$	Courant transitant dans la ligne (A)
$I_{sat}$	Courant de saturation de la diode (A)
K	Constante de Boltzmann (k=1.38 x 10 <sup>-23</sup> J/K)
$K_G$	Gain de la génératrice
$K_r$	Gain du capteur
$k_p$	Coefficient proportionnel
$k_i$	Coefficient intégral du correcteur
$k_t$	Coefficient de température en A/K
L	Inductance totale de la ligne (mH/Km)
N	Nœud
$N_1$	Nœud 1
$N_2$	Nœud 2
$N_3$	Nœud 3
$N_j$	Nœud j
$N_n$	Nœud n
$N_p$	Nombre de cellules PV en parallèle
$N_s$	Nombre de cellules PV en série
$P$	Puissance de référence de la GER (kW)
$P_{consigne}$	Puissance active de consigne (kW)

$P_{\text{cell}}$	Puissance fournie par la cellule PV (kW)
$P_1$	Puissance active au nœud 1 (kW)
$P_2$	Puissance active au nœud 2 (kW)
$P_3$	Puissance active au nœud 3 (kW)
$P_e$	Puissance active d'entrée (kW)
$P_G$	Puissance active fournie par GER (kW)
$P_i$	Puissance active au nœud i (kW)
$P_j$	Puissance active au nœud j (kW)
$P_k$	Puissance active au nœud k (kW)
$P_l$	Puissance active au nœud l (kW)
$P_L$	Puissance active de consommation (kW)
$P_{\text{mesurée}}$	Puissance active mesurée (kW)
$P_n$	Puissance active au nœud n (kW)
$P_N$	Puissance active au nœud N (kW)
$P_0$	Puissance totale consommée (kW)
$P_o$	Puissance de ligne (kW)
$P'_0$	Puissance qui transite dans le poste source (kW)
$P_{\text{ref}}$	Consigne de la puissance active (kW)
$P_t$	Puissance extraite par le rotor (kW)
$P_v$	Puissance instantanée fournie par la turbine (kW)
$Q$	Puissance de référence de la GER (kVAr)
$Q_1$	Puissance réactive au nœud 1 (kVAr)
$Q_2$	Puissance réactive au nœud 2 (kVAr)
$Q_3$	Puissance réactive au nœud 3 (kVAr)
$Q_C$	Puissance réactive du dispositif de compensation (kVAr)
$Q_{\text{consigne}}$	Puissance réactive de consigne (kVAr)
$Q_e$	Puissance réactive d'entrée (kVAr)
$Q_G$	Puissance réactive fournie par GER (kVAr)
$Q_i$	Puissance réactive au nœud i (kVAr)
$Q_j$	Puissance réactive au nœud j (kVAr)
$Q_k$	Puissance réactive au nœud k (kVAr)
$Q_l$	Puissance réactive au nœud l (kVAr)
$Q_L$	Puissance réactive de consommation (kVAr)
$Q_{\text{mesurée}}$	Puissance réactive mesurée (kVAr)
$Q_n$	Puissance réactive au nœud n (kVar)
$Q_N$	Puissance réactive au nœud N (kVAr)
$Q_{\text{ref}}$	Consigne de la puissance réactive (kVAr)
$q$	Charge de l'électron ( $q=1.6 \times 10^{-19}$ C)
$r$	Rayon du rotor de la turbine à vent (m)
$R$	Résistance totale de la ligne ( $\Omega/\text{Km}$ )
$R_1$	Résistance de la ligne au nœud 1 ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_2$	Résistance de la ligne au nœud 2 ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_3$	Résistance de la ligne au nœud 3 ( $\Omega/\text{km}$ )

$R_i$	Résistance de la ligne au nœud i ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_j$	Résistance de la ligne au nœud j ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_k$	Résistance de la ligne au nœud k ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_l$	Résistance de la ligne au nœud l ( $\Omega/\text{km}$ )
$R_n$	Résistance de la ligne au nœud n ( $\Omega/\text{km}$ )
$R\Omega$	Vitesse linéaire périphérique en bout de pâle (rad/s)
$S_1$	Puissance apparente avant compensation d'énergie réactive (VA)
$S_2$	Puissance apparente après compensation d'énergie réactive (VA)
$T_p$	Température de la cellule en Kelvin (K)
$T_c$	Température de la fonction ( $T_c = 25^\circ\text{C} = 298.55\text{K}$ )
$T^\circ$	Température de la cellule en K
$T_a$	Température ambiante ( $T_a = 20^\circ\text{C}$ )
$T_G$	Constante de la génératrice
$T_m$	Couple mécanique à la sortie de la turbine (N.m)
$T_r$	Constante de temps du capteur
$U_e$	Tension d'entrée (kV)
$U_{N1}$	Tension au nœud 1 (kV)
$U_s$	Tension de sortie (kV)
$U_{\text{source}}$	Tension de la source (kV)
$u_{\text{pv}}$	Tension aux bornes du panneau PV (kV)
$v$	Vitesse du vent (m/s)
$V_{a,b,c}$	Tension triphasée mesurée (kV)
$V_c$	Tension corrigée (kV)
$V_{\text{cell}}$	Tension fournie par la cellule PV (kV)
$V_{\text{co}}$	Tension de circuit ouvert (kV)
$V_{\text{dref}}$	Consigne de la tension (kV)
$V_d$	Vitesse de démarrage de l'éolienne
$V_d$	Composante directe de la tension produite par la GER (kV)
$V_{FD}$	Tension d'excitation d'une génératrice (kV)
$V_n$	Vitesse nominale de l'éolienne (m/s)
$V_M$	Vitesse maximale du vent (m/s)
$V_N$	Tension au Nœud N (kV)
$V_q$	Composante quadratique de la tension produite par la GER (kV)
$V_{\text{REF}}$	Tension de référence (kV)
$V_{\text{Stab}}$	Tension de stabilisateur de puissance (kV)
$V_T$	Potentiel thermodynamique
$V_t$	Tension terminale de la machine synchrone (kV)
$V_{\text{mpp}}, I_{\text{mpp}}$	Point de puissance maximale du PV
$V_{\text{pmax}}$	Tension maximale produite par la cellule PV (kV)
$V_{\text{pv}}$	Tension produite par les cellules PV (kV)
$V_w$	Vitesse de vent particulière (m/s)
$X$	Réactance totale de la ligne ( $\Omega/\text{Km}$ )

$X_1$	Réactance de la ligne au nœud 1 ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_2$	Réactance de la ligne au nœud 2 ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_3$	Réactance de la ligne au nœud 3 ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_i$	Réactance de la ligne au nœud $i$ ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_j$	Réactance de la ligne au nœud $j$ ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_k$	Réactance de la ligne au nœud $k$ ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_l$	Réactance de la ligne au nœud $l$ ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_n$	Réactance de la ligne au nœud $n$ ( $\Omega/\text{km}$ )
$\Delta Q = Q_c$	Quantité de puissance réactive (kVAr)
$\Delta U$	Chute de tension
$\Delta U(N_j)$	Chute de tension au nœud $j$
$\Delta V$	Chute de tension
$\cos \varphi_1$	Facteur de puissance 1
$\cos \varphi_2$	Facteur de puissance 2
$\delta_{\text{relatif}}(N_j)$	Indice de qualification au nœud $j$
$\varphi_1$	Déphasage sans compensation
$\varphi_2$	Déphasage avec compensation
$\delta_{\text{relatif}}$	Indice de qualification
$\varepsilon$	Différence entre la puissance de consigne et la puissance mesurée
$\theta_{\text{est}}$	Angle du repère de Park
$\lambda$	Vitesse spécifique
$\xi$	Coefficient d'amortissement
$\rho$	Densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mathcal{Q}_r^*$	Vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine (rad/s)
$\omega_r$	Vitesse du générateur (rad/s)
$\omega_n$	Fréquence naturelle (pulsation) (rad/s)
$\tau$	Temps de réponse de l'onduleur (s)

## RÉSUMÉ

Le réseau de distribution d'énergie électrique, par sa structure actuelle, n'est pas dimensionné pour l'accueil croissant de générateurs d'énergie renouvelable (GER). Effectivement, l'insertion d'un grand nombre de générateurs induit des problèmes de surtensions qui, en fonction des états de charge du réseau, peuvent entraîner un non-respect des valeurs de tensions admissibles par le code électrique.

Dans ce mémoire, il sera question d'une étude d'impact de l'insertion de producteurs d'énergie sur les réseaux de distribution d'énergie électrique. Pour cela, des simulations numériques seront réalisées sur un réseau électrique de type basse tension (BT) - nord-américain. À cet effet, deux méthodes de réglage de tension et de puissance seront modifiés et simulées sur un réseau BT : i) réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ ) et ii) réglage de production en puissance active et en tension ( $P/V$ ). Comme application, nous avons considéré trois types de production:

- panneau solaire (PV) raccordé au réseau via un onduleur;
- éolienne connectée au réseau via une génératrice synchrone;
- combinaison (PV – éolienne) raccordée au réseau.

Pour obtenir un réglage optimal de la tension, les méthodes de contrôle ont été améliorées, en ajoutant deux régulateurs de type ST1 IEEE : i) un régulateur automatique de tension AVR et ii) un régulateur de type PID.

Les deux méthodes seront simulées à l'aide de la plate-forme Matlab®/Simulink®.

## ABSTRACT

The existing distribution network, by its current structure, is not designed for increasing reception of renewable energy generator (REG). Indeed, the connexion of too strong a penetration induced overvoltage problems which, depending on network load conditions, can result in non-compliance with the maximum permissible voltage values by the electrical code.

In this master's report, we will discuss the study of the impact of the increasing integration of power generation in distribution networks. For this, numerical simulations will be conducted on a low-voltage north American electrical network to illustrate the impact of the connexion of the power generator on the power grid. To this end, two methods voltage and power control will be modified and simulated on a low voltage electrical network: i) control of production by active and reactive power ( $P/Q$ ) and ii) control of production by active power and voltage ( $P/V$ ). As an application, we considered three types of production:

- solar panel (PV) connected to the network via an inverter;
- wind turbine connected to the network via a synchronous generator;
- combination (PV – Wind Turbine) connected to the network.

For optimal voltage control, two methods have been improved by adding two type of regulators ST1 IEEE: i) Automatic voltage regulation AVR and ii) PID controller.

Both methods will be simulated using the platform Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>.

## INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les réseaux électriques de nombreux pays industrialisés ont subi de profondes mutations dues à des bouleversements à l'échelle internationale des politiques énergétiques. Les dérégulations du marché de l'énergie ont générés une privatisation progressive des secteurs de la production et de la distribution du produit 'électricité', et donc la désintégration verticale du système électrique. Ces phénomènes ont amené une restructuration complète du secteur électrique avec de nouvelles formes d'organisation. De plus, l'utilisation des ressources conventionnelles comme le charbon, le pétrole et l'énergie nucléaire est actuellement limitée ou n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement.

Cependant, une des conséquences de la dérégulation des marchés électriques est la connexion d'une façon significative de nouveaux moyens de production. Ceux-ci sont très diversifiés (éolienne, centrale de cogénération, capteurs photovoltaïques, piles à combustible, etc.) au sein des réseaux électriques existants.

Cette dérégulation conduit aujourd'hui à une arrivée massive d'insertion de production d'énergie dans les réseaux électriques. Cette production est le fait d'une multitude de producteurs indépendants qui, après une étude de raccordement préalable au réseau électrique, peuvent produire et vendre leur énergie sur le marché. Ces producteurs, généralement, sont désignés sous le terme de « *Génération d'Énergie Renouvelables* » ou (GER).

D'ailleurs, les générateurs d'énergie ont toujours existé dans les réseaux mais leur présence n'était pas assez significative pour avoir un impact sur la sûreté de fonctionnement des réseaux. Ils étaient donc considérés par les gestionnaires de réseaux comme des charges négatives, et devaient s'effacer, c'est-à-dire se

déconnecter en cas d'incident, même léger (creux de tension, de fréquence, etc.), survenant sur le réseau.

Aujourd'hui, la situation est différente. Année après année, le nombre de producteurs d'énergie augmente de manière importante. Toutefois, l'arrivée croissante de ces nouvelles productions n'est pas sans effets négatifs sur les réseaux électriques auxquels ils sont interconnectés et qui n'ont pas été conçus à cet effet.

Pour préserver la sûreté du système électrique, garantir une continuité de service et maintenir la qualité de fourniture de l'énergie électrique, tout en continuant à favoriser la connexion de production d'énergie, il importe donc de rechercher des solutions novatrices permettant de résoudre ce problème.

Dans ce contexte, les travaux de recherche présentés dans ce mémoire portent sur l'impact et la régulation de l'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique.

Les travaux seront donc développés en quatre chapitres:

Le premier chapitre expose les différents types de production d'énergie. Les avantages de cette production seront également présentés. À la fin du chapitre, une description sommaire est réalisée sur les réseaux du futur. Ces derniers sont connus, en anglais, sous le terme de « *Smart Grids* ».

Le deuxième chapitre aborde les différents impacts de la connexion de producteurs d'énergie sur les réseaux. Pour cela, des simulations seront réalisées sur un réseau électrique BT.

Le troisième chapitre illustre les modèles mathématiques utilisés pour la modélisation de la production d'énergie électrique. Pour cela, nous considérons deux types de production : i) un générateur d'énergie de type panneau solaire connecté au réseau via

un onduleur et ii) un producteur d'énergie de type éolienne raccordé au réseau via une génératrice synchrone. La configuration typique de ces générateurs dans le réseau électrique sera élaborée et modélisée à l'aide de la plate-forme Matlab®/Simulink®. De plus, un schéma simplifié d'un contrôle typique pour chaque générateur sera présenté et expliqué.

Le quatrième chapitre traite l'importance de réglage de la fréquence, de la tension et de la puissance en présence d'un générateur d'énergie dans le réseau électrique. Les différents types de réglage de tension et de puissance existants seront abordés. Deux méthodes de réglage seront modifiées et simulées sur un réseau BT : i) réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ ) et ii) réglage de production en puissance active et en tension ( $P/V$ ). Les résultats de simulation obtenus seront analysés et discutés.

Enfin, une conclusion est présentée à la fin ce mémoire.

## REVUE DE LA LITTÉRATURE

Depuis quelques décennies, plusieurs pays se focalisent sur la recherche et le développement de sources d'énergie renouvelable afin de remplacer en partie les sources d'énergie.

Des grands projets d'insertion de production d'énergie ont été lancés dans le monde. Toutefois, ces nouvelles productions ne sont pas sans effets négatifs sur les réseaux de distribution auxquels elles sont interconnectées et qui n'ont pas été conçues à cet effet. La dérégulation des systèmes électriques dans de nombreux pays n'est actuellement que dans une étape intermédiaire avant d'atteindre une dérégulation plus avancée.

La connexion de certains moyens de production (capteurs photovoltaïques, piles à combustible) nécessite un dispositif d'électronique de puissance (onduleur). Ce dispositif risque de dégrader la qualité de l'énergie par injection d'harmoniques. Cette dégradation est à prendre en compte et doit être étudiée afin de quantifier les problèmes éventuels sur les consommateurs et pour trouver des solutions adéquates (filtres passifs et/ou actifs).

Plusieurs projets et études concernant la coordination et la mutualisation de la Génération de l'Énergie Renouvelable ont vu le jour depuis la fin des années 1990 dans le monde. Certains d'entre eux sont axés sur la valorisation économique par une gestion centralisée des sources d'énergie dispersées sur les marchés de l'électricité. Citons ici le projet américain « *ENCORP Virtual Power Plant* » [38] et le projet allemand mené par Siemens « *EDISON Virtual Power Plant* » [41].

Certains projets ont pour objectif particulier de démontrer l'intérêt économique de telle source d'énergie primaire dispersée. C'est le cas du projet allemand « *COGEN Virtual Fuel Cell Power Plant* », qui a pour but de prouver l'intérêt économique des

piles à combustible pour faire de la cogénération (production conjointe d'électricité et de chaleur afin d'augmenter le rendement énergétique global d'une installation) [42].

On peut trouver également le projet nord européen (Suède, Finlande, Norvège, Danemark) « *CODGUNet* », qui propose au contraire des précédents une étude technique approfondie sur les impacts à la suite d'insertion croissante de générateurs d'énergie dans les réseaux. Cette étude s'intéresse aux conséquences techniques, légales et économiques de la connexion de ces producteurs avec un fort taux de pénétration, ainsi qu'aux problèmes de réserves et d'équilibre des puissances [20].

La problématique du réglage de tension dans les réseaux électriques en présence de production d'énergie est relativement nouvelle. Dans la littérature scientifique, le nombre d'articles traitant ce sujet est assez faible comparativement à d'autres problématiques concernant les réseaux. De plus, la recherche est encore dans une phase exploratoire.

En 1978, les problèmes liés à l'interruption du courant dans les réseaux à haute tension ont été étudiés par K. Ragaller [2].

Quelques années après, plusieurs études ont été réalisées sur la structure des réseaux BT et MT. Ainsi, en 1991, A. Croguennoc et C. Corroyer ont analysé les défauts affectant ces réseaux et le plan de leur protection (coordination) [3], [4], [5] et [16].

En 1993, P. Bornard et M. Pavard ont étudié le réglage (tension, puissance et fréquence) et le fonctionnement des réseaux d'interconnexion et de transport [8].

En 1999, D. Cortinas et P. Juston ont montrés que l'introduction de générateurs d'énergie dans les réseaux modifie les flux d'énergie (puissance) et, par conséquent, les profils de tension. Cependant, ils ont proposé un positionnement optimal des générateurs dans un réseau qui conduit à une amélioration dans les profils de tension [12].

Dès le début des années 2000, le GIE IDEA (Groupement d'intérêts Économique Inventer la Distribution Électrique de l'Avenir) s'est intéressé à la problématique de la connexion de producteurs d'énergie dans les réseaux électriques, en particulier via l'étude des réglages de la tension et de l'optimisation des flux de puissance réactive.

En 2000, l'impact d'énergie dispersée dans les réseaux électriques a été étudié par J.F Canard, P.P. Barker et R.W. De Mello. De plus, deux optimisations ont été proposées: l'optimisation des gains présents dans les régulations pour améliorer la stabilité et l'optimisation du plan de la tension en présence de générateur d'énergie [13] et [14].

Plusieurs études ont été réalisées sur la gestion de la production d'énergie dans les réseaux.

En 2001, R. Caire a proposé un algorithme qui permet l'optimisation hybride (continu et discret) des moyens de coordination pour minimiser l'impact de l'insertion de la production d'énergie sur le plan de tension et donc pour en accroître indirectement la quantité raccordable dans le réseau. L'algorithme a pour objectif aussi d'avoir une gestion optimale des flux de puissance tout en minimisant les pertes de Joules dans les lignes [16].

En 2003, A.E. Kiprakis et A. Robin Wallace ont élaboré un algorithme de réglage hybride qui permet le contrôle automatique de la tension et du facteur de puissance [21].

En 2005, C.D. Pham a étudié la détection et la localisation de défauts dans les réseaux haute tension (HT) en utilisant les informations fournies par les indicateurs de passage de défaut (IPD). Un algorithme génétique a été choisi pour déterminer le placement optimal des IPD [25].

En 2006, O. Richardot propose un algorithme génétique qui permet de maintenir la tension proche d'une consigne en certains nœuds précis du réseau. Aussi, il permet de maintenir les écarts relatifs de production de puissance réactive entre tous les producteurs, afin que chacune participe à l'effort de réglage de la tension [30].

En 2008, Thanh Luong LE a utilisé l'analyse nodale pour étudier la stabilité angulaire et transitoire des générateurs d'énergie de type machine synchrone raccordés dans le réseau de distribution [34].

En 2010, V. D Tran Khanh propose une méthode de détection de l'îlotage d'un système multi-source basée sur la technique de corrélation et le signal de perturbation programmable. Cette méthode permet aussi de calculer l'écoulement de puissance et de traiter les déséquilibres [36].

En 2011, Chia-Hung Lin applique un algorithme qui utilise la puissance active pour déterminer la pénétration optimale des PV dans le réseau électrique sans impact négatif sur la tension [39].

En 2013, Hsu applique un contrôle de puissance active et réactive qui permet d'optimiser la pénétration optimale des PV dans le réseau [40].

## PROBLÉMATIQUE

Actuellement, l'opinion publique commence à s'intéresser à la problématique du changement climatique et les états prennent des résolutions pour protéger l'environnement. D'ailleurs, le protocole de Kyoto, qui vise à réduire les émissions globales de gaz à effet de serre, favorise un fort accroissement de la production d'électricité basée sur des ressources renouvelables, qui est majoritairement de faible puissance individuelle.

Ces grandes évolutions récentes touchant l'industrie de l'énergie électrique conduisent aujourd'hui à une arrivée croissante d'insertion de production d'énergie dans les réseaux de distribution. Cette production est le fait d'une multitude de producteurs indépendants.

Les générateurs d'énergie ont toujours existé dans les réseaux mais leur présence n'était jusqu'alors pas assez significative pour avoir un impact sur le régime permanent des réseaux.

Aujourd'hui, la situation est différente. Année après année, le nombre de producteurs d'énergie renouvelable augmente de manière importante, tandis que les investissements sur les réseaux électriques ont diminués. Or, au-delà d'une certaine masse critique, les générateurs ont des impacts négatifs sur le fonctionnement adéquat des réseaux. Les principaux points négatifs sont:

- des impacts sur le fonctionnement des protections dus à la modification des transits de puissance et des courants de court-circuit ;
- déstabilisation du système électrique;
- apparition des flux d'énergie réactive;
- risque de congestion;
- des impacts sur les niveaux de tension;

- fermeture des grandes centrales;
- chute de tension ou surtension non permise par le code électrique;
- des impacts sur la stabilité des réseaux et sur les temps critiques d'élimination de défauts.

L'étude de ces impacts est nécessaire pour que l'insertion massive des sources d'énergie renouvelable au sein des réseaux existants se fasse sans dégradation en terme de qualité et des performances du fonctionnement des réseaux.

## MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de recherche comprend les étapes suivantes:

- 1) recherche bibliographique approfondie sur:
  - ✚ la problématique de l'insertion des générateurs d'énergie dans les réseaux de distribution.
  - ✚ les différentes méthodes de réglage de tension et de puissance en présence de producteurs d'énergie.
- 2) étude de modèles mathématiques de deux types de générateurs d'énergie:
  - i) un producteur de type panneau solaire et ii) un générateur de type éolienne.
- 3) étude de différents types de configuration du raccordement de producteurs d'énergie dans le réseau électrique.
- 4) modélisation à l'aide de la plate-forme Matlab®/Simulink® de chaque type de générateur.
- 5) réalisation de plusieurs simulations sur un réseau BT de deux méthodes de réglage de tension et de puissance, à savoir: i) réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ ) et ii) réglage de production en puissance active et en tension ( $P/V$ ).

## CHAPITRE 1

### LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

#### 1.1 Définition de la production d'énergie

La production d'énergie représente l'ensemble des générateurs d'électricité de faible puissance connectés aux réseaux de distribution. Ce terme est construit par opposition au terme « production centralisée » désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport. La production d'énergie est, comme toute source d'énergie, raccordée au réseau de transport, de répartition ou de distribution. Aussi, elle fait partie des énergies non conventionnelles (éolienne, solaire, piles à combustible) ou conventionnelles de petite puissance  $< 200$  MW (micro-turbines à gaz, cogénération, moyen de stockage de l'énergie).

Les générateurs d'énergie se distinguent des unités de production centralisée par le fait qu'ils sont le plus souvent raccordés au réseau électrique et par leur « petite taille ».

Aujourd'hui, le nombre de producteurs d'énergie connectés aux réseaux est en forte augmentation. Plusieurs facteurs expliquent ce fort accroissement. Le premier est l'ouverture progressive du marché de l'énergie au monde. D'ailleurs, les producteurs d'énergie indépendants, après une étude de raccordement préalable au réseau électrique, peuvent produire et vendre leur production d'électricité sur le marché [12].

Le deuxième facteur, certainement le plus important, responsable de l'augmentation de la production d'énergie, est causé par les incitations gouvernementales au développement des énergies renouvelables. Depuis ces dernières années, le monde

entier assiste en effet à une volonté politique de la part des états, d'une part, d'augmenter l'indépendance énergétique et, d'autre part, de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Des systèmes d'incitation économique à la production d'électricité ont été mis en place depuis des sources d'énergies renouvelables. Ces subventions sont en partie à l'origine de la forte croissance de l'industrie éolienne de ces dernières années et encore plus significativement du développement des installations photovoltaïques. D'ailleurs, l'intérêt croissant accordé à l'environnement pousse les producteurs à développer la production d'énergie d'électricité basée sur l'utilisation de sources d'énergies primaires renouvelables et de la cogénération dans le but d'augmenter le rendement énergétique des installations de production, ce qui permet de produire une énergie plus « propre ».

## 1.2 Différents types de production d'énergie

Plusieurs types de générateurs d'énergie se développent dans le monde sur la base d'unités de production traditionnelle, de système à énergie renouvelable ou de cogénération installée par des producteurs indépendants. Les différentes technologies de production d'énergie appartenant à trois groupes sont:

- Les sources d'énergie traditionnelle;
- Les sources d'énergie renouvelable;
- La cogénération.

### 1.2.1 Les sources d'énergie traditionnelles (non renouvelables)

Plus de 80 % de la production centralisée d'électricité dans le monde utilise des sources d'énergie non renouvelables [44]. Dans le cas de la production d'énergie, les données sont absentes mais il est certain que cette proportion est beaucoup plus faible

du fait de la prépondérance de l'éolienne. Deux types de technologies non renouvelables peuvent être décrites ici:

- **Énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole):** elles sont utilisées comme l'énergie primaire pour produire l'électricité. Ces énergies se trouvent dans les:
  - **Turbines à combustion.** Les niveaux de puissance varient de 25 kW à 200 MW. Actuellement, l'insertion de ce type de générateurs se fait généralement au niveau de la répartition ou de la distribution HT. Ils sont particulièrement utilisés dans la cogénération.
  - **Micro-turbines à combustion.** Les niveaux de puissances disponibles dans le marché varient entre 30 et 250 kW. Ces micro-turbines ont l'avantage d'être compatibles avec différents types de combustibles. Ces générateurs ont été conçus pour les utilisations commerciales de la cogénération. L'interface avec le réseau est normalement réalisée avec des étages d'Électronique de Puissance (convertisseurs AC/DC/AC). Ces convertisseurs adaptent la vitesse des turbines à la fréquence du réseau. Le niveau de tension de raccordement est usuellement de 400 V.
  - **Moteurs à gaz.** Ils sont destinés à la cogénération. Leur niveau de puissance varie de 5 kW à 5 MW. L'utilisation première de ce type de moteur est l'unité de secours, mais la tendance aujourd'hui est son utilisation dans la cogénération. Le niveau de tension d'insertion est de 400 V avec un rendement électrique de 25-30 % et de 90 % pour la cogénération.
  - **Moteurs Diesel.** Le gabarit des puissances varie de 100 kW à 25 MW. Ils sont normalement utilisés dans la cogénération et comme groupes de

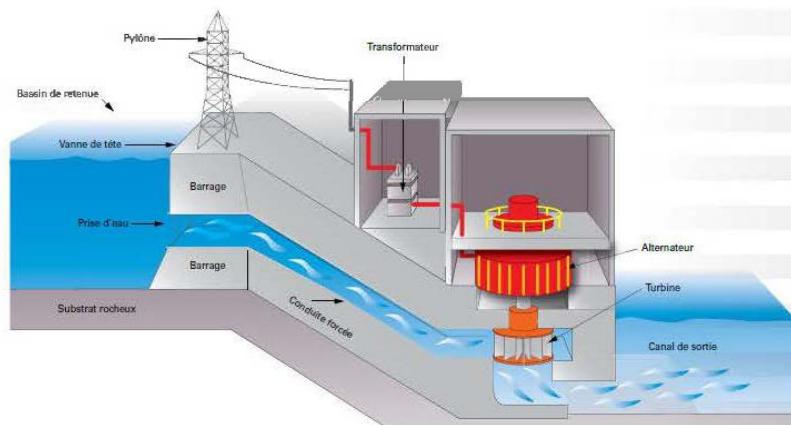
secours. Le rendement électrique est d'environ 35 %. L'intégration dans le réseau se fait au niveau de la HT ou la BT. Le moteur Diesel est relié à une génératrice (asynchrone, synchrone ou à une machine à courant continu).

- **Turbines à vapeur.** Elles peuvent utiliser différents types de combustible, de l'énergie solaire à la biomasse. L'inconvénient est leur coût d'installation et la complexité allant avec. Le point de raccordement est normalement la HT.
  - **Moteurs Stirling.** L'intervalle de puissance va de 5 à 50 kW. Il est possible de produire de l'énergie à partir de combustibles fossiles, biomasse, entre autres. Ils sont aussi employés dans la cogénération. Les moteurs qui peuvent travailler à une vitesse constante sont directement couplés au réseau via une génératrice synchrone.
- **Énergie d'hydrogène (piles à combustible).** Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau (électrochimique) dans laquelle l'énergie chimique dégagée par la dégradation du combustible est convertie directement en énergie électrique et en chaleur. Il existe différentes propositions commerciales présentes sur le marché, allant de 1 kW jusqu'à 1 MW, selon le type de pile à combustible. Ces systèmes ne sont pas encore matures et nécessitent une interface DC/AC pour le couplage au réseau avec un étage intermédiaire continu pour le réglage du point de fonctionnement des piles à combustible.

### 1.2.2 Les sources d'énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelable contribuent progressivement à la construction de générateurs d'énergie. Mis à part pour les grands barrages et les champs d'éoliennes de grande superficie, les sources d'énergie renouvelable sont souvent dispersées géographiquement et ne permettent une production électrique que de faible puissance. Les principales sources d'énergie renouvelable les plus connues sont:

- **Hydraulique.** Les centrales hydrauliques transforment l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves en énergie électrique. La puissance produite dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. L'énergie potentielle est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau, qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. Il existe donc des centrales dites au fil de l'eau de faible hauteur de chute mais avec un débit d'eau important et des centrales dites de haute et moyenne chute pour lesquelles le débit d'eau est plus faible mais la hauteur de chute plus importante. Cette classification concerne plutôt les productions de forte puissance. Pour la production d'énergie, on emploiera préférablement le terme de microcentrales. L'ordre de grandeur de la puissance des microcentrales hydrauliques est de 5 MW.



**Figure 1 :** Schéma d'une centrale hydraulique

Outre le faible bilan carbone de l'installation, les avantages de l'énergie hydraulique sont la gratuité de l'énergie primaire et la régularité de la production électrique. Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial et l'impact sur l'environnement.

L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.

- **Éolien.** Les aérogénérateurs, ou éoliennes, transforment l'énergie cinétique de l'air (le vent) en énergie électrique. Cette source d'énergie, qui commence à atteindre sa maturité technologique dans le monde, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. L'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est assez réduit.

Il existe deux types principaux de génératrices utilisées: synchrones et asynchrones. Le raccordement au réseau peut être réalisé de différentes façons:

- **Directement couplées au réseau.** La fréquence est conservée par ajustement de l'angle des pales ou par décrochement aérodynamique. La compensation d'énergie réactive est réalisée avec des éléments de compensation parallèle ou shunt, comme le STATCOM ou le SVC. Ceci ne concerne que les génératrices asynchrones.



**Figure 2 :** Transformateur triphasé / photovoltaïque / moyenne tension  
PCS 6000 STATCOM [49]

- **Machines asynchrones à double alimentation.** La variation de vitesse est plus large, la puissance peut aller jusqu'à quelques MW. Ce système permet une variation de vitesse au prorata de l'électronique de puissance installée.
- **Machines synchrones.** Certaines machines dites lentes permettent de se passer du multiplicateur de vitesse et augmentent alors la fiabilité et le rendement. Les plus grandes éoliennes présentes sur le marché sont basées sur des machines à aimants permanents et atteignent des puissances individuelles de 5 MW.

Les turbines éoliennes sont, quelques fois, associées à d'autres sources d'énergie, par exemple à un moteur Diesel ou à un élément de stockage d'énergie pour essayer d'éviter les problèmes dérivés de l'intermittence de la puissance générée comme conséquence de la variation de la puissance primaire. Il n'en demeure pas moins que l'on ne fait appel au stockage que dans des situations très rares.

L'énergie éolienne existe depuis le début du siècle XX et n'est pas une énergie nouvelle, par contre, pendant les dernières années, le développement des installations « *Offshore* » est un élément à tenir en compte pour l'implantation d'une grande quantité d'éoliennes. Ils existent aujourd'hui des petits parcs éoliens au Pays-Bas et au Danemark, mais des parcs avec une grande capacité sont en cours d'étude. D'ailleurs, le projet baptisé de la Grande-Bretagne baptisé, « *Dogger Bank Creyke Beck* », prévoit la construction du plus grand parc éolien « *Offshore* » du monde. Ce projet prévoit construire 400 éoliennes sur une surface totale de 500 km<sup>2</sup> à 131 km des côtes anglaises. D'une capacité de 2,4 GW, soit une puissance totale équivalant à trois réacteurs nucléaires de taille moyenne, l'électricité produite par ces éoliennes alimentera près de 2 millions de foyers [43].



**Figure 3 :** Le plus grand parc éolien dans le monde [43]

Les avantages des installations « *Offshore* » incluent: la réduction de l'impact visuel, des vents plus élevées et plus réguliers et une réduction du niveau des turbulences dans l'air. Par contre, les inconvénients se placent dans le grand coût d'investissement et le besoin de câbles sous-marins, entre autres.

L'insertion des parcs éoliens « *Offshore* » dans le réseau pose un grand défi à cause des localisations éloignées des grandes villes dans la plupart des cas et la taille des systèmes.

- **Géothermie.** Les centrales géothermiques utilisent la chaleur des couches géologiques souterraines, qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables, pour générer directement (par prélèvement) ou indirectement (par échange de chaleur) de la vapeur d'eau. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique. Cette vapeur d'eau sert ensuite à produire de l'électricité.

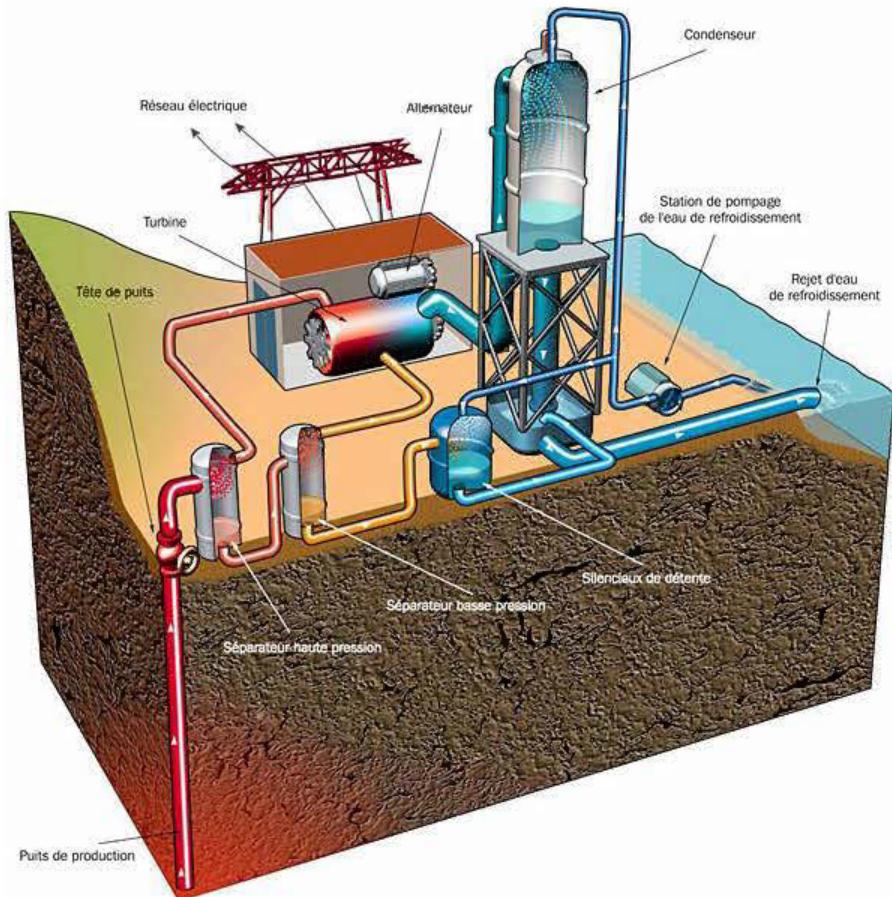
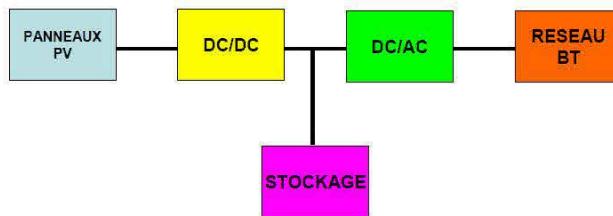


Figure 4 : Centrale géothermique

- **Solaire photovoltaïque (PV).** Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage.

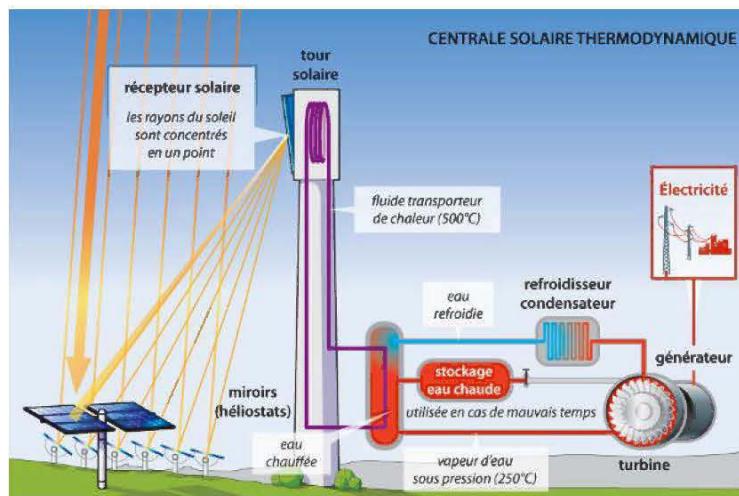
Le raccordement des PV au réseau est réalisé avec l'architecture montrée à la figure 5.



**Figure 5 :** Connexion des panneaux photovoltaïques au réseau

L’interface normale des PV est conçue à l’aide des convertisseurs DC/DC et d’un onduleur DC/AC. Afin d’assurer une injection constante dans le réseau, des éléments de stockage d’énergie peuvent être disposés.

- **Solaire thermique.** L’énergie solaire peut aussi être convertie indirectement en énergie électrique via la production de chaleur. Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l’eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.



**Figure 6 :** Centrale solaire thermique

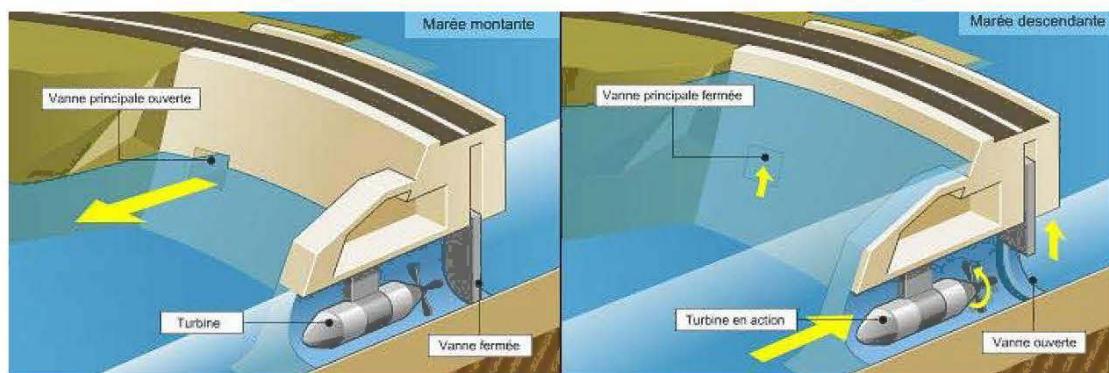
- **Biomasse et déchets.** Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets

organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques afin de générer de la chaleur, puis de l'énergie électrique. L'intérêt majeur est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère est compensé par celui absorbé par la repousse de la biomasse. Le bilan carbone est donc près de zéro.



**Figure 7 :** Centrale thermique à biomasse [50]

- **Marémotrice.** Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées. L'énergie correspondante peut être captée sous deux formes : énergie potentielle (en exploitant les variations du niveau de la mer) ou énergie cinétique (en exploitant les courants de marée, qui peuvent être captés par des turbines, ou hydroliennes).



**Figure 8:** Centrale marémotrice

- **Hydrolienne.** Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique des courants marins, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine

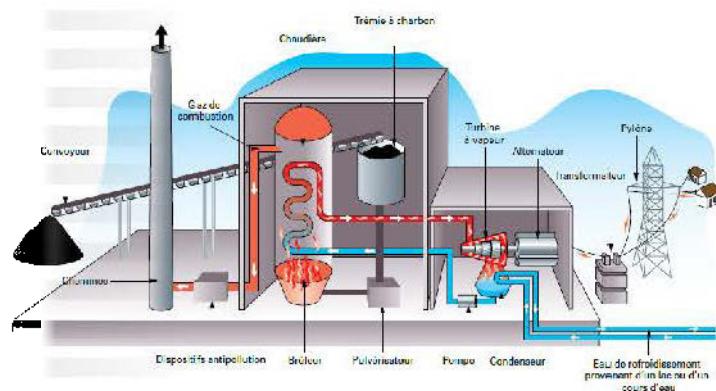
de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur. La puissance des centrales hydroliennes est très prometteuse, cependant elles restent encore dans une étape de recherche et de développement.



**Figure 9 :** Centrale hydrolienne [48]

### 1.2.3 La cogénération

La cogénération électrique – chaleur est une technique permettant de récupérer la chaleur produite par toute microcentrale électrique proche de bâtiments et fonctionnant à haute température, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou de certains types de piles à combustible. Le rendement énergétique global d'une telle installation peut atteindre 90 % et l'utilisation locale de la chaleur produite permet d'éviter une consommation supplémentaire d'énergie pour le chauffage des bâtiments.



**Figure 10 :** Schéma d'une centrale thermique au charbon

### 1.3 Avantages, intérêts et perspectives de développement de la production d'énergie

Les générateurs d'énergie peuvent être installés près des sites de consommation, réduisant ainsi le coût de transport, les pertes en lignes et l'appel de puissance réactive au niveau du poste source. D'autre part, le temps d'installation est plus court que pour la production centralisée et les sites d'installation sont plus faciles à trouver. Enfin, les nouvelles technologies mises en œuvre sont plus propres et l'utilisation des producteurs d'énergie en cogénération améliore nettement le rendement énergétique global de l'installation et donc son attrait économique.

Le potentiel énergétique de la grande centrale hydraulique est exploité près de son maximum au niveau mondial avec 740 GW installés [44].

Le monde comptera 3,2 TW de solaire photovoltaïque et d'éolien en 2030. La capacité électrique installée dans le monde va presque doubler d'ici 2030 selon le rapport « *2030 Market Outlook* » de « *Bloomberg New Energy Finance (BNEF)* », passant de 5,5 TW en 2012 à 10,5 TW en 2030. Cependant, 60 % des nouvelles capacités ajoutées sur la période seront renouvelables [44].

Les deux principaux moteurs de ce changement global seront le panneau solaire et l'éolien terrestre. La puissance photovoltaïque cumulée en 2030 sera de 1,9 TW (0,14 TW en 2013), soit davantage que celle de l'éolien, qui atteindra 1,3 TW. La puissance installée des autres énergies renouvelables (dont l'hydroélectricité) sera de 2 TW [44]. La part combinée du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre dans le mix électrique mondial passera de 3 % en 2013 à 17 % en 2030 (entre 16 et 18 % selon les hypothèses retenues). Le troisième élément majeur sera l'hydroélectricité. En revanche, les contributions de la bioélectricité et de l'éolien « *offshore* » seront relativement modestes, tandis que celles du solaire thermodynamique (CSP) et de la géothermie seront faibles [44].

### 1.3.1 Avantages économiques

Une étude menée par Hugo A. Gil et Geza Joos en 2008 a montré que la production d'énergie peut amener des avantages économiques pour tous les acteurs du système électrique [32].

Les consommateurs, en installant leurs propres générateurs d'énergie, peuvent augmenter la fiabilité de leur approvisionnement. Ceci est particulièrement important pour les consommateurs sensibles (banques, hôpitaux, etc.). Ils peuvent aussi diminuer leur facture électrique en consommant l'électricité produite, voire en la revendant au distributeur à des tarifs de rachat supérieurs aux tarifs de vente.

Les gestionnaires des réseaux peuvent, grâce aux générateurs d'énergie, différer leurs investissements sur le réseau. La production d'énergie, à condition qu'elle ne dépasse pas en puissance la consommation locale, permet de produire localement l'électricité consommée par les charges proches, les pertes en lignes sur les réseaux et les appels de puissance dans les postes sources sont donc diminués. Cela permet aussi, entre autre, d'effacer les pointes de consommation importantes. Ce constat reste cependant théorique puisqu'en pratique, partout dans le monde, on assiste à une hausse des investissements liée à la production d'énergie dans les réseaux électriques (construction de départs dédiés et renforcement des lignes).

L'installation de producteurs d'énergie au niveau mondial permettrait aussi de diminuer globalement les prix de l'électricité, quelques soient les marchés (marchés à long terme, spot, ajustement, bilatéraux, etc.). De manière générale, sur les marchés, la production est généralement répartie de la moins chère à la plus chère jusqu'à ce que l'offre égale la demande prévue, c'est-à-dire la consommation attendue. Par conséquent, une diminution de la demande devrait, théoriquement, faire baisser le prix de clôture du marché. L'excédent de demande est couvert par la production d'énergie.

Enfin, pour le responsable d'équilibre, l'agrégation de la production centralisée en centrales virtuelles lui permettrait de disposer de réserves de production. Cette réserve pourrait être moins chère à mobiliser dans certains cas que d'utiliser le marché d'ajustement.

Ces avantages économiques de la production d'énergie sont attendus dans un marché économique idéal, où les différents acteurs pourraient être en position de concurrence équivalente. Il apparaît évident que ce n'est pas le cas aujourd'hui dans le système électrique. Le marché de l'énergie électrique est dominé par les anciennes entreprises publiques qui se retrouvent en situation de monopole, car le marché de l'énergie électrique étant un marché fortement capitaliste nécessitant de forts investissements, l'établissement d'un marché concurrentiel prend du temps. Leur capacité de production est très importante et permet des économies d'échelle que ne peuvent se permettre les petits producteurs. Par ailleurs, ces entreprises publiques étaient chargées, du temps des monopoles, de vendre l'électricité à prix coûtant. La privatisation de ces entreprises et l'arrivée d'acteurs privés entraînera probablement la recherche de bénéfices financiers. Le passage dans une économie libéralisée amènera donc certainement des prix de revente de l'électricité supérieurs aux anciens tarifs régulés.

### 1.3.2 Avantages climatiques et perspectives de développement

Les principales sources d'énergie utilisées par la production d'énergie sont renouvelables. L'énergie éolienne est un bon exemple: les émissions de dioxyde de carbone sont très faibles et concernent uniquement la fabrication et l'entretien des installations. Bien que les puissances individuelles soient faibles, le déploiement à grande échelle de générateurs d'énergie permettrait donc d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie électrique.

En 2004, dans le monde, 17.8 % (soit 3 179 TWh) de l'énergie électrique totale produite (soit 17 408 TWh) l'a été à partir d'énergies renouvelables. L'énergie hydraulique représente cependant près de 90 % de cette part. Dans les tendances données par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), les énergies renouvelables devraient atteindre 20.3 % en 2030 pour un doublement de la production totale d'électricité (33 750 TWh) [29]. L'énergie hydraulique passera alors à 70 %, la biomasse à 10 % contre 75.6 % en 2015 et les autres énergies renouvelables de 8 à 20 % contre 4.5 % en 2015. La figure 11 illustre ce scénario de référence.

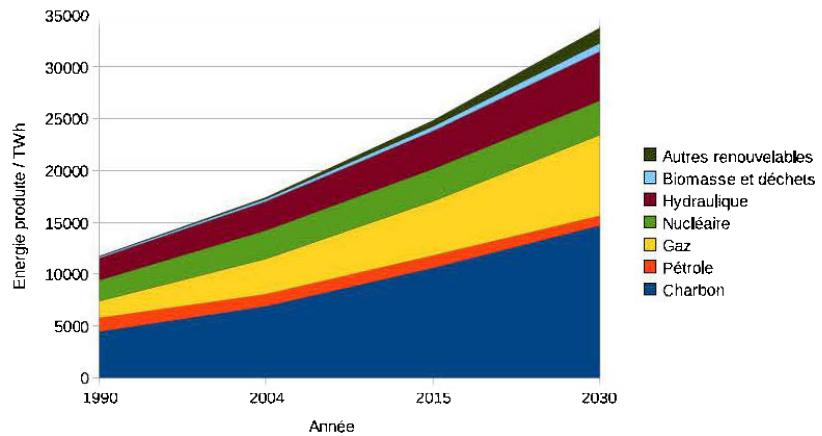


Figure 11 : Scénario de référence pour la production d'électricité [29].

Durant les deux prochaines décennies, la croissance de la production d'électricité issue des énergies renouvelables va donc être sensible. Même si une partie de cette production sera assurée par des installations connectées au réseau de transport (hydraulique et grandes fermes éoliennes), les générateurs d'énergie en assureront une part grandissante. La croissance de la production d'énergie sera donc elle aussi importante, d'autant plus que d'autres technologies fonctionnant avec des sources d'énergie non renouvelable seront à prendre en compte (véhicules électriques, cogénération, micro centrales, etc.).

#### 1.4 Conclusion

Nous avons exposés les différents moyens de production d'énergie ainsi que leurs avantages. À la fin du chapitre, nous avons présenté une description sommaire des réseaux du futur. Ces derniers sont connus, en anglais, sous le terme de « *Smart Grids* ».

La dérégulation du secteur électrique a favorisé l'apparition de moyens de production au sein des réseaux de distribution. Cette insertion de production, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, n'est pas sans impact sur ceux-ci. Plusieurs de ces impacts vont être présentés (impact du plan de tension, modification des courants de défaut, impact sur la stabilité, diminution des temps d'élimination critique de défaut, etc.).

## CHAPITRE 2

# ÉTUDE DES IMPACTS DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE SUR LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

### 2.1 Introduction

L'énergie produite par les nouveaux moyens de production d'énergie est destinée à être produite localement (au plus près des centres de consommation) et n'est donc pas destinée à être transportée sur de grandes distances. Elle peut s'étaler de quelques kilowatts à quelques mégawatts et peut également être couplée avec de la production de chaleur (cogénération). La connexion de cette génération d'énergie dispersée est prévue dans la majorité des cas dans les réseaux de distribution selon l'ordre de grandeur des puissances injectées.

L'insertion croissante de cette génération d'énergie au sein du système électrique existant n'est pas sans impact sur l'exploitation et le fonctionnement de ce dernier. Elle présente un véritable défi par les multiples incertitudes actuelles sur les capacités d'intégration de telles productions dans le système, avec tous les problèmes qui y seront engendrés et les adaptations nécessaires à opérer sur le système actuel. Dans les paragraphes suivants, plusieurs de ces impacts vont être présentés.

## 2.2 Étude des impacts de la production d'énergie sur les réseaux électriques

La production d'énergie peut occasionner certains impacts sur le système électrique. Ces impacts peuvent être classés en deux groupes: les impacts sur la distribution et les impacts sur le transport.

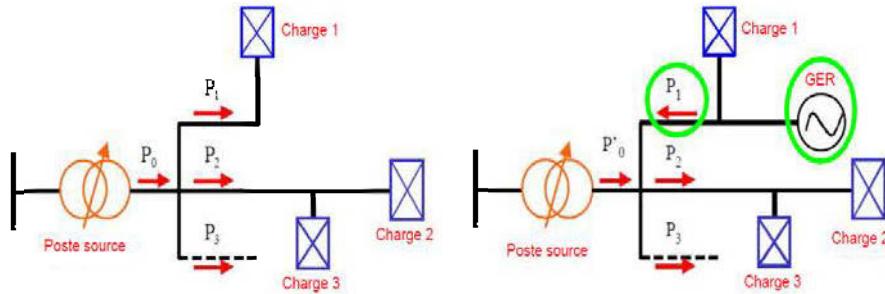
### 2.2.1 Impacts sur le système de distribution

#### 2.2.1.1 Modification du transit de puissance

Sur la Figure 12, la représentation du transit de puissance active est donnée pour un réseau de distribution sans générateurs d'énergie (schéma à gauche) et en présence de producteurs d'énergie (schéma à droite).

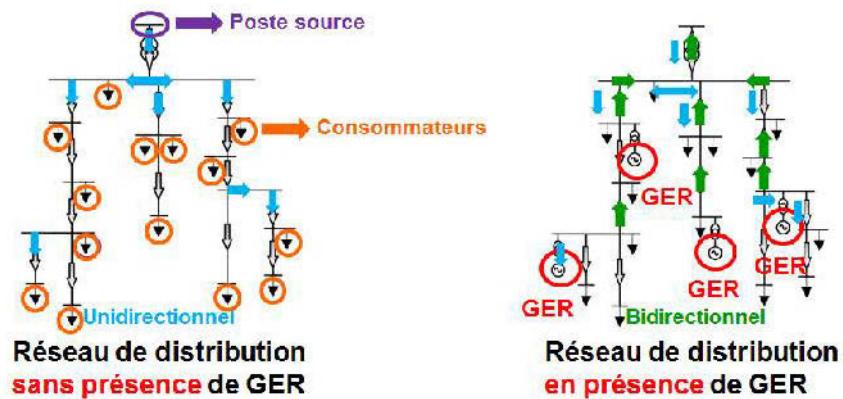
Pour ce réseau, la puissance totale consommée est égale à  $P_0$ . Cette puissance provient du réseau de répartition et se répartit sur les différents départs du réseau. Quand le générateur d'énergie est introduit (schéma à droite), la puissance qui transite au travers du poste source diminue et devient égale à  $P'_0$ . Dans le même temps, la puissance  $P_1$  change de sens (si la puissance du producteur est supérieure à la puissance de la charge 1).

Ainsi, la puissance qui transite dans cette branche ne provient plus du poste source, mais du producteur d'énergie. De plus, il peut arriver, selon l'état de charge du réseau et de la puissance délivrée par la production d'énergie, que la puissance qui transitait dans le poste source ( $P'_0$ ) change de signe. Dans ce cas, le transit de puissance se fait du réseau de distribution vers le réseau de répartition [16].



**Figure 12 :** Flux de puissance dans les réseaux de distribution sans et avec GER

Les réseaux électriques ont été, à l'origine, conçus pour des flux de puissance active descendants depuis le poste source vers les consommateurs. Dans cette configuration, le réseau électrique achemine l'électricité des centrales de productions principalement situées sur le réseau de transport vers les clients via le réseau de distribution. Dans ce cas, la circulation d'électricité est unidirectionnelle. Par contre, la présence de production d'énergie peut créer des flux bidirectionnels de puissance active à l'intérieur des réseaux de distribution, voire aussi, quand la production dépasse la consommation, pourquoi pas des flux ascendants vers les réseaux de transport. La figure 13 illustre le phénomène.



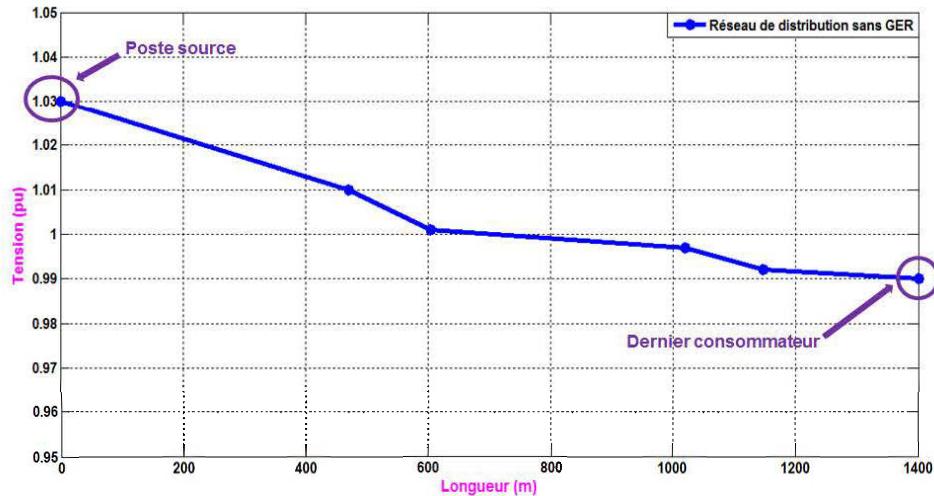
**Figure 13 :** Flux d'énergie sur un réseau de distribution en présence de GER

Cependant, la modification du transit de puissance peut provoquer le changement des matériels présents sur les réseaux de distribution (appareils de mesure, protections, etc.) qui sont très souvent unidirectionnels.

De plus, la connexion de producteur d'énergie peut induire une inversion du flux de puissance sur le réseau de distribution. Ils deviennent donc bidirectionnels. Ceci fait donc apparaître des problèmes d'incompatibilité entre la situation actuelle du réseau et la présence de production d'énergie sur celui-ci. La première conséquence de ces flux de puissance bidirectionnels est qu'il devient nécessaire de modifier le plan de protection des réseaux électriques. Les générateurs d'énergie apportent, en effet, de la puissance de court-circuit en aval des protections, ce qui a pour effets potentiels de les aveugler ou de les déclencher de manière intempestive. La sécurité des biens et des personnes peut donc être en jeu.

#### 2.2.1.2 Impact sur le profil de la tension

Les générateurs d'énergie modifient aussi le plan de tension des réseaux électriques. En fait, le dimensionnement du réseau est réalisé de manière à avoir une chute de tension admissible sur toute la longueur des départs. Ainsi, en l'absence de production d'énergie, la tension décroît progressivement avec la distance du poste source vers le dernier consommateur en fonction de l'impédance des câbles et des charges. L'ajout d'un ou plusieurs producteurs d'énergie peut créer localement une ou plusieurs élévations de tension. Ces élévations peuvent se transformer en surtensions et dépasser les limites admissibles par le code électrique [46], notamment en cas de faible charge sur le réseau. Le phénomène est illustré à la figure 14 représentant l'évolution de la tension le long d'un départ.

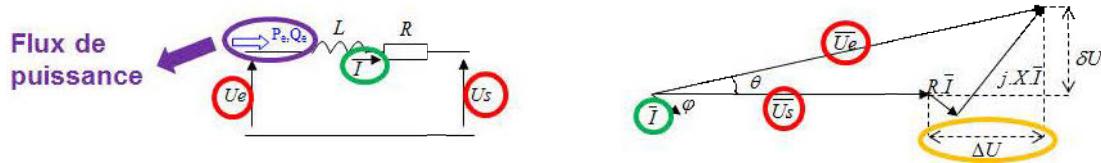


**Figure 14 :** Variation de la tension le long d'un départ HT sans GER

Les transformateurs régleurs en charge des postes sources HT mesurent en effet la tension à leurs bornes. Par contre, si les producteurs d'énergie se trouvent suffisamment loin, les transformateurs régleurs en charge ne détecteront pas les élévations de tension et, en cherchant à maintenir la tension à la valeur de consigne au poste source, pourront provoquer des surtensions près des générateurs d'énergie.

#### 2.2.1.3 Les surtensions induites par la connexion d'un générateur d'énergie

Afin d'illustrer l'impact d'insertion de producteurs d'énergie dans les réseaux, la formule de la chute de tension entre deux nœuds d'une portion de la ligne d'un réseau BT a été utilisée. La figure 15 illustre un circuit d'une ligne électrique composée d'une impédance  $RL$ . Aussi, la représentation vectorielle de ce circuit est illustrée sur le diagramme de Fresnel reliant les diverses grandeurs du système entre elles, soient: (la tension d'entrée  $U_e$ , la tension de sortie  $U_s$ , le courant  $I$  qui circule dans la ligne).



**Figure 15 :** Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans GER

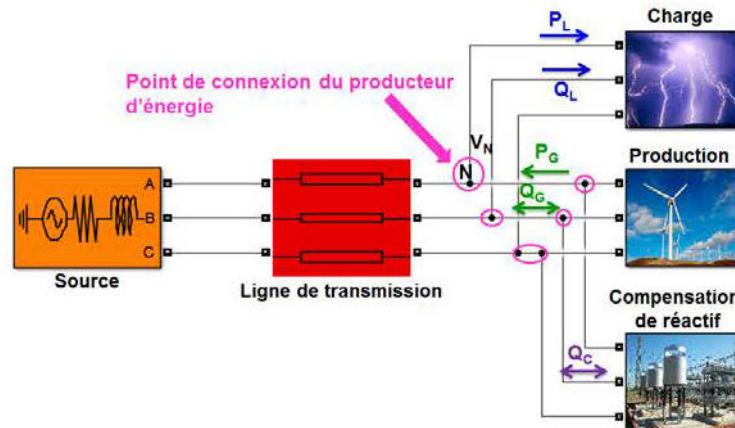
Si on considère que l'hypothèse de Kapp est valide (l'angle  $\theta$  est négligeable), la chute de tension sans la présence de générateurs d'énergie est la différence entre la tension d'entrée  $U_e$  et la tension de sortie  $U_s$  qui peut être calculée après projection à l'aide de la formule suivante:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + L \cdot \omega \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.1)$$

Ainsi, si nous considérons le flux de puissance active et réactive qui circule dans la ligne, la formule de la chute de tension devient:

$$\Delta U = \frac{R \cdot P_e + L \omega \cdot Q_e}{U} \quad (2.2)$$

Maintenant, lorsque nous avons un GER connecté au réseau comme illustré à la figure 16.



**Figure 16 :** Détermination de la chute de tension sur une ligne en présence de GER

La chute de tension entre le poste source et le point de raccordement d'un producteur d'énergie via une ligne est exprimée à l'aide de la formule suivante:

$$\Delta V = R \cdot \frac{P_N}{V_N} + L \cdot \omega \cdot \frac{Q_N}{V_N} \quad (2.3)$$

$$\Delta V = \frac{R(P_G - P_L) + L\omega(\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \quad (2.4)$$

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_N + X \cdot Q_N}{V_N} \quad (2.5)$$

avec:

$R$  est la résistance totale de la ligne;

$L$  est l'inductance totale de la ligne;

$V_N$  est la tension au nœud N;

$I_t$  est le courant transitant dans la ligne;

$P_N, Q_N$  les puissances active et réactive au nœud N;

$P_G, Q_G$  sont les puissances active et réactive fournie par le générateur;

$P_L, Q_L$  sont les puissances active et réactive de consommation;

$Q_C$  est la puissance réactive du dispositif de compensation.

L'équation (2.5) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de générateurs d'énergie sur un réseau. En effet, l'injection de puissance, active ou réactive va induire une élévation de la tension au nœud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseau auxquels elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par le producteur d'énergie, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée ou limite admissible par le code électrique [46].

Dans le réseau de transport, la réactance linéique est supérieure à la résistance linéique ( $X \gg R$ ), donc, la formule (2.5) peut être simplifiée comme suit:

$$\Delta V = \frac{X \cdot Q_N}{V_N} \quad (2.6)$$

L'injection de puissance réactive aura donc plus d'impact sur le niveau de tension que l'injection de puissance active.

Par contre, dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique ( $R \gg X$ ), alors:

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_N}{V_N} \quad (2.7)$$

Considérons le cas d'un réseau général composé de  $N$  charge connectée comme illustré à la figure 17.

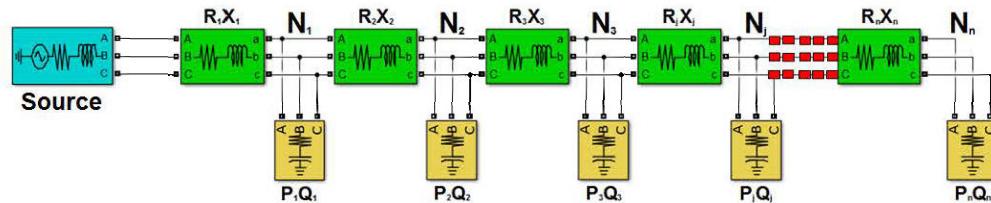


Figure 17 : Réseau général pour l'analyse

avec:

$U_{source}$  : Tension en amont de l'impédance court-circuit ( $R_1, X_1$ );

$P_j$  et  $Q_j$  : Puissance active et réactive au nœud  $N_j$ ;

$n$  : le nombre de nœud;

$j = 1, 2, \dots, n$ .

Ainsi, la chute de tension entre le poste source et le point de raccordement  $N_j$  est [16]:

$$\Delta U(N_j) = \frac{\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j} R_l) \cdot P_k + \sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j} X_l) \cdot Q_k}{U_{source}} \quad (2.8)$$

#### 2.2.1.4 Indice de qualification

Le réseau illustré à la figure 18 sera utilisé afin de déterminer l'expression de l'indice de qualification qui représente l'écart relatif de l'élévation de la tension due à la connexion d'un producteur d'énergie.

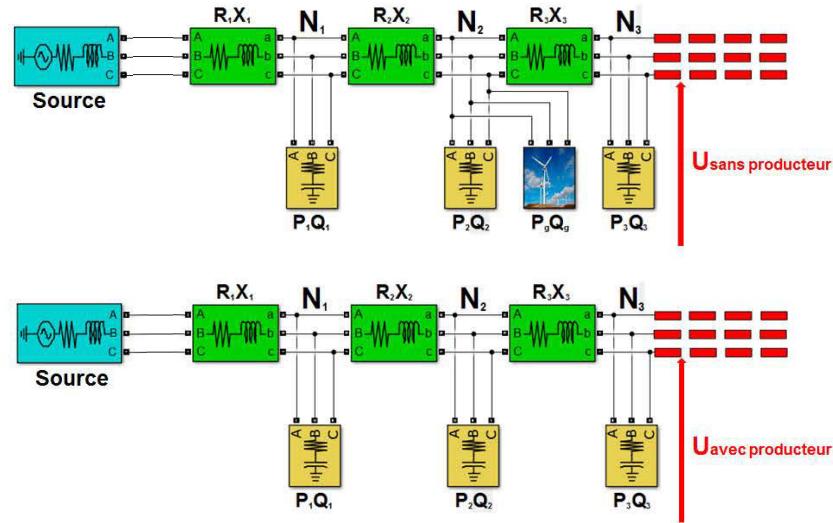


Figure 18 : Réseau pour l'indice de qualification

L'indice de qualification choisi pour illustrer l'effet des paramètres du réseau sur le plan de tension est déterminé par l'expression suivante:

$$\delta_{relatif}(N_j) = \frac{U_{avec\_producteur}(N_j) - U_{sans\_producteur}(N_j)}{U_{sans\_producteur}(N_j)} \quad (2.9)$$

Le développement de cette expression donne:

$$\delta_{relatif}(N_j) = \frac{(U_{source} - \Delta U_{avec\_producteur}(N_j)) - (U_{source} - \Delta U_{sans\_producteur}(N_j))}{U_{source} - \Delta U_{sans\_producteur}(N_j)} \quad (2.10)$$

$$\delta_{relatif}(N_j) = \frac{\Delta U_{sans\_producteur}(N_j) - \Delta U_{avec\_producteur}(N_j)}{U_{source} - \Delta U_{sans\_producteur}(N_j)} \quad (2.11)$$

En utilisant la formule approchée de la chute de tension, on obtient:

➤ Avant le nœud du générateur d'énergie:

$$\delta_{relatif}(N_{j \text{ avant}}) = \frac{P_g \cdot (\sum_{k=1}^{j \text{ avant}} R_k) + Q_g \cdot (\sum_{k=1}^{j \text{ avant}} X_k)}{U_{source}^2 - (\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ avant}} R_l) \cdot P_k + \sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ avant}} X_l) \cdot Q_k)} \quad (2.12)$$

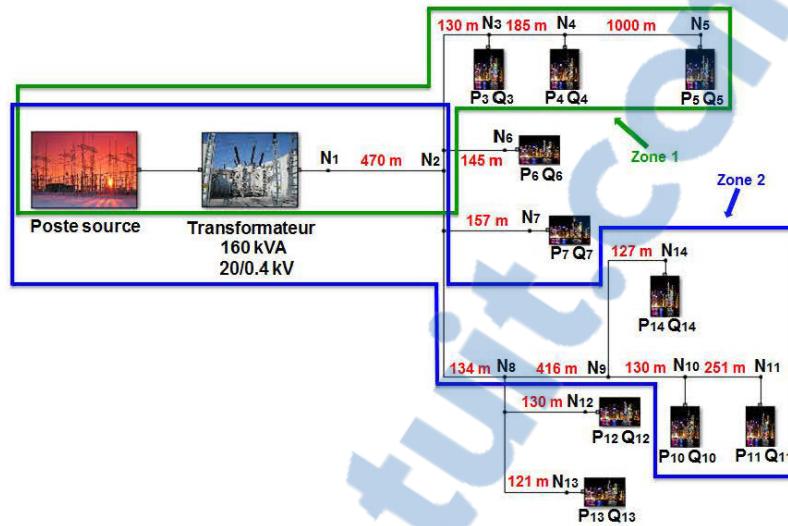
➤ Après le nœud du producteur d'énergie:

$$\delta_{relatif}(N_{j \text{ après}}) = \frac{P_g \cdot (\sum_{k=1}^g R_k) + Q_g \cdot (\sum_{k=1}^g X_k)}{U_{source}^2 - (\sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ après}} R_l) \cdot P_k + \sum_{k=1}^n (\sum_{l=1}^{k \leq j \text{ après}} X_l) \cdot Q_k)} \quad (2.13)$$

Avec  $j_{\text{avant}} \in [1,2]$  et  $j_{\text{après}} \in [2, n]$ . Cet écart relatif correspond à l'élévation de la tension en un point due à la connexion d'un producteur d'énergie.

#### 2.2.1.5 Illustration en simulation du problème de surtension

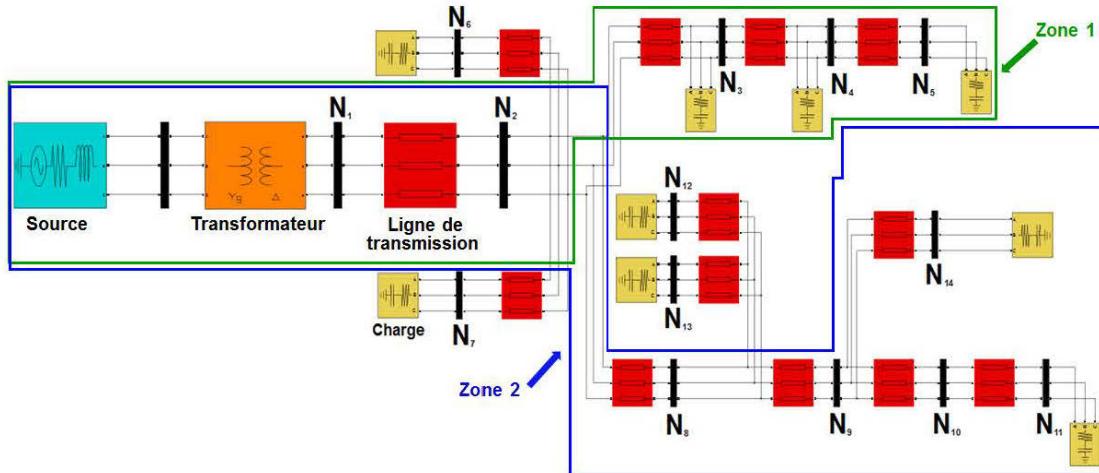
La formule générale développée pour le calcul de la chute de la tension (équ. 2.8) a été appliquée sur un réseau BT triphasé de type nord-américain comme illustré à la figure 19 (voir Annexe A).



**Figure 19 :** Réseau BT rural étudié de type Nord-Américain

Ce réseau a été modélisé et simulé à l'aide de la plate-forme Matlab®/Simulink® comme illustré à la figure 20. L'équation (2.8) nous a permis de calculer la chute de la tension de chaque nœud.

Le réseau étudié est composé de 14 nœuds, 10 charges actives P et réactives Q alimenté par un transformateur HT/BT de 160 kVA, 20/0.4kV. Ce type de réseau est utilisé ici, car le phénomène de surtension est facilement observable puisque sur ce niveau de tension la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique ( $R \gg X$ ).

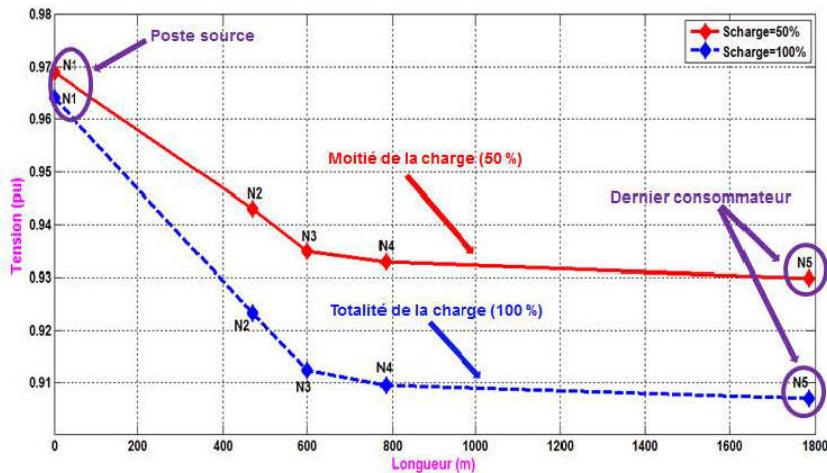


**Figure 20 :** Réseau BT rural simulé sans insertion de GER

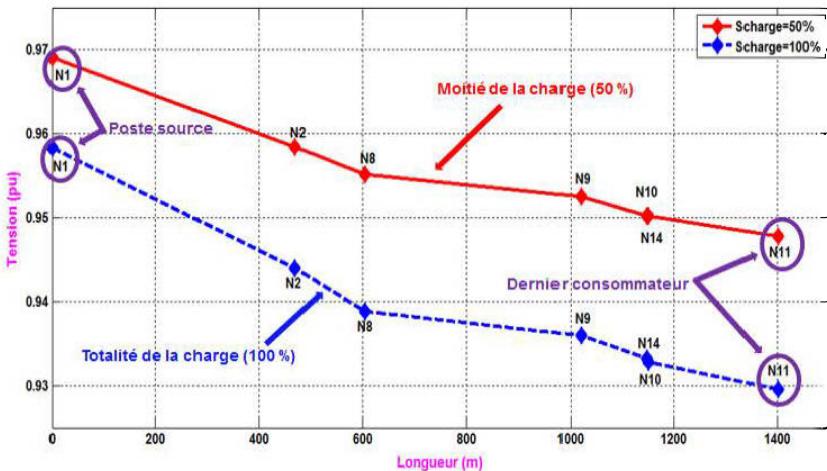
Pour l'étude, le réseau a été divisé en deux zones: 1 et 2. Chaque zone représente une ligne de distribution. Ainsi, deux scénarios ont été simulés, le premier sans insertion et le deuxième avec connexion de producteurs d'énergie.

- **Sans insertion de générateurs d'énergie:** Les simulations ont été réalisées pour le calcul de la chute de tension sur chaque nœud avec deux états de charge : un régime avec la totalité de la charge (100 %) représenté par la courbe bleu et un état avec la moitié de la charge (50 %) représenté par la courbe rouge comme illustré aux figures 21 et 22.

Sans le raccordement de producteurs d'énergie, le réseau est dans une configuration d'exploitation classique comme illustré à la figure 14. D'ailleurs, la tension chute du poste source jusqu'au point de consommation le plus éloigné. Il est notable que, dans les deux zones, 1 et 2, la tension atteint des valeurs basses au bout de ligne pour le cas en pleine charge (100 %). Cependant celles-ci restent sur l'ensemble du réseau dans les valeurs limites de tensions.

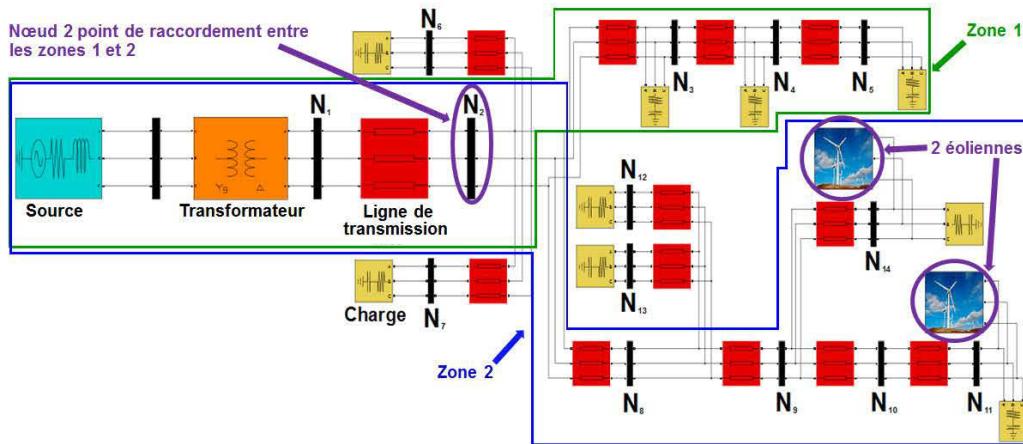


**Figure 21 :** Profil de tension pour deux régimes de charge sans présence de GER pour la zone 1



**Figure 22 :** Profil de tension pour deux régimes de charge sans présence de GER pour la zone 2

- **Avec insertion de générateurs d'énergie:** Dans le second scénario, deux éoliennes sont connectées aux nœuds 11 et 14 (zone 2) comme montré à la figure 23. (voir Annexe B)

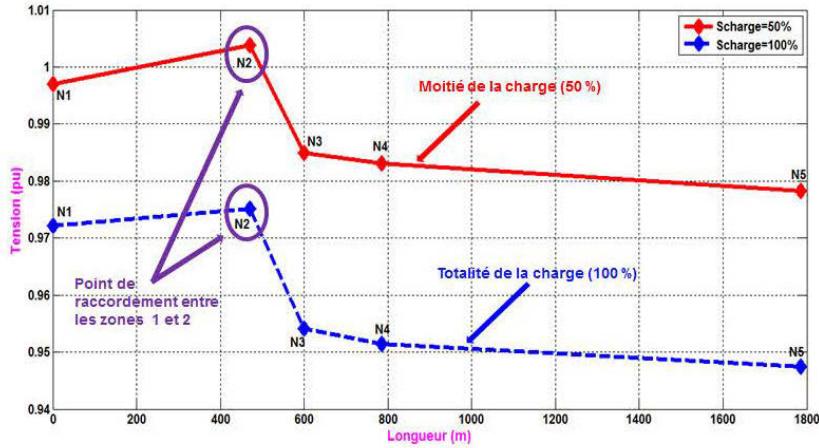


**Figure 23 :** Réseau BT simulé avec 2 éoliennes raccordées aux nœuds 11 et 14

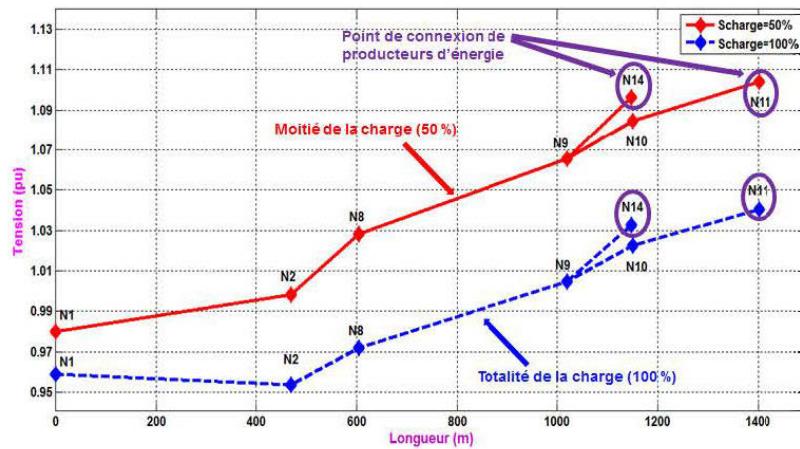
Les simulations ont été réalisées avec la présence de deux producteurs d'énergie comme illustrés aux figures 24 et 25.

Il est aisément visible que la connexion de producteurs d'énergie (zone 2) provoque une augmentation significative de la tension au point de raccordement de générateurs d'énergie ainsi qu'aux nœuds voisins. L'insertion de générateurs entraîne aussi une augmentation de la tension au nœud 2 (point de raccordement avec la zone 2).

D'ailleurs, dans le cas d'une charge partielle (50 %), la tension atteint même un niveau critique pour les nœuds 10, 11 et 14, supérieure à la tension admissible par le code électrique [46]. Il est à noter que l'augmentation de la tension dépend de la puissance délivrée par le générateur d'énergie.

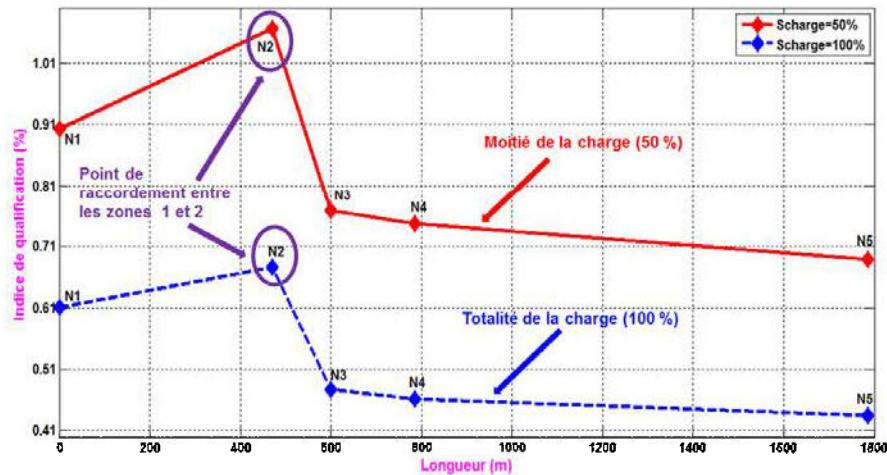


**Figure 24 :** Profil de tension pour deux régimes de charge en présence de GER pour la zone 1

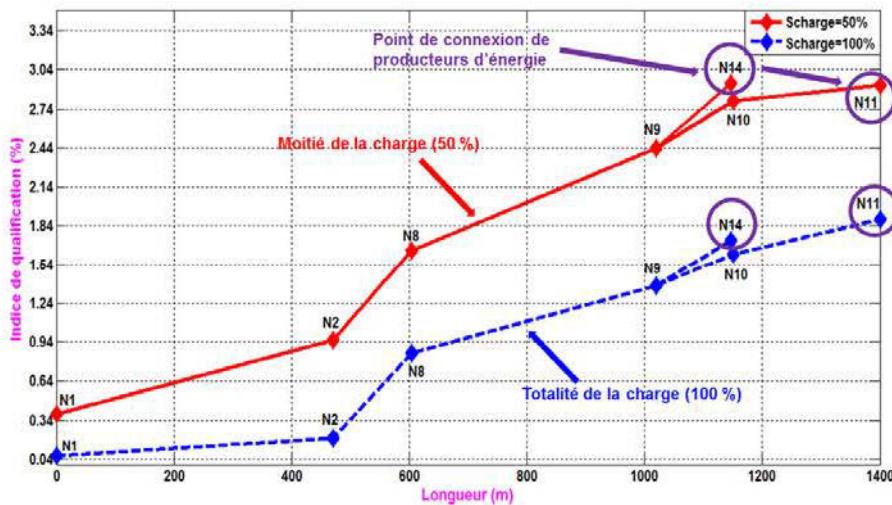


**Figure 25 :** Profil de tension pour deux régimes de charge en présence de GER pour la zone 2

Aussi, l'indice de qualification a été calculé et représenté comme illustré aux figures 26 et 27. L'écart relatif augmente linéairement après insertion de producteurs d'énergie; cet écart a une tendance croissante dans la zone de connexion au fur et à mesure qu'on s'éloigne du poste source, ce qui explique l'apparition de surtension sur son profil.



**Figure 26 :** Indice de qualification pour la zone 1



**Figure 27 :** Indice de qualification pour la zone 2

Le fait de produire de la puissance entraîne donc une surtension au point de connexion du producteur d'énergie et sur les nœuds voisins. Les conséquences sont le non-respect des normes de tension et, dans certains cas, si une forte surtension est présente pendant un temps trop long, généralement d'une centaine de millisecondes, ceci peut également entraîner la déconnexion de la production par l'action d'une protection de découplage pouvant être présente entre le réseau et le générateur d'énergie.

## 2.2.2 Impacts sur le système de transport

D'un autre côté, les principaux impacts qu'une grande quantité de connexion de la production d'énergie peut provoquer dans le système de transport, sont les suivants:

### 2.2.2.1 Risque de congestion

L'insertion des sources intermittentes est normalement localisée dans des zones où les conditions climatiques sont plus appropriées. Ceci provoque le besoin d'un renforcement local du réseau vu les possibilités de congestions locales.

### 2.2.2.2 Incertitude du système électrique

L'intermittence des sources d'énergie provoque une incertitude dans le système en terme de quantité d'énergie générée et de la localisation de l'injection: le réseau électrique doit être prêt à accueillir un nombre important de producteurs d'énergie sans connaître a priori ni la position, ni la puissance qu'ils vont débiter.

### 2.2.2.3 Changement des marges d'exploitation

Le changement des marges d'exploitation comme conséquence du besoin d'un système de suivi non seulement de la charge mais aussi de l'intermittence des sources.

### 2.2.2.4 Apparition des flux d'énergie réactive

L'apparition des flux d'énergie réactive inattendus dans le système de transport lorsque le flux de puissance active est inférieur à la puissance naturelle de la ligne.

#### 2.2.2.5 Fermeture des grandes centrales

La fermeture ou le non remplacement des grandes centrales à cause des raisons économiques et environnementales.

#### 2.2.2.6 Perte de la production d'énergie

La perte de la production d'énergie par des conditions climatiques rudes, soit la déconnexion des éoliennes par vents excessivement forts ( $> 25$  m/s *onshore* ou  $34$  m/s *offshore*).

### 2.3 Conclusions

Nous avons étudié l'impact de l'insertion des générateurs dans les réseaux de distribution. En fait, le réseau électrique existant, de par son architecture et sa conception, n'est pas adapté pour un accueil significatif de ces productions d'énergie. Ainsi, le fait de produire une quantité de puissance localement sur un réseau crée des problèmes de tension au point de connexion (élévations de tension). Cette surtension s'étend aux nœuds voisins et peut, selon les niveaux de charge du réseau, devenir critique. D'ailleurs, la connexion de producteurs d'énergie peut induire une inversion du flux de puissance sur le réseau. Ils deviennent donc bidirectionnels. Ceci fait donc apparaître des problèmes d'incompatibilité entre la situation actuelle du réseau et la présence de générateurs d'énergie sur celui-ci.

Donc, il apparaît nécessaire de penser à des solutions de réglage de tension et de puissance afin de solutionner cette problématique de surtension.

Le chapitre suivant élabore les modèles mathématiques utilisés pour la modélisation des producteurs d'énergie étudiés soient: PV connecté au réseau via un onduleur et un générateur d'énergie de type éolien raccordé au réseau via une génératrice synchrone.

De plus, un schéma simplifié d'un contrôle typique pour chaque générateur sera illustré et expliqué.

## CHAPITRE 3

### MODÉLISATION DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

#### 3.1 Introduction

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 1, il existe plusieurs moyens de productions d'énergie raccordés au réseau de distribution. Ils peuvent être non seulement distingués par leur source primaire (par exemple: les carburants fossiles traditionnels comme diesel, gaz naturel ou hydrogène ou les ressources en énergie renouvelable comme le soleil, le vent, etc.), mais aussi par leur méthode de raccordement au réseau.

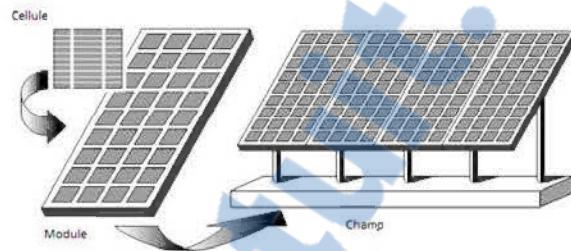
Cependant, ce chapitre élabore les modèles mathématiques ainsi que la configuration électrique typique de deux types de producteurs d'énergie étudiés, soient: panneau solaire et éolienne. De plus, la modélisation (Matlab® / Simulink®) de leur contrôle typique sera présentée et expliquée.

#### 3.2 Générateur d'énergie de type panneau solaire (PV)

Ces dernières années, les systèmes photovoltaïques ont connu un réel accroissement. L'extension importante de ce type de production est encore limitée à cause du coût élevé de ces installations.

En fait, l'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium.

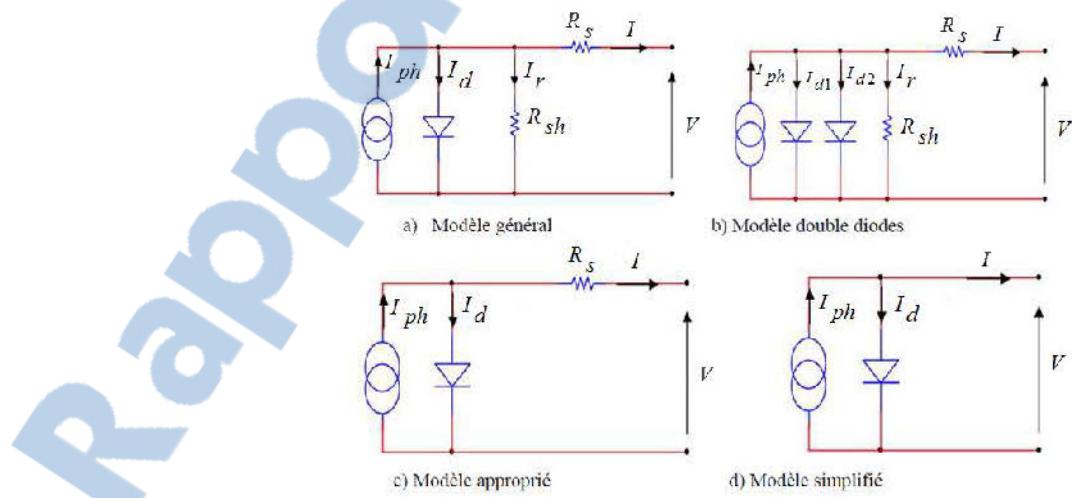
Ainsi, pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées en série/parallèle pour constituer les modules, lesquels forment un panneau solaire. En fonction de la puissance désirée, plusieurs panneaux peuvent être assemblés pour constituer un « champ photovoltaïque » comme illustré à la figure 28.



**Figure 28** : Cellule, module (panneaux) et champ photovoltaïque

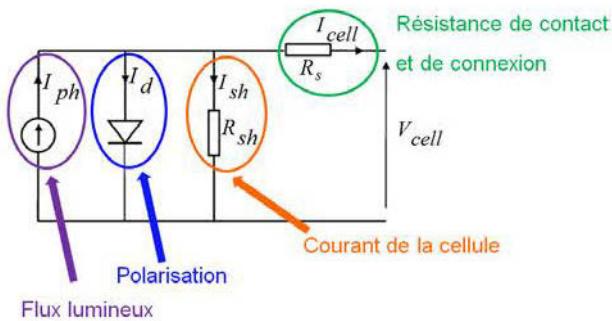
### 3.2.1 Modèle mathématique

Il existe plusieurs modèles pour une cellule photovoltaïque. Chaque modèle donnera les différents types d'équations mathématiques selon les composants du circuit électrique. La figure 29 présente quatre types de modèles cellulaires PV.



**Figure 29** : Différents schémas équivalents d'une cellule PV

Cependant, le plus couramment utilisé est le modèle général a) présenté par le circuit illustré à la figure 30. Le générateur de courant modélise le flux lumineux, la diode représente les phénomènes de polarisation et les deux résistances (série et shunt) représentent respectivement la résistance de contact et de connexion et le courant de fuite au niveau de la jonction PN de la cellule.



**Figure 30 :** Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

Le courant  $I_{cell}$  fourni par la cellule PV est exprimé par l'équation suivante:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.1)$$

$I_{ph}$  est le courant produit par les cellules qui dépend linéairement de l'irradiation solaire. Il est aussi sous l'influence de la température [22] et [28], il est exprimé comme suit:

$$I_{ph} = I_{cc} * \frac{G}{G_r} [1 + k_t(T^\circ - T_c)] \quad (3.2)$$

avec:

$I_{cc}$  : courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards (A);

$G$  : éclairement (irradiance) en  $\text{W/m}^2$ ;

$G_r$  : irradiance de référence (vaut  $1000\text{W/m}^2$ );

$k_t$  : coefficient de température en  $\text{A/K}$ ;

$T^\circ$  : température de la cellule en K;

$T_c$  : température de la fonction ( $T_c = 25^\circ\text{C} = 298.55\text{ K}$ ).

$I_d$  est le courant de la diode, il est exprimé comme suit:

$$I_d = I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{A \cdot V_T}\right) \right] \quad (3.3)$$

avec :  $V_T = \frac{k \cdot T_p}{q}$

où :

$V_{cell}$  : tension de la cellule PV;

$A$  : facteur de qualité de la diode ( $A=2$  pour une diode idéale);

$V_T$  : potentiel thermodynamique;

$k$  : constante de Boltzmann ( $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ );

$q$  : charge de l'électron ( $q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ );

$T_p$  : température de la cellule en Kelvin (K);

Le courant  $I_{cell}$  fourni par la cellule PV peut alors s'écrire sous la forme suivante:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(q \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{A \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.4)$$

Pour le modèle approprié l'expression du courant  $I_{cell}$  est:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(q \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{A \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Alors, la puissance délivrée par la cellule est exprimée par la formule suivante:

$$P_{cell} = (V_{cell} \cdot I_{ph}) - (V_{cell} \cdot I_{sat}) \left[ \exp\left(q \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{A \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right] - V_{cell} \cdot \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.6)$$

avec:  $I_{sat}$  : courant de saturation de la diode;

### 3.2.2 Association des générateurs photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques watt crête et quelques dizaines de watt crête, 1 m<sup>2</sup> de cellules produit environ 100W. En fait, l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série: leurs tensions s'ajoutent tandis qu'en parallèle: leurs courants s'ajoutent.

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïques, le regroupement des cellules photovoltaïques en série et en parallèle est nécessaire pour obtenir un générateur mixte équivalent. L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série  $N_s$  cellules et  $N_p$  parallèle est la suivante [28]:

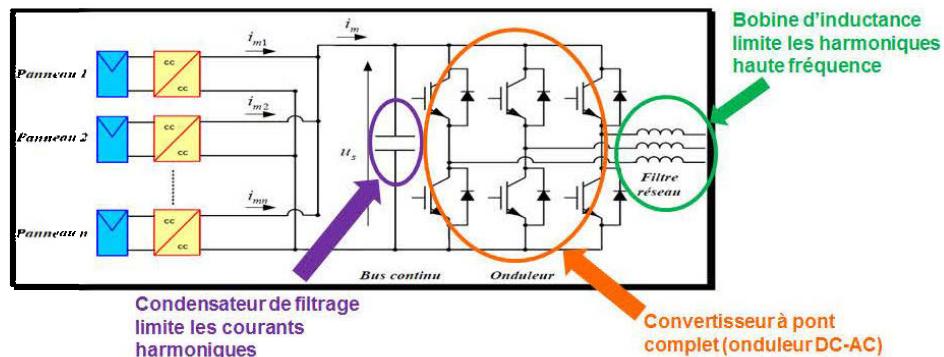
$$I_{cell} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{kATc} \right) - 1 \right] - \left( \frac{N_p V_{cell} + N_s I_{cell} R_s}{N_s R_{sh}} \right) \quad (3.7)$$

La courbe de puissance d'un groupement en série/parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire. Ainsi, tous les paramètres de celle-ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certaines conditions doivent être respectées. Il faut:

- S'assurer que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit.
- Connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

### 3.2.3 Configuration et raccordement dans le réseau électrique

Il existe plusieurs configurations de connexion des PV dans le réseau électrique (voir Annexe C). Cependant, la figure 31 illustre la configuration typique d'un panneau solaire raccordé au réseau. Cette configuration a été utilisée pour les travaux réalisés dans ce mémoire. Nous avons plusieurs panneaux en série raccordés à un condensateur de filtrage pour limiter les courants harmoniques dans le réseau. La sortie du condensateur est connectée à un convertisseur à pont complet continu-alternatif afin de produire de grandes quantités d'électricité (onduleur DC-AC). Le convertisseur est relié à une bobine d'inductance afin de limiter les harmoniques à haute fréquence injectées dans le système.



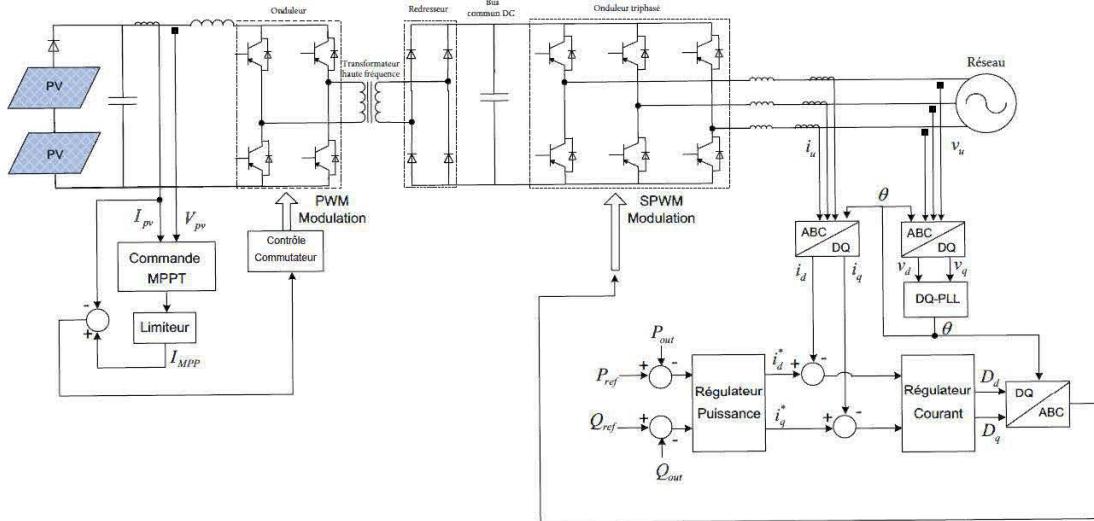
**Figure 31 :** Configuration typique d'un panneau solaire raccordé au réseau

En fait, l'onduleur réalise de nombreuses fonctions. Il convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) pour l'utilisation par le consommateur. Il contient également les fonctions de protection qui surveillent les connexions au réseau et la source de PV. L'onduleur peut aussi isoler le générateur photovoltaïque en cas de problèmes de réseau qui se produisent.

### 3.2.4 Contrôle de la tension, du courant et de la puissance des générateurs PV

En général, la commande MPPT et l'amplification de la tension sont contrôlés au moyen d'un convertisseur (DC-DC). Le contrôle de flux de puissance et le facteur de puissance du courant sinusoïdal injecté dans le réseau électrique sont contrôlés par un onduleur (DC-AC). La figure 32 représente un schéma de principe simplifié du contrôle d'un générateur PV au moyen de l'électronique de puissance [24] et [27].

Le modèle est composé d'un convertisseur continu-continu (DC-DC) et un onduleur triphasé. Le convertisseur (DC-DC) est basé sur un pont complet de source de courant relié à un onduleur et à un transformateur à haute fréquence. Le pont complet de source du courant évite d'utiliser un condensateur de filtrage en parallèle avec les modules PV. Comme cet onduleur comprend une isolation galvanique entre les modules PV et le réseau, ces générateurs peuvent être facilement connectés à la mise à la terre.



**Figure 32 :** Schéma simplifié d'un contrôle typique d'un générateur PV raccordé au réseau

Les diodes incluses dans les redresseurs produisent des courants à commutation, ce qui permet une faible récupération inverse des diodes et une faible contrainte de tension.

Comme présenté sur le schéma de la figure 32, la tension de la série des PV est convertie en tension alternative à haute fréquence (AC). Ainsi, l'isolation galvanique avec l'amplification de la tension sont réalisées au moyen d'un transformateur à haute fréquence. La tension au secondaire du transformateur est alors redressée en utilisant un convertisseur à pont complet de diodes. Le courant continu redressé (DC) est ensuite converti en courant alternatif (AC) avant d'être connecté au réseau à l'aide d'une tension de source onduleur triphasé.

Le contrôle illustré à la figure 32 est réalisé en mesurant la tension et le courant des modules PV. Cependant, la puissance de sortie du générateur photovoltaïque est calculée et comparée à la puissance de référence du producteur d'énergie.

En fonction du résultat obtenu de la comparaison, le rapport cyclique est changé pour contrôler le courant d'entrée de l'onduleur à source de courant, en conséquence. Ce processus est répété jusqu'à ce que le point de puissance maximale soit atteint. D'autres types de contrôleurs MPPT peuvent également être développés dans le même cadre de contrôleur. D'ailleurs, des contrôleurs supplémentaires peuvent être ajoutés pour contrôler l'amplitude de la tension alternative à haute fréquence au primaire du transformateur.

En fait, la figure 32 illustre deux modes de contrôle de base pour les onduleurs raccordés au réseau électrique: contrôle constant du courant et contrôle constant de la puissance. Alors, le schéma montre deux régulateurs: un pour la puissance et un autre pour le courant.

Dans certains cas, la consigne de la puissance réactive ( $Q_{ref}$ ), pourrait être une référence de facteur de puissance. En contrôlant cette référence, le courant injecté dans le réseau peut être maintenu à l'unité de facteur de puissance. De plus, une variation de la constante de commande de puissance peut être ajoutée pour maintenir la tension du convertisseur continu (bus DC) à une valeur constante. Dans ce cas, la puissance active  $P_{ref}$  peut être remplacée par  $V_{dref}$  et  $P_{out}$  peut être remplacé par  $V_{dout}$ . La tension continue (DC) est donc régulée à la valeur de consigne  $V_{dref}$ .

La sortie de la boucle de commande (régulateur de puissance) représente la valeur de consigne  $I_d$ , qui est utilisée comme signal de référence pour le régulateur de courant. Ainsi, lorsque la tension du bus continu (DC) augmente, la puissance de la source au primaire augmente aussi.

Afin de maintenir la tension du bus continu (DC), la valeur de consigne  $I_d$  est augmentée de sorte que la puissance peut être transférée à la sortie de l'onduleur.

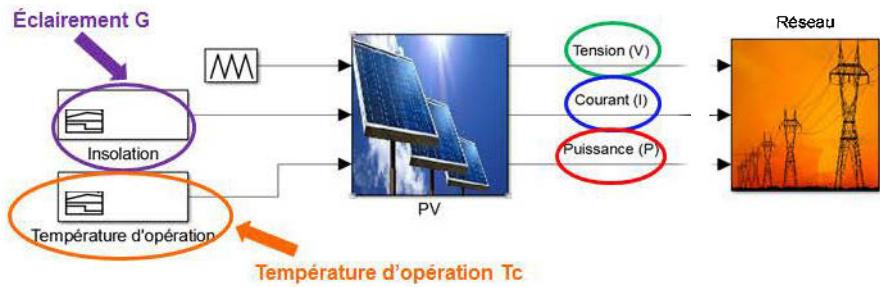
### 3.2.5 Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans Matlab®/Simulink®

La cellule du PV peut être représentée par des modèles ayant des niveaux de complexité différents selon le besoin du client. Le modèle peut être statique ou dynamique, numérique ou semi-analogique (ou analytique). Dans le cadre de ce mémoire, nous allons aborder seulement le modèle semi-analytique de type circuit électrique (modèle dynamique).

#### 3.2.5.1 Modèle semi-analytique de type circuit électrique

L'analyse des équations du modèle mathématique et des courbes permet de constater qu'il existe des paramètres intrinsèques (liés à la constitution interne de la cellule) et des paramètres extrinsèques (conditions météorologiques), pour le fonctionnement de

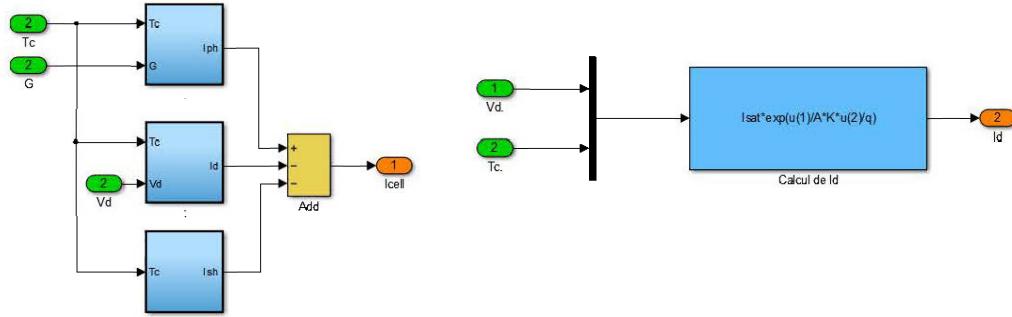
la cellule photovoltaïque. Pour une cellule donnée, la puissance délivrée (grandeur de sortie), qui est le produit de la tension par le courant, dépend de la température et de l'éclairement (grandeurs d'entrée). Donc, le modèle développé à l'aide de la plate-forme Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> sera constitué de blocs avec comme entrées la température  $T_c$  et l'éclairement  $G$  et comme sorties, la puissance  $P$ , la tension  $V$  et le courant  $I$ . Suivant le nombre de modules et leurs couplages (série/parallèle), on aura des blocs « gains » pour constituer les panneaux photovoltaïques comme illustré à la figure 33.



**Figure 33 :** Modélisation d'un générateur PV sous Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>

La figure 33 montre que le module du générateur photovoltaïque peut être considéré comme une source de courant ou une source de tension contrôlée. Le générateur peut alors être modélisé par un circuit électrique dont la résolution numérique des équations analytiques permet d'accéder aux grandeurs  $P$ ,  $I$  et  $V$  du générateur.

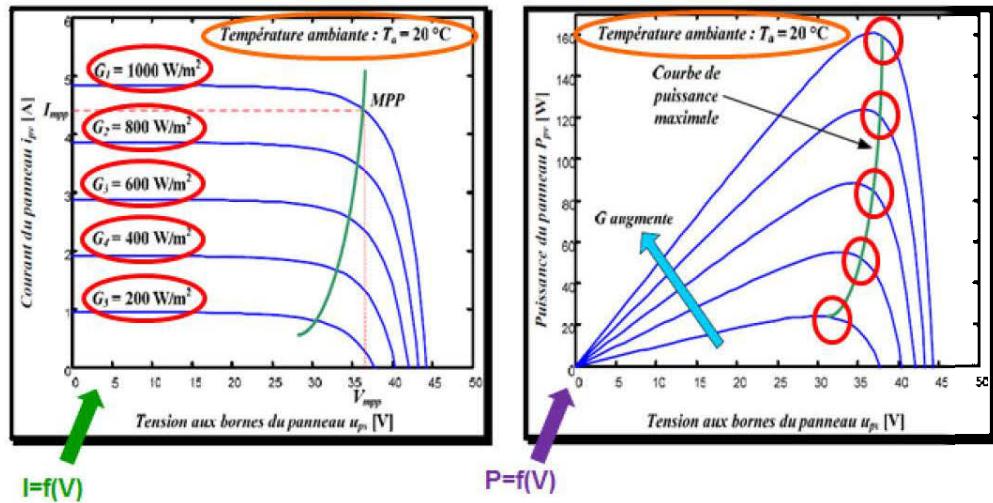
Le modèle est composé d'un bloc ayant comme entrées la température et l'irradiation. Les équations présentées précédemment (équ. 3.3, 3.5 et 3.6) permettent de générer le courant et la tension comme illustré à la figure 34.



**Figure 34 :** Sous blocs du modèle SimPowerSystem®

### 3.2.6 Caractéristiques statiques du panneau

Les équations (3.5) et (3.6) permettent d'obtenir les courbes caractéristiques d'un panneau photovoltaïque  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ . La figure 35 illustre quelques caractéristiques statiques d'un panneau, tracées à l'aide de la plate-forme Matlab®/ Simulink® pour différentes valeurs d'éclairement, pour une valeur constante de la température ambiante ( $T_a = 20^\circ\text{C}$ ).



**Figure 35 :** Caractéristiques statiques du panneau pour une variation de l'éclairement

Comme illustré à la figure 35, pour la grande partie de la caractéristique, la cellule se comporte comme une source de courant. Par ailleurs, il existe toujours un point de puissance maximale pour chaque niveau d'éclairement. Cependant, la tension et la puissance de la cellule dépendent du niveau d'éclairement et de la température. La figure 36 présente les mêmes caractéristiques statiques, tracées, cette fois-ci, pour différentes valeurs de température ambiante. On constate que la valeur de l'éclairement reste constante ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ).

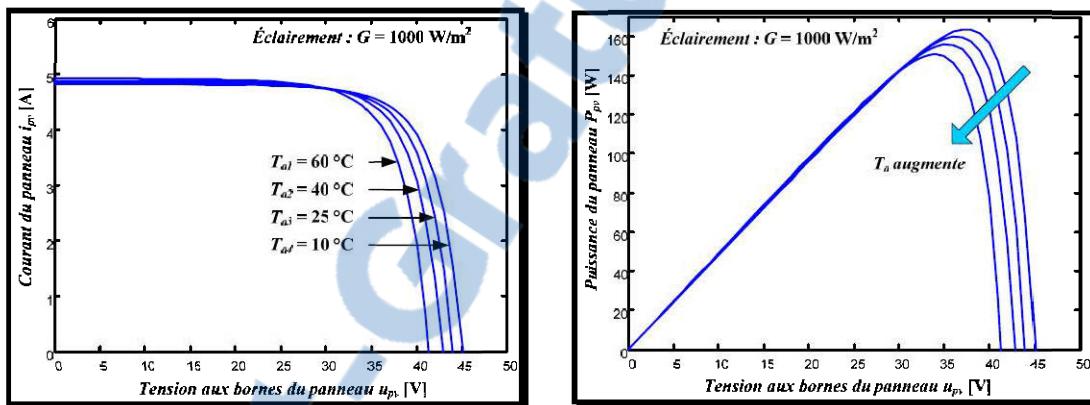


Figure 36 : Caractéristiques statiques du panneau pour une variation de température ambiante

### 3.3 Générateur d'énergie de type éolien

Afin de convertir l'énergie cinétique fournie par le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être constituées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. Cependant, la partie mécanique permet de transformer l'énergie cinétique disponible dans le vent en énergie mécanique rotative grâce à la rotation du rotor du générateur. Cette énergie est transmise, par la suite, à l'aide d'un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique.

### 3.3.1 Différents types d'aérogénérateurs

Deux grandes classes de turbines éoliennes existent dans l'industrie, soient: les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical.

#### 3.3.1.1 Éoliennes à axe horizontal

Elles sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de la turbine (moyeu et pâles) et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal comme illustré à la figure 37.

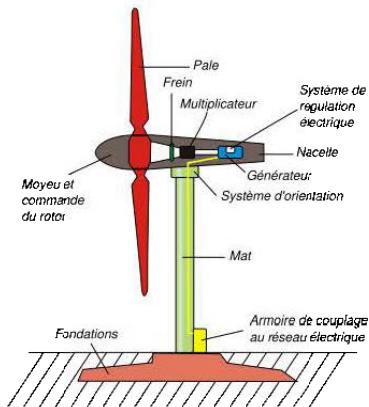
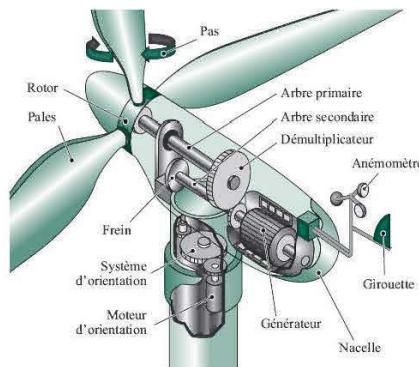


Figure 37 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal

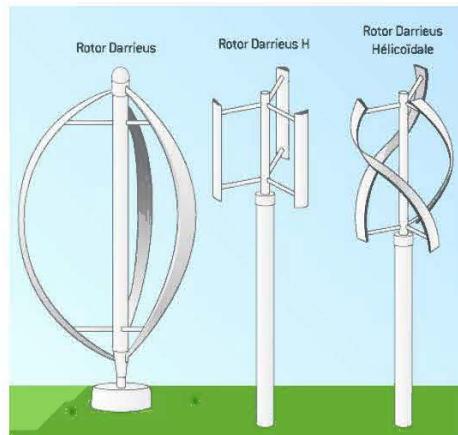
La nacelle contient l'ensemble du dispositif de transmission du mouvement et de transformation de l'énergie mécanique issue de la rotation de l'axe du rotor de la génératrice comme présenté à la figure 38.



**Figure 38 :** Vue intérieure d'une nacelle d'un générateur d'énergie de type éolien

### 3.3.1.2 Éoliennes à axe vertical

Trois principaux modèles existent sur le marché, soient: le rotor de « *Darrieus* » classique, le rotor de « *Darrieus* » en forme de H et le rotor de « *Darrieus* » en forme hélicoïdale, comme illustré à la figure 39.



**Figure 39 :** Éoliennes à axe vertical

Pour ce type d'éolienne l'axe de rotation du rotor est perpendiculaire au sol. Ceci permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol comme illustré à la figure 40.

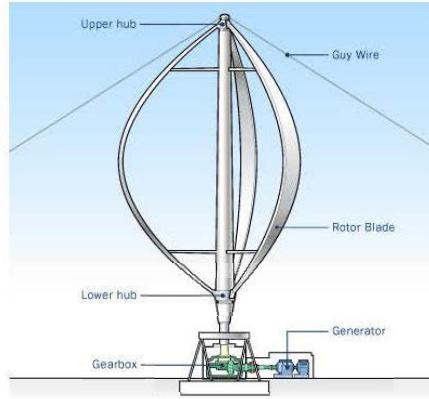


Figure 40 : Éolienne à axe vertical « *Darrieus* »

### 3.3.2 Modèle mathématique

#### 3.3.2.1 Puissance récupérable par une éolienne

L'aérodynamique d'une turbine éolienne est représentée par l'interaction entre le vent et le rotor de l'éolienne. Cette caractéristique aérodynamique est décrite par la théorie du disque [19] comme illustré à la figure 41.

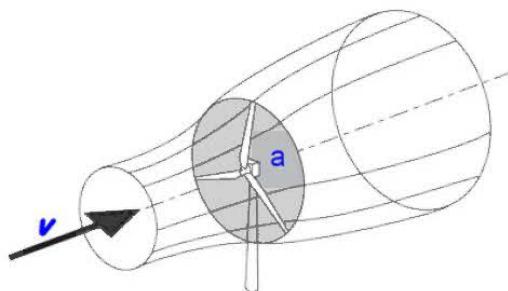


Figure 41 : Illustration de la théorie du disque

Cette théorie permet de déterminer la grandeur de la puissance disponible dans le vent ( $P_v$ ) pour un certain disque balayé par le rotor (surface  $a$ ). La théorie décrit aussi comment lier cette puissance disponible à la puissance extraite par le rotor lui-même

$(P_t)$ . La puissance instantanée fournie ( $P_v$ ) peut être déterminée par la formule suivante [28]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho a v^3 \quad (3.8)$$

avec :

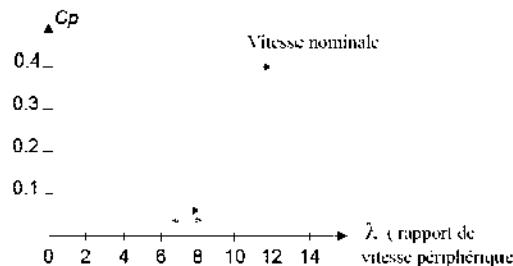
$\rho$  : densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  : vitesse du vent ( $\text{m/s}$ );

$a$  : surface balayée par le rotor (pâles) ( $\text{m}^2$ ).

Or, le coefficient de puissance est défini par la formule suivante:

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (3.9)$$



**Figure 42 :** Coefficient de puissance des turbines à vent rapide

Comme illustré à la figure 42, la valeur du coefficient de puissance ( $C_p$ ) dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique ( $\lambda$ ) par:

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (3.10)$$

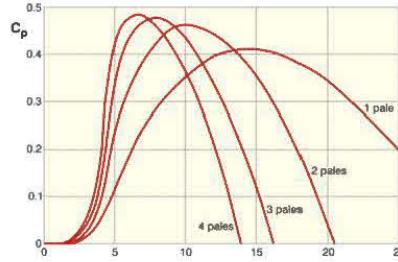
avec:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (3.11)$$

où:

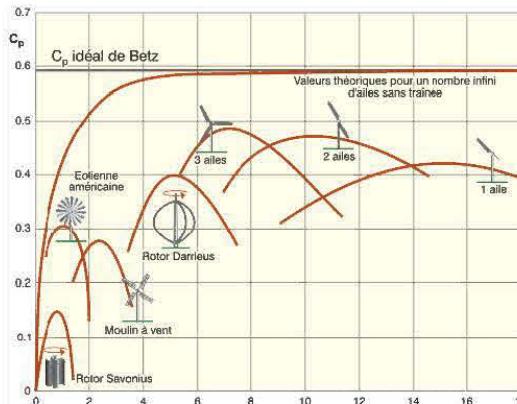
$R\Omega$  : La vitesse linéaire périphérique en bout de pale.

La figure 43 présente l'évolution du coefficient de puissance ( $C_p$ ) mesuré pour des turbines à axe horizontal à 1, 2, ou 4 pales [24] et [47]. On constate que plus le nombre de pales est important, plus le rapport optimal de vitesse en bout de pale est faible.



**Figure 43 :** Évolution du rendement aérodynamique en fonction de  $C_p(\lambda)$  et du nombre de pale

La figure 44 représente les différentes courbes caractéristiques de rendement aérodynamique pour chaque grand modèle d'éolienne. En général, on constate que les éoliennes basées sur la portance (axe horizontal ou à axe vertical de type Darrieus) ont un rendement aérodynamique supérieur aux éoliennes basées sur la traînée (rotor Savonius). D'ailleurs, si la vitesse de rotation diminue, il faut un couple aérodynamique plus important pour une même puissance mécanique.



**Figure 44 :** Évolution typique du rendement aérodynamique en fonction de  $C_p(\lambda)$  et du modèle d'éolienne

Donc, on déduit l'expression de la puissance extraite par le rotor [28]:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \quad (3.12)$$

avec:

$r$  : Le rayon du rotor de la turbine à vent (m);

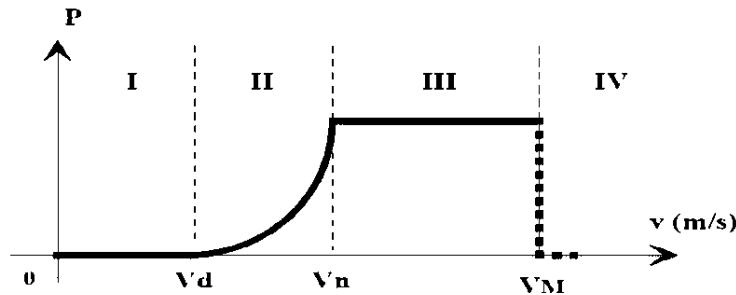
Alors, le couple exercé par le vent sur la turbine (ou le couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par:

$$T_m = \frac{P_t}{\Omega} \quad (3.13)$$

avec:  $\Omega$  est la vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine (rad/s).

### 3.3.2.2 Régulation de la puissance d'une éolienne

La génératrice éolienne est généralement caractérisée à l'aide d'une courbe de puissance. La puissance électrique récupérée par l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [45]. La puissance varie en fonction de la vitesse selon l'allure de la figure 45.



**Figure 45 :** Puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse

avec:

- $V_d$  : la vitesse de démarrage (normalement de 3 à 4 m/s) à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie;
- $V_n$  : vitesse nominale de l'éolienne;
- $V_M$  : vitesse maximale du vent (normalement autour de 25 m/s), au-delà de laquelle la turbine est arrêtée pour des raisons de sécurité. Plus la vitesse du vent est élevée, plus la production électrique est élevée. Cette relation est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Les vitesses  $V_d$ ,  $V_n$ ,  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance en fonction de la vitesse du vent:

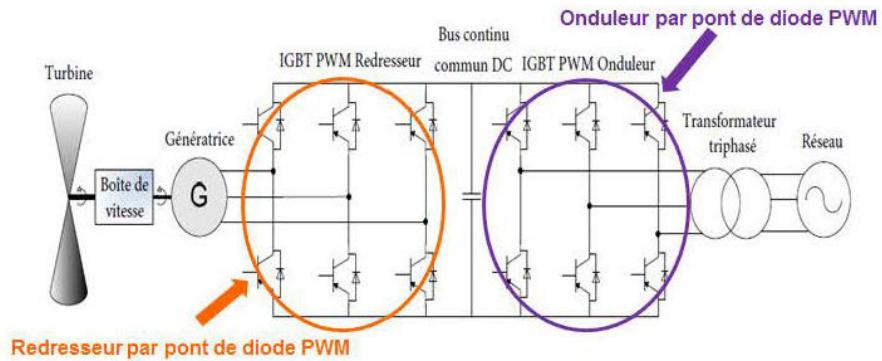
- la zone I ( $0 \leq v \leq V_d$ ):  $P = 0$  (la turbine ne produit pas d'énergie électrique);
- la zone II ( $V_d \leq v \leq V_n$ ): la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent;
- la zone III ( $V_n \leq v \leq V_M$ ): la vitesse de rotation est maintenue constante, la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ ;
- la zone IV ( $v \geq V_M$ ): on a dépassé la vitesse maximale; l'éolienne est freinée pour des raisons de sécurité.

### 3.3.3 Configuration et raccordement dans le réseau électrique

La configuration des éoliennes détermine leur capacité de régulation en vitesse et en puissance. La nature de leur partie électrique et de leur connexion au réseau définit si l'éolienne est à vitesse fixe ou à vitesse variable. Quant au rotor, sa nature détermine la méthode de régulation de la puissance, soit le décrochage aérodynamique passif, le décrochage aérodynamique actif et le calage variable des pales.

Il existe plusieurs configurations de connexion des éoliennes dans le réseau électrique (voir Annexe D). Cependant, la figure 46 illustre la configuration typique d'un

générateur de type éolien raccordé au réseau. Cette configuration a été utilisée pour les travaux réalisés dans ce mémoire. Elle est composée d'un convertisseur de puissance dos-à-dos (redresseur/onduleur) qui fournit le meilleur contrôle du flux de l'énergie ainsi que le meilleur rendement. Le redresseur par pont de diode PWM rectifie la variation de la tension et de la fréquence du générateur éolien. Il fournit une excitation à l'induction du générateur. La configuration de l'onduleur est identique à celle du redresseur. Il fournit également la puissance générée pour le réseau électrique.



**Figure 46 :** Configuration typique dos-à-dos (redresseur/onduleur) d'un générateur éolien connecté au réseau via un transformateur triphasé

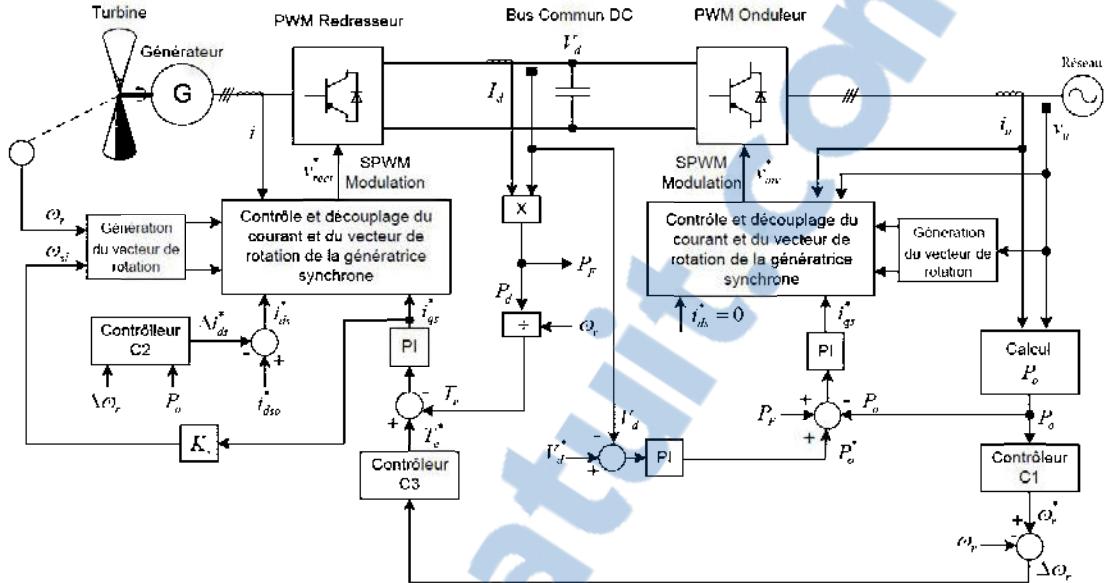
Cette configuration générale est adaptée à tous types de systèmes d'énergie éolienne. Basé sur la conception de commande pour le système de convertisseur dos-à-dos PWM, divers avantages peuvent être obtenus de ce raccordement électrique tels que:

- le facteur de puissance côté ligne est uniforme sans injection de courant harmonique (conforme à IEEE 519, 1992) [7];
- le courant de sortie du générateur de vent est sinusoïdal;
- il n'y a pas de pertes de cuivre harmoniques;
- le redresseur peut générer l'excitation programmable pour le système à base de générateur à induction;

- la production d'énergie continue à partir de zéro jusqu'à la vitesse maximale de la turbine;
- la puissance peut circuler dans les deux sens, permettant donc au générateur de fonctionner comme un moteur pour le démarrage (requis pour la turbine verticale). De même, le freinage récupératif peut arrêter rapidement la turbine;
- l'opération d'îlotage du système est possible avec un condensateur de démarrage de charge de la batterie.

### 3.3.4 Contrôle de la tension, du courant et de la puissance des générateurs éoliens

Pour comprendre l'importance du système de double convertisseur PWM à la base de l'électronique de puissance pour les applications de l'énergie éolienne, une approche de contrôle spécialisée basée sur un générateur à induction à cage d'écureuil doit être analysée. La figure 47 montre le schéma-bloc de contrôle d'un générateur à induction avec un système d'énergie de double convertisseur PWM alimenté par le vent qui utilise le circuit électrique représenté à la figure 46. En fait, le générateur d'induction absorbe le courant réactif retardé, mais le courant réactif est toujours nul du côté de la ligne; autrement dit, le facteur de puissance de la ligne est unitaire. Le redresseur utilise le contrôle indirect du vecteur dans la boucle interne du contrôle de courant, alors que la méthode de contrôle direct du vecteur est utilisée pour le régulateur de courant de l'onduleur.



**Figure 47 :** Schéma d'un contrôle typique d'un double convertisseur PWM avec un générateur à induction

Le contrôle du vecteur accélère la réponse transitoire du système. Des contrôles intelligents, comme un contrôle de vecteur à base de logique floue, peuvent être utilisés pour améliorer trois caractéristiques importantes de ce système:

- la recherche adaptative de la meilleure commande la plus rapide du générateur afin de suivre la puissance extractible maximale du vent (par contrôleur C1) ;
- l'amélioration de l'efficacité du générateur en réduisant le flux rotorique du générateur lorsque la vitesse optimale du générateur est atteinte dans le régime permanent (par le contrôleur C2) ;
- le contrôle robuste de la boucle de vitesse afin de supporter les résonances d'arbre possibles dues à des rafales de vent et des tourbillons (par contrôleur C3).

Pour une vitesse de vent particulière ( $V_w$ ), il y a un réglage optimal de la vitesse du générateur ( $\omega_r^*$ ). La boucle de contrôle de la vitesse génère la composante de couple du générateur de courant à induction en équilibrant le couple développé par le couple

de charge. La variation de la tension et de la fréquence du générateur de super-synchrone à induction est redressée et pompée vers le circuit intermédiaire. Le régulateur de tension (DC) contrôle la puissance de ligne  $P_o$  (par exemple, la ligne de courant active) de sorte que la tension de la liaison reste toujours constante. Un signal de courant à action directe à partir de la sortie du générateur d'induction vers la boucle de tension continue (DC) empêche la fluctuation transitoire de la tension du circuit. Avec le bus commun de la tension fixe (DC), le générateur d'induction peut être excité par  $i_{ds}$ , comme le flux nominal est établi dans le générateur d'induction. Ensuite, une référence de vitesse est commandée pour faire tourner la turbine à une vitesse minimale requise pour absorber le vent.

Le contrôleur C3 fonctionne toujours. Le flux de vent impose un couple régénérateur dans le générateur d'induction. La production d'électricité n'est pas encore optimale, mais la fréquence de glissement devient négative et la puissance commence à couler de la turbine vers le côté de la ligne. Comme la puissance commence à couler vers le côté de la ligne, le circuit intermédiaire de la boucle de contrôle de tension peut être commandé graduellement à une valeur supérieure à la valeur de crête de la tension côté ligne (en général, 75 % de plus). Après, la tension DC-lien est établie à sa nouvelle valeur plus élevée, le système est prêt à être contrôlé par des contrôleurs C1 et C2.

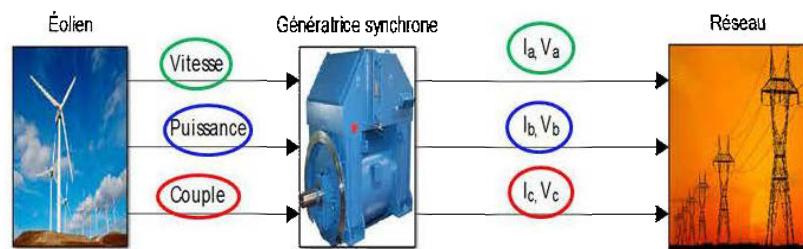
Le redresseur par pont IGBT-PWM qui fournit le courant retardé d'excitation au générateur d'induction redresse également la variation de la tension et de la fréquence générée par le générateur à induction. La puissance est inversée à 60 Hz et la tension fixe (AC) est introduite dans le réseau de distribution à l'unité du facteur de puissance à travers un inverseur IGBT-PWM.

La vitesse de la génératrice est contrôlée par le contrôle indirect du vecteur, avec un contrôle de courant et du couple de la génératrice synchrone dans les boucles internes. Le flux de générateur à induction est contrôlé dans une boucle ouverte par le

contrôle du courant  $i_{ds}$ , mais sous des conditions normales, le flux de rotor est réglé à la valeur nominale pour une réponse transitoire rapide. Le convertisseur côté ligne est également contrôlé en utilisant un contrôle direct du vecteur ainsi que le contrôle du courant de la génératrice synchrone dans les boucles internes. La puissance de sortie  $P_o$  est commandée pour contrôler la tension continue (DC)  $V_d$ . L'augmentation de  $P_o$  génère une diminution de  $V_d$ .

### 3.3.5 Modélisation du générateur éolien dans Matlab®/Simulink®

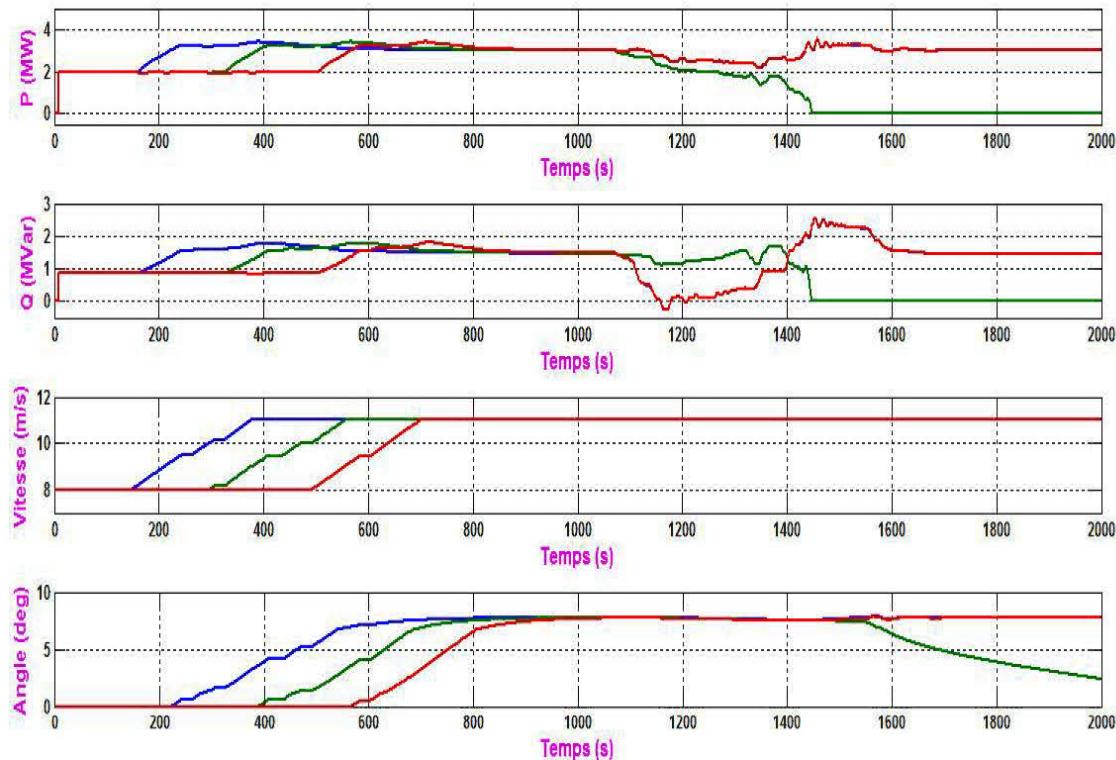
Cette section présente l'implémentation des modèles mathématiques du générateur d'énergie de type éolien dans Matlab® / Simulink®. La figure 48 représente le modèle global modélisé de l'éolienne connectée au réseau.



**Figure 48 :** Modèle Simulink® d'un générateur éolien raccordé au réseau via une génératrice synchrone

La figure 49 montre les résultats de simulation du modèle de la figure 48. On observe que la puissance active générée commence à augmenter en douceur (avec la vitesse du vent) pour atteindre sa valeur nominale de 3 MW dans environ 8 min. Au cours de ce laps de temps, la vitesse de la turbine passe de 1,0028 à 1,0047 pu. Dans un premier temps, l'angle de pas des pales de la turbine est de 0°. Lorsque la puissance de sortie supérieure à 3 MW, l'angle d'inclinaison est passée de 0° à 8° afin d'apporter

la puissance de sortie à sa valeur nominale. On constate aussi que la puissance réactive (Q) absorbée augmente avec la puissance active générée.



**Figure 49 :** Résultats de simulation du générateur éolien connecté au réseau via une génératrice synchrone

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques utilisés pour la modélisation de deux générateurs d'énergie étudiés ont été abordés, soient: PV et une éolienne. La configuration électrique typique de ces producteurs dans le réseau électrique a été élaborée ainsi que la modélisation (Matlab® / Simulink®) de leur contrôle typique a été présentée et expliquée.

Dans le chapitre suivant, nous allons :

- discuter des différentes méthodes existantes de réglage de tension.
- simuler deux méthodes de réglage de tension ( $P/Q$ ) et ( $P/V$ ) pour un producteur d'énergie de type panneau solaire, éolienne et un générateur de type combiné (PV- éolien).

## CHAPITRE 4

# RÉGLAGE DE TENSION EN PRÉSENCE DE PRODUCTEURS D'ÉNERGIE SUR LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

### 4.1 Introduction

Les installations de production, de transport et de distribution de l'électricité constituent un système très vaste et très complexe (non linéarité). De nombreux acteurs, des producteurs aux consommateurs qui passent par le réseau électrique, ont des effets variés sur ce système. Chacun de ces acteurs ou combinaison d'acteurs peut avoir des incidences favorables ou défavorables sur la qualité de l'énergie électrique, en termes de tension et de fréquence, ainsi que sur la sûreté des réseaux.

Pour assurer la sécurité et la qualité de fourniture de l'énergie électrique, les réseaux électriques sont soumis à de nombreuses contraintes de fonctionnement. Ces contraintes s'appliquent à tous les acteurs du système électrique, de la production à la consommation. Ces réseaux électriques ont la nécessité, en premier lieu, de maintenir en permanence l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie électrique, celle-ci ne pouvant pas être stockée en grande quantité. Cet équilibre s'établit naturellement dans une certaine mesure, mais au détriment de la stabilité en fréquence et en tension.

Alors, des systèmes de régulations complexes à trois niveaux (réglage primaire, secondaire et tertiaire) sont chargés d'assurer en permanence l'équilibre entre

consommation et production. Par contre, l'absence de régulation entraînerait l'apparition d'instabilités en fréquence et en tension.

Le maintien de la tension est une autre contrainte imposée au système électrique. Ce chapitre aborde l'importance de réglage de la fréquence, de la tension et de la puissance en présence de producteurs d'énergie dans le réseau électrique. Ensuite, les différents types de réglage de tension et de puissances existants sont présentés. Deux méthodes de réglage sont modifiés et simulées sur un réseau BT : i) réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ ) et ii) réglage de production en puissance active et en tension ( $P/V$ ).

## 4.2 Importance de réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électriques

La tension et la fréquence représentent les paramètres les plus importants pour la sûreté et la stabilité du système électrique. Le fournisseur d'électricité (Hydro-Québec) définit des normes d'exploitation des réseaux que les gestionnaires doivent appliquer. Ces normes permettent notamment d'assurer la sûreté du système électrique et la qualité de l'énergie délivrée [35], [37], [38] et [41].

### 4.2.1 Le maintien de la tension

Les gestionnaires ont donc mis en place sur leurs réseaux des systèmes de réglage de tension qui leur permettent de respecter ces normes et, donc, d'améliorer la qualité et la sûreté sur les réseaux, mais aussi de les exploiter dans des conditions optimales.

Tous les utilisateurs du réseau sont sensibles aux variations de tension. Le distributeur (Hydro-Québec) s'engage quant à la qualité de l'énergie qu'il transporte et, donc, de l'onde de tension. Le respect d'une plage de variation maximale autour d'une tension d'alimentation nominale est en effet primordial pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs des consommateurs. Pour les producteurs, là aussi, le maintien de la tension dans une plage fixée est essentiel afin d'éviter que les protections de découplage de leurs groupes de production ne se déclenchent et, par une réaction en cascade, n'affaiblissent la sûreté globale du système électrique.

Le maintien de la tension est donc un des aspects fondamentaux de l'exploitation des réseaux de transport et de distribution. En effet, les limites de tension ne doivent pas être dépassées pour les raisons suivantes:

- Les limites supérieures de tension sont imposées pour tous les niveaux d'exploitation par le maintien diélectrique des matériaux, ainsi que par les limites de saturation des transformateurs. En ce qui concerne les réseaux de distribution, la tension est aussi limitée, car une tension trop élevée peut réduire la durée de vie d'appareils utilisateurs (ou entraîne un vieillissement et un endommagement du matériel connecté).
- Les limites inférieures de tension sont imposées au niveau des réseaux électriques par le fonctionnement correct des appareils industriels ou domestiques. Au niveau des réseaux de transport, les limites inférieures de tension sont liées à la sécurité du système électrique dans son ensemble. Cependant, une tension trop basse aura les conséquences suivantes:
  - surcharge des éléments de transport (lignes et transformateurs) par augmentation du courant et risque de déclenchement (ou perturbation) des protections associées;
  - instabilité de tension pouvant entraîner un écroulement de tension;

- perte des éléments de production (stabilité statique des alternateurs, limites de fonctionnement des groupes et de leurs auxiliaires).

#### 4.2.2 Le maintien de la fréquence

De même que pour la tension, la fréquence doit nécessairement être maintenue dans les limites contractuelles. Les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants:

- rupture de synchronisme des alternateurs pouvant entraîner la perte de groupes en cascade;
- limite de fonctionnement des auxiliaires de centrales;
- en cas de baisse de fréquence: saturation des circuits magnétiques de transformateurs ou compensateurs bobines d'énergie réactive entraînant un fonctionnement dégradé et des pertes fer.

#### 4.3 Différents types de réglage de tension et de puissance

Comme discuté dans la section précédente, le réglage des générateurs d'énergie permet le maintien en tension des réseaux en limitant les effets de surtensions, tout en favorisant leurs connexion sur le réseau de distribution. Grâce à un contrôle intelligent et optimal des producteurs d'énergie, les capacités d'insertion de ceux-ci dans un réseau pourront être mieux utilisées qu'en produisant uniquement une puissance nominale sans réflexion sur l'impact général de celles-ci sur tout le départ.

Cependant, il existe plusieurs types de contrôle de tension et de puissance pour les producteurs d'énergie.

### 4.3.1 Types de réglage de tension pour les générateurs de type machine synchrone

Pour les producteurs d'énergie de type machine tournante (machine synchrone), il existe trois types de régulation:

- régulation automatique de tension (*AVR*);
- régulation du facteur de puissance (*PF*);
- régulation de la puissance réactive (*VAR*).

#### 4.3.1.1 Régulateur automatique de tension « *Automatic Voltage Regulator (AVR)* »

Le régulateur automatique de tension « *Automatic Voltage Regulator (AVR)* » est défini comme un dispositif destiné à faire varier ou à maintenir automatiquement la tension constante de la machine. Le principe de réglage de la tension est effectué par l'excitation de la machine. Donc, lorsque la machine est en mode sous-excitation, elle fonctionne comme une inductance par l'absorption de la puissance réactive. Cela induit une baisse de la tension dans le réseau. Par contre, lorsque la machine est en mode surexcitation, elle fournit de la puissance réactive qui génère une augmentation de la tension dans le réseau.

La figure 50 illustre le système d'excitation statique de type ST1 standardisé par IEEE dans lequel un régulateur automatique de tension AVR est intégré [9]. Ce type de régulateur est souvent utilisé pour les générateurs de quelques dizaines à quelques centaines de MVA dans le réseau de transport [33]. Le régulateur automatique de tension *AVR* a comme entrée la tension de référence  $V_{REF}$  qui représente la consigne, la tension terminale  $V_t$  provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation  $V_{Stab}$  provenant du stabilisateur de puissance et, enfin, un retour après amortissement (compensation). La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un compensateur de phase, puis par le régulateur principal.

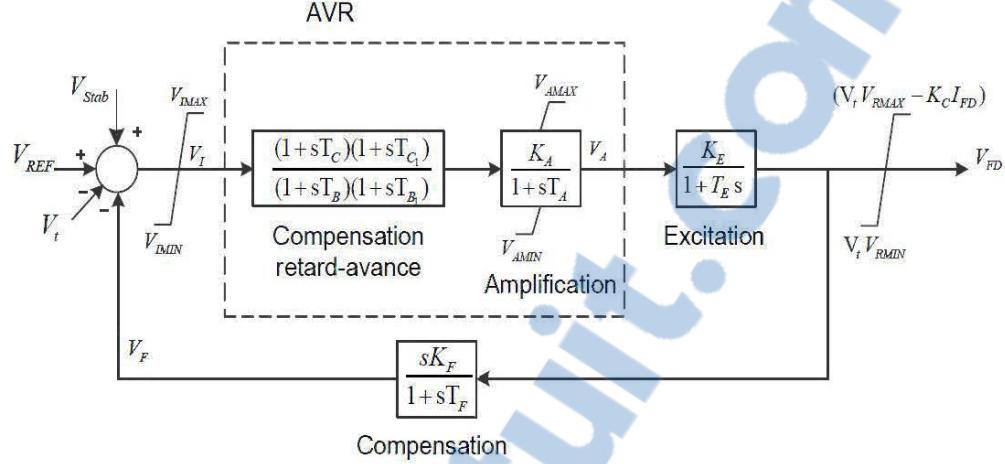


Figure 50 : Schéma du régulateur de tension automatique AVR

Afin de contrôler et de stabiliser la tension d'excitation d'une génératrice  $V_{FD}$ , le schéma de la figure 50 peut être simplifié ( $T_C$ ,  $T_{CI}$ ,  $T_B$  et  $T_{BI}$  peuvent être négligés) comme illustré sur la figure 51.

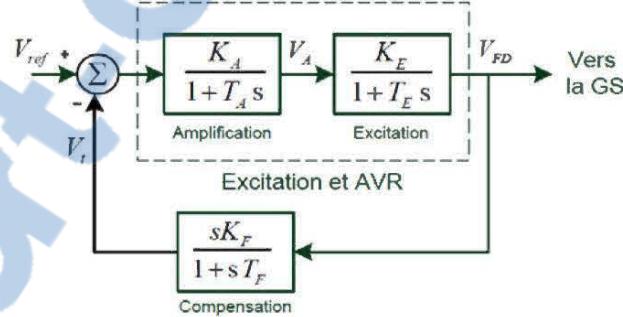
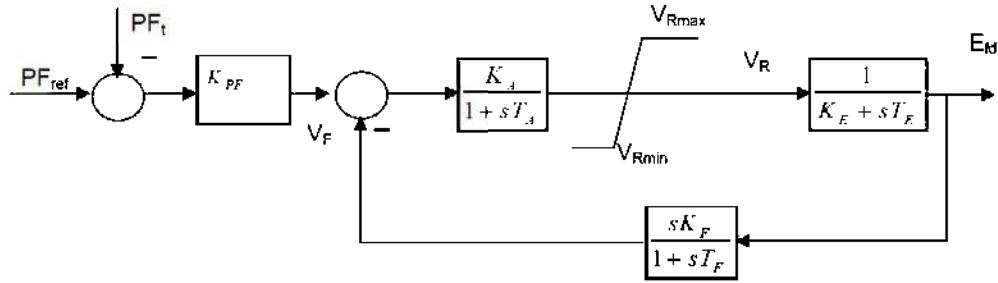


Figure 51 : Schéma du régulateur de tension automatique AVR pour une génératrice synchrone

#### 4.3.1.2 Régulateur de facteur de puissance « *Power Factor (PF)* »

Le régulateur de facteur de puissance « *Power Factor (PF)* » permet de maintenir une valeur constante de facteur de puissance. Ce régulateur est souvent utilisé pour les générateurs d'énergie connectés aux réseaux de distribution de quelques kVA à quelques dizaines de MVA. La figure 52 illustre le modèle IEEE Type-I composé

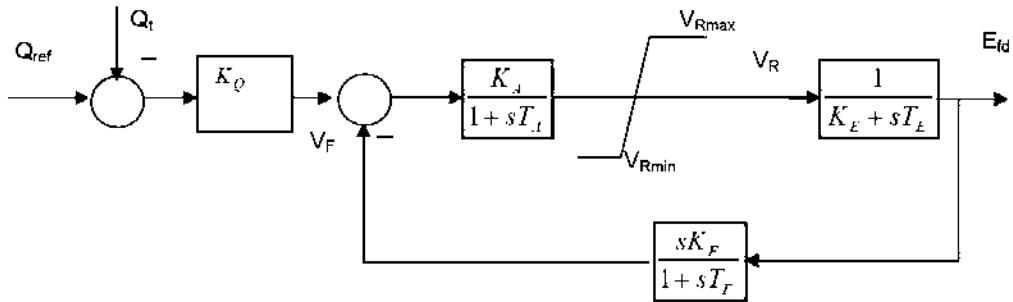
d'une fonction d'excitation du premier ordre, une fonction d'amplificateur, un correcteur du premier ordre ainsi qu'une boucle de stabilisation qui permet d'améliorer la stabilité du système [1] et [6].



**Figure 52 :** Modèle de régulation de facteur de puissance (PF)

#### 4.3.1.3 Régulateur de la puissance réactive (VAR)

Le régulateur de la puissance réactive (VAR) est identique au régulateur de facteur de puissance (PF). Il permet de maintenir une valeur constante de la puissance réactive. La figure 53 illustre le modèle IEEE Type-I composé d'une fonction d'excitation du premier ordre, une fonction d'amplificateur, un correcteur du premier ordre ainsi qu'une boucle de stabilisation qui permet d'améliorer la stabilité du système.



**Figure 53 :** Modèle de régulation de la puissance réactive (VAR)

Pour diminuer les transits de puissance réactive dans les postes sources haute tension (HT), des bancs de condensateurs sont connectés dans le réseau. Ils corrigent le

facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) du poste source. Ce facteur de puissance est donné par la formule suivante:

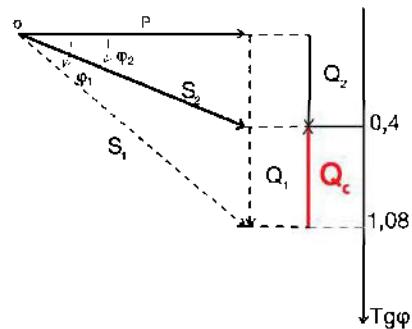
$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4.1)$$

avec:

$P$  : puissance active transitant dans le poste source;

$Q$  : puissance réactive transitant dans le poste source.

Le bilan de puissance illustré à la figure 54 permet de connaître la quantité de puissance réactive ( $Q_c = Q_1 - Q_2$ ) à injecter dans le réseau.



**Figure 54 :** Bilan de puissance

avec:

$S_1$  : puissance apparente avant compensation d'énergie réactive;

$S_2$  : puissance apparente après compensation d'énergie réactive;

$\varphi_1$  : déphasage sans compensation;

$\varphi_2$  : déphasage avec compensation.

Cependant, pour connaître la quantité de puissance réactive  $\Delta Q$  à injecter pour passer d'un facteur de puissance effectif ( $\cos \varphi_1$ ) à un facteur de puissance désiré ( $\cos \varphi_2$ ), la formule suivante est utilisée:

$$Q_c = \Delta Q = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (4.2)$$

$$\Delta Q = P \left( \sqrt{\frac{1}{\cos \varphi_1^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos \varphi_2^2} - 1} \right) \quad (4.3)$$

Les bancs de condensateurs sont contrôlés par des automates utilisant des relais var-métriques (*VAR*). Selon la quantité de puissance réactive demandée par le réseau, ces relais var-métriques enclenchent ou non une série de condensateurs qui leur est associée. Ce type de régulateur (*PF/VAR*) est bien adapté pour les producteurs d'énergie, particulièrement celles de petites puissances [1] et [6].

#### 4.3.2 Types de réglage de tension pour les générateurs de type onduleur

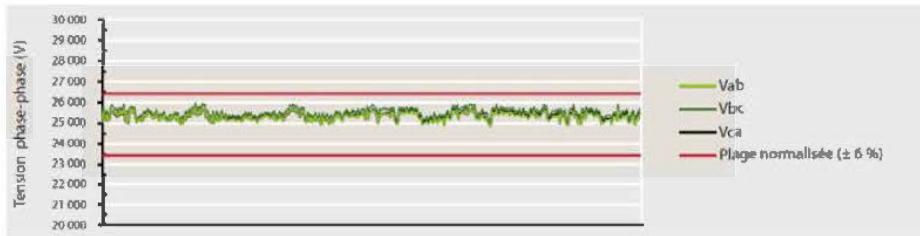
Pour les générateurs d'énergie de type onduleur machine tournante (machine synchrone), il existe deux types de régulation permettant le contrôle des courants fournis par l'onduleur:

##### 4.3.2.1 La régulation en tension ou mode (*P/V*)

Dans ce mode de contrôle, la commande de l'onduleur qui a été créée permet de fixer au nœud de connexion du producteur d'énergie la tension et la puissance active de consigne. L'injection ou l'absorption de la puissance réactive conduit à un contrôle optimal de la tension au point d'insertion du générateur. La puissance active et la tension sont fixées via les courants produits au moyen d'un contrôle adapté de la tension primaire de la source et de l'onduleur. Alors, la tension et la puissance active au point de raccordement de générateurs d'énergie sont contrôlées tout en respectant les limites du système comme illustré sur le tableau 1 et la figure 55.

**Tableau 1** : Caractéristiques de la tension dans le réseau nord-américain [46]

Type de réseau	Tension nominale	Variation (plage normale)	Variation (plage marginale)
Haute tension ( $\geq 50$ kV)	69, 120, 161, 230 ou 315 kV	$\pm 10$ %	s. o.
Moyenne tension ( $\geq 1$ kV à $< 50$ kV)	44 ou 49 kV	$\pm 6$ %	$\pm 10$ %
	14,4/25 kV (étoile)	$\pm 6$ %	$\pm 10$ %
	7,2/12 kV (étoile)	$\pm 6$ %	$\pm 10$ %
Basse tension (monophasé)	120 V	Plage de 110 à 125 V	Plage de 106 à 127 V
Basse tension (triphasé)	600 V	Plage de 550 à 625 V	Plage de 530 à 635 V

**Figure 55** : Plage normalisée ( $\pm 6$  %) de la tension phase-phase (V) [46]

#### 4.3.2.2 La régulation en puissance ou mode ( $P/Q$ )

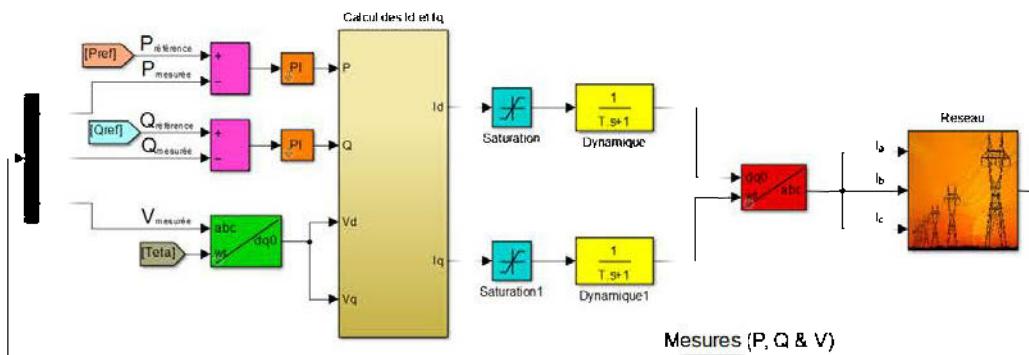
Dans ce mode de contrôle, la commande de l'onduleur qui a été créée permet de fixer au nœud de connexion du producteur d'énergie les puissances active et réactive de consigne. Comme dans le cas du mode de régulation ( $P/V$ ), la commande de l'onduleur est générée par une boucle de régulation en courant. Les puissances active et réactive sont fixées via les courants produits au moyen d'un contrôle adapté de la source primaire et l'onduleur de la tension. Alors, les puissances active et réactive au point d'insertion de générateurs d'énergie sont contrôlées tout en respectant les limites du système (tableau 1 et figure 55).

## 4.4 Modélisation de réglage de production pour un générateur de type panneau solaire

### 4.4.1 Réglage de production en puissance active et réactive ( $P/Q$ )

#### 4.4.1.1 Présentation du modèle

Comme présenté dans la section précédente, le contrôle de production en puissance ( $P/Q$ ) permet d'imposer les puissances active et réactive injectées, par le producteur d'énergie, au nœud de connexion. La figure 56 illustre le système global à modéliser pour un générateur d'énergie de type panneau solaire connecté au réseau. Les grandeurs de puissance active et réactive ainsi que les tensions sont mesurées à partir du réseau. Ces puissances sont régulées par rapport aux puissances de référence par deux correcteurs ( $PI$ ). Cependant, les grandeurs :  $P$ ,  $Q$ ,  $V_d$  et  $V_q$  sont utilisées pour le calcul des courants directs  $I_d$  et quadratiques  $I_q$ . Ces courants, traduisant les puissances à commander, sont injectés dans le réseau au point de connexion du producteur d'énergie. Cependant, l'amplitude et le déphasage des courants injectés permettent de réguler les puissances à leur valeur de consigne.



**Figure 56 :** Modèle de réglage ( $P/Q$ ) d'un panneau solaire connecté au réseau

Ces courants  $I_d$  et  $I_q$  sont calculés en utilisant les références de puissances ainsi que la mesure de tension au point de raccordement ( $V_d$  et  $V_q$ ) qui sont calculées dans le référentiel de Park. Cependant, la transformation de Park permet de transférer les

valeurs triphasées du courant et de la tension en leurs deux composants d et q selon l'équation (4.4).

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \\ Q = \frac{3}{2}(V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q) \end{cases} \quad (4.4)$$

alors:

$$\begin{cases} I_d = \frac{2(P \cdot V_d + Q \cdot V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \\ I_q = \frac{2(P \cdot V_q - Q \cdot V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \end{cases} \quad (4.5)$$

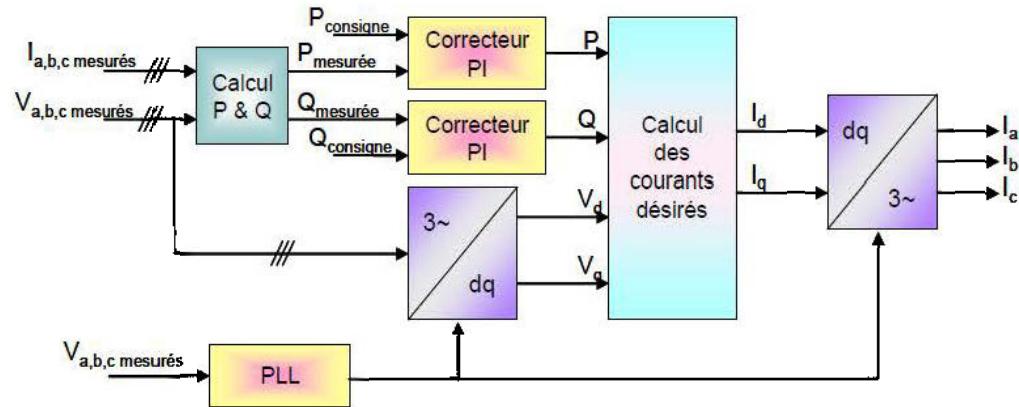
avec:

$P$  et  $Q$  les puissances de référence du générateur;

$V_d$  et  $V_q$  les composantes directe et quadratique de la tension, mesurée au point de connexion du producteur d'énergie, dans le référentiel de Park;

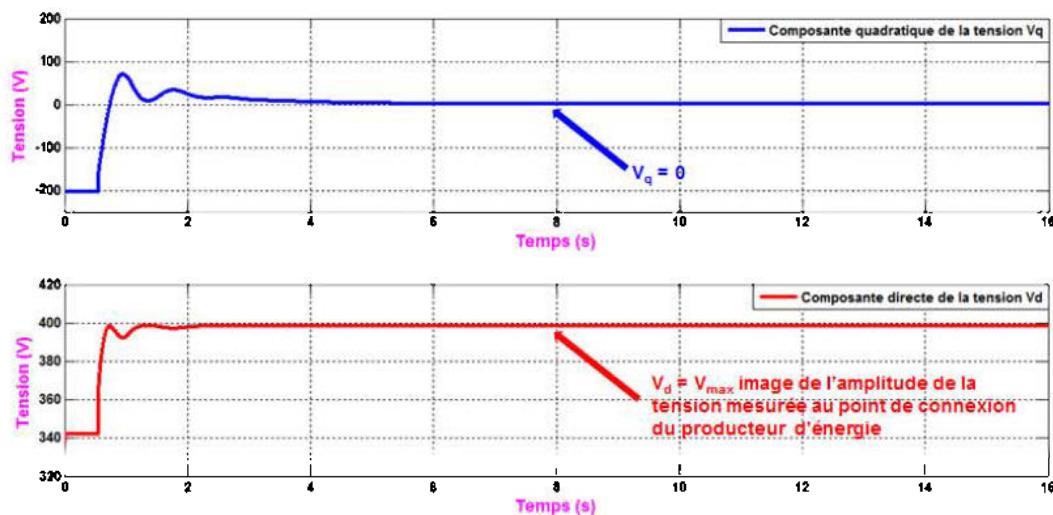
$I_d$  et  $I_q$  les composantes directe et quadratique du courant produit par le générateur d'énergie sur le réseau auquel il est connecté.

Afin de synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau, une boucle à verrouillage de phase « *Phase Locked Loop (PLL)* » est utilisée (voir Annexe E). Cette boucle permet de synchroniser la tension de sortie de l'onduleur à la tension de réseau comme illustré à la figure 57.



**Figure 57 :** Schéma de principe du régulateur ( $P/Q$ )

Cependant, lorsque le système est dans un régime établi (permanent), la composante directe  $V_d$  à la sortie de la transformation de Park représente une image de l'amplitude de la tension mesurée au point de connexion du producteur, et la composante quadratique  $V_q$  est nulle comme illustré à la figure 58.



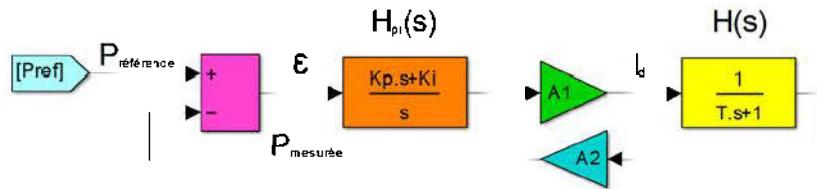
**Figure 58 :** Profil de tension de  $V_d$  et  $V_g$  en utilisant la boucle PLL

Donc, selon l'équation (4.5), le courant direct  $I_d$  représente une image de la puissance active et le courant quadratique  $I_q$  constitue une image de la puissance réactive.

#### 4.4.1.2 Étude du modèle ( $P/Q$ )

Pour l'étude du système illustré aux figures 56 et 57, la boucle de réglage de la puissance active est séparée de la boucle de réglage de la puissance réactive. Vu la similarité entre les deux correcteurs pour ces deux boucles de puissance active et réactive, une seule étude de boucle de puissance est développée, à savoir, la boucle de puissance active.

Si nous considérons que le référentiel de Park choisi tourne à la pulsation de la tension, alors il est possible de fixer les grandeurs des composantes directe et quadratique de la tension, mesurée au point de raccordement du producteur d'énergie, à savoir:  $V_q=0$  et  $V_d=V_{max}$ . De plus, si nous considérons que la tension quadratique  $V_d$  varie très peu, il est possible de simplifier la régulation de puissance active comme l'indique la figure 59.



**Figure 59 :** Boucle de régulation de la puissance active

avec:

$\varepsilon$  : la différence entre la puissance de consigne et la puissance mesurée;

$A_1$  : la simplification des équations (4.5) et (4.4) respectivement. ( $A_1 = \frac{2}{3 \cdot V_d}$  et

$$A_2 = \frac{1}{G_1} = \frac{3 \cdot V_d}{2};$$

$H(s)$  : la fonction de transfert qui représente la dynamique de l'onduleur.

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (4.6)$$

avec:

$\tau$  : le temps de réponse de l'onduleur.

$C_{PI}(s)$  : le correcteur qui est de la forme d'un PI classique exprimé par la formule suivante :

$$C_{PI}(s) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \quad (4.7)$$

avec:

$k_p$  : le coefficient proportionnel;

$k_i$  : le coefficient intégral du correcteur.

Les coefficients des correcteurs vont être dimensionnés de telle façon que la dynamique du système sera conservée. Cette dynamique traduit le temps de réponse de l'onduleur.

Soit  $F_{BF}(s)$  la fonction de transfert du système en boucle fermée illustré à la figure 59 sous la forme de la fonction transfert du second ordre (équation 4.8).

$$\begin{aligned} F_{BF}(s) &= \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2} \\ F_{BF}(s) &= \frac{C_{PI}(s) \cdot A_1 \cdot H(s)}{1 + C_{PI}(s) \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot H(s)} \\ F_{BF}(s) &= \frac{A_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2} \cdot s^2} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Donc:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot A_1 \cdot A_2}{\tau} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2} \end{cases} \quad (4.9)$$

En fixant la pulsation de coupure à  $\omega_n = \frac{1}{\tau}$  pour conserver la dynamique de l'onduleur et  $\zeta=1$  pour ne pas avoir de dépassement, les paramètres des correcteurs pourront donc être fixés grâce aux formules suivantes:

$$\begin{cases} k_i = \omega_n \\ k_p = 2\xi - 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

La même étude peut être réalisée pour la boucle de puissance réactive, les résultats et les conclusions sur les coefficients de corrections étant identiques aux précédents, ceux-ci ne sont pas développés.

#### 4.4.1.3 Simulations du modèle ( $P/Q$ )

Le modèle de réglage ( $P/Q$ ) présenté à la figure 56 est simulé sur un réseau BT présenté à la figure 20. Deux panneaux solaires sont connectés aux nœuds 11 et 14 comme illustré à la figure 60. (voir Annexe F)

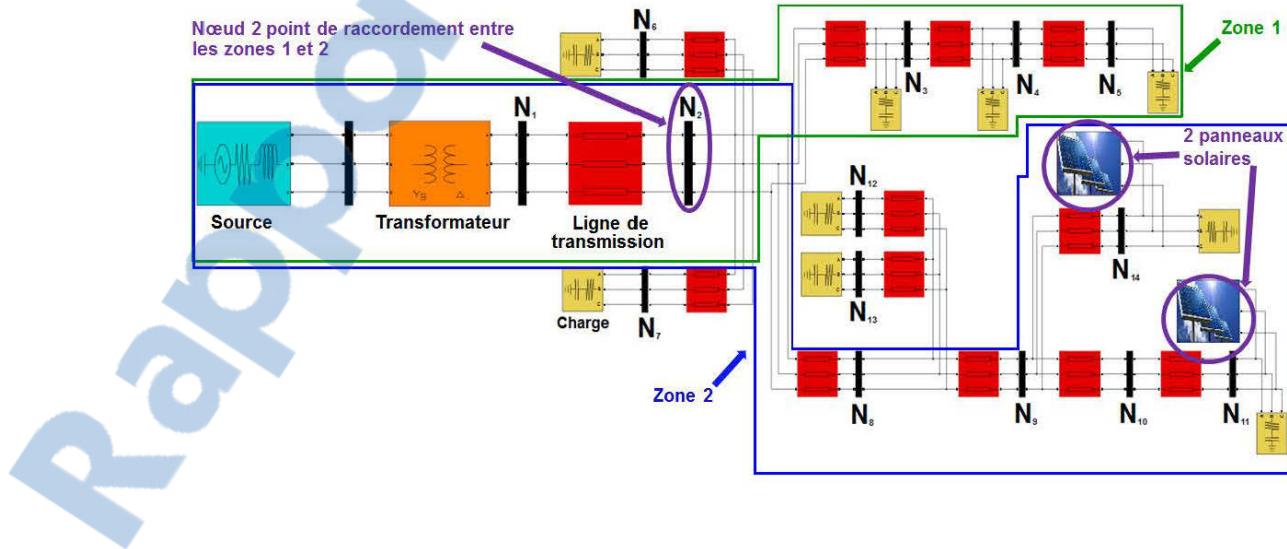
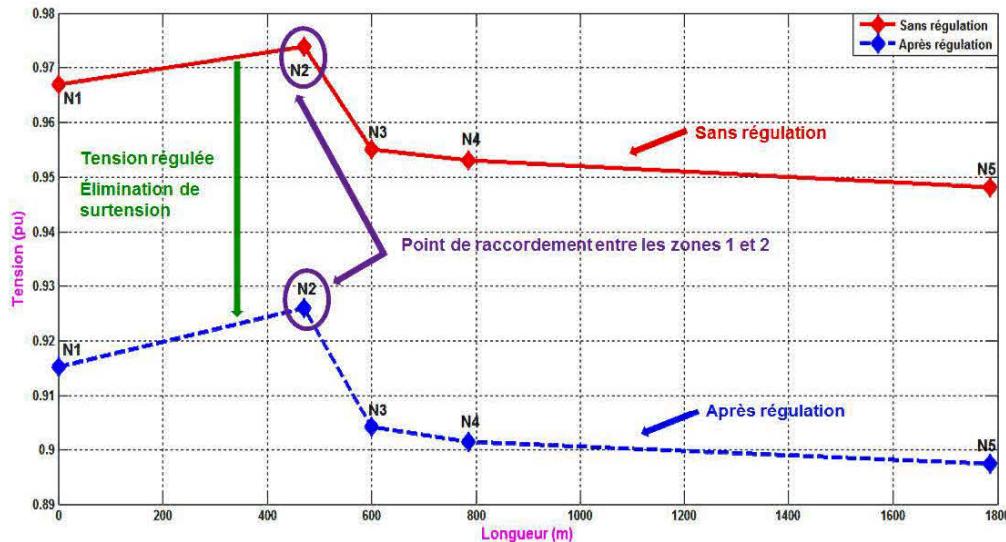
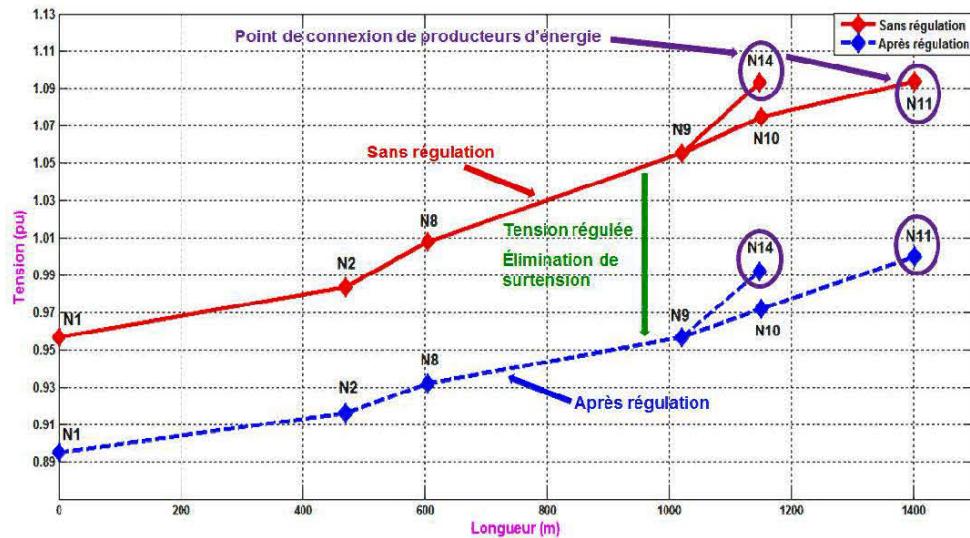


Figure 60 : Réseau BT simulé avec 2 panneaux solaires raccordés aux nœuds 11 et 14

Des simulations ont été réalisées lorsque le réseau en présence du régulateur ( $P/Q$ ). Les tests effectués montrent que la régulation de la tension présente une bonne performance en termes de précision et de stabilité (Figures 61 et 62).



**Figure 61 :** Profil de la tension avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux panneaux solaires connectés au réseau (zone 1)

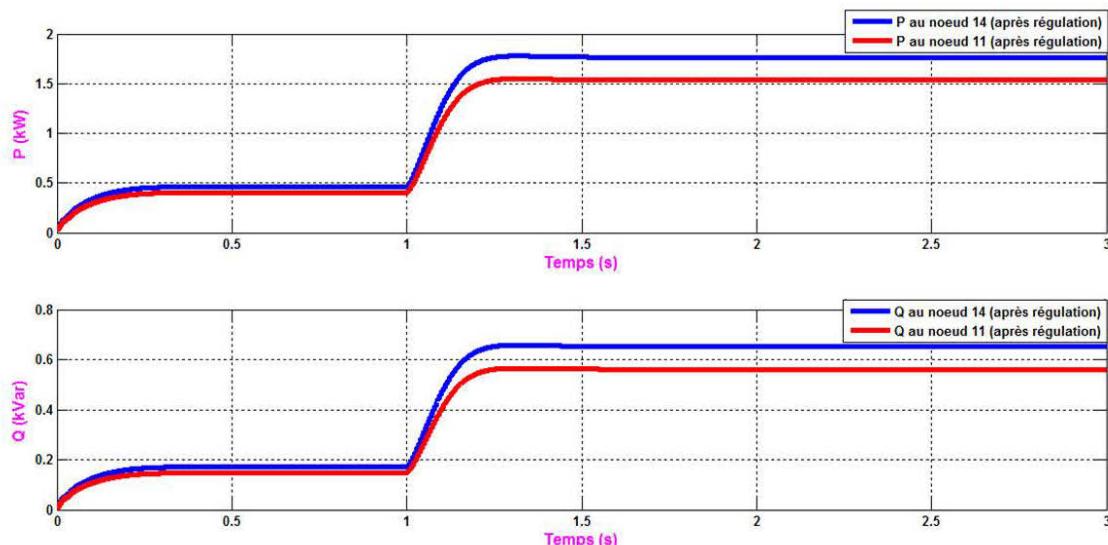


**Figure 62 :** Profil de la tension avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux panneaux solaires connectés au réseau (zone 2)

Comme étudié dans le chapitre 2, il est aisément visible que la connexion de générateurs d'énergie aux nœuds 11 et 14 (zone 2) provoque une augmentation significative de la tension au point où il est connectée ainsi qu'aux nœuds voisins (courbe rouge). L'insertion de producteurs d'énergie entraîne aussi une augmentation de la tension au nœud 2 (point de raccordement avec la zone 2).

En effet, l'utilisation du régulateur de tension et de puissance ( $P/Q$ ) a permis de baisser l'élévation de tension en particulier au nœud de connexion de générateurs d'énergie ainsi qu'aux nœuds voisins (courbe bleu).

Les puissances électriques évoluent aussi en parfaite correspondance avec la régulation de la tension (figure 63).



**Figure 63 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux panneaux solaire connectés au réseau

Ainsi, le modèle de réglage ( $P/Q$ ) permet d'obtenir deux changements de consigne intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. À  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 0.4 kW à 1.7 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 0.2 kVAR à 0,7 kVAR à  $t=1.2s$ .

Les résultats obtenus montrent que l'asservissement de la tension est efficace puisque les valeurs de consigne sont bien imposées au nœud de connexion des producteurs d'énergie. Ainsi pendant le changement de production (à  $t = 1s$ ), la puissance active évolue avec la dynamique de la production modélisée. D'ailleurs, ce changement a un impact direct sur le profil de la tension.

#### 4.4.2 Réglage de production en puissance active et tension ( $P/V$ )

##### 4.4.2.1 Présentation du modèle

Pour ce type de réglage, le schéma de principe est pratiquement identique au contrôle ( $P/Q$ ). La seule différence est au niveau de contrôle du courant  $I_q$ .

Dans le réglage ( $P/Q$ ), la commande de l'onduleur qui a été créée, permet de fixer au nœud de connexion du générateur d'énergie les puissances active et réactive de consigne. Tandis que, dans ce mode ( $P/V$ ), l'objectif n'est plus de commander en puissance, mais plutôt de contrôler la tension ainsi que la puissance active au nœud de raccordement du producteur d'énergie.

Pour régler la tension au point de connexion de producteurs, la formule de la variation de tension sur le réseau due au transit de puissance, abordée au chapitre 2 (équ. 2.1 et 2.5) est utilisée:

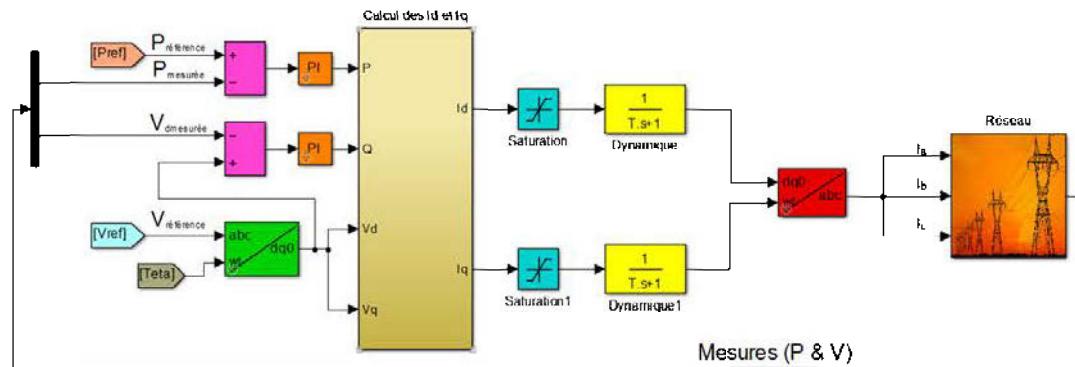
$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad (4.11)$$

Cependant, il est possible de contrôler la tension  $V$  en agissant sur la puissance réactive et, ainsi, créer une variation de tension positive ou négative permettant d'atteindre la valeur de consigne  $V_{référence}$ .

Dans ce réglage ( $P/V$ ), la tension est contrôlée uniquement au moyen de la puissance réactive. Comme illustré dans le chapitre 2 (équ. 2.7), dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéaire est plus importante que la réactance linéaire ( $R \gg X$ ) par rapport aux réseaux de haute tension (HT). Elle joue le même rôle que la puissance.

Cependant, pour un réglage ( $P/V$ ), la puissance active est un paramètre à contrôler. Il ne pourra pas être utilisé pour le contrôle de la tension. Ce type de réglage permet d'imposer au nœud de connexion du générateur d'énergie la tension et la puissance active de consigne.

La figure 64 illustre le système global à modéliser. La boucle de réglage de la puissance réactive du mode ( $P/Q$ ) a été remplacée par une boucle de contrôle de la tension. La différence entre la tension mesurée sur le réseau et l'amplitude de la tension de référence est traduite, par le correcteur ( $PI$ ), en une quantité de puissance réactive à fournir ou à absorber.



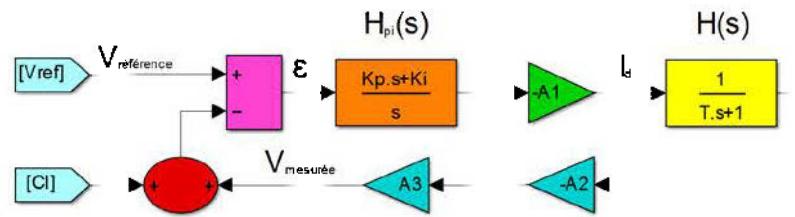
**Figure 64 :** Modèle de réglage ( $P/V$ ) d'un panneau solaire connecté au réseau

Dans le cas où la tension mesurée dans le réseau est inférieure à la consigne de tension, le système va produire plus de puissance réactive, ce qui aura comme effet l'augmentation de la tension. Par contre, si la tension mesurée est trop élevée par

rappart à la consigne de tension, la puissance réactive injectée sera diminuée. Ainsi, il va être possible de réaliser un réglage de la tension et de la puissance active au point de connexion du générateur ainsi qu'aux nœuds voisins.

#### 4.4.2.2 Étude du modèle ( $P/V$ )

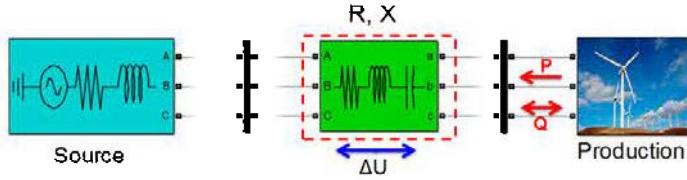
Comme le cas du réglage ( $P/Q$ ), pour l'étude du système illustré à la figure 64, la boucle de réglage de la puissance active est séparée de la boucle de régulation de la tension. Alors, la boucle de régulation de la tension est modélisée selon la figure 65.



**Figure 65 :** Boucle de régulation de la tension

Les fonctions  $C_{PI}(s)$  et  $H(s)$  et les gains  $A_1, A_2$  sont les mêmes que ceux utilisés pour le réglage ( $P/Q$ ).

Dans ce type de réglage, seulement l'impact de la puissance réactive sur la tension nous intéresse. Ainsi, le gain  $A_3 = \frac{X}{V}$  où  $X$  représente la partie inductive de la ligne illustrée à la figure 66. Le gain  $A_3$  traduit l'impact de la puissance réactive sur la tension, via l'inductance linéaire  $X$ . Cependant, la sortie du gain  $A_3$  représente la variation de la tension due à l'absorption ou à la production de puissance réactive. Les conditions initiales de la tension sont ajoutées afin d'obtenir une image de la tension mesurée.



**Figure 66 :** Représentation de l'inductance X intervenant dans l'expression de  $A_3$

Comme élaboré pour le réglage ( $P/Q$ ), afin de caractériser les paramètres  $k_p$  et  $k_i$  du correcteur de la boucle de régulation de la tension présentés à la figure 65, la fonction de transfert en boucle fermée peut être donnée sous la forme d'un second ordre:

$$F_{BF}(s) = \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2}} \quad (4.12)$$

$$F_{BF}(s) = \frac{A_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \cdot s^2}$$

alors:

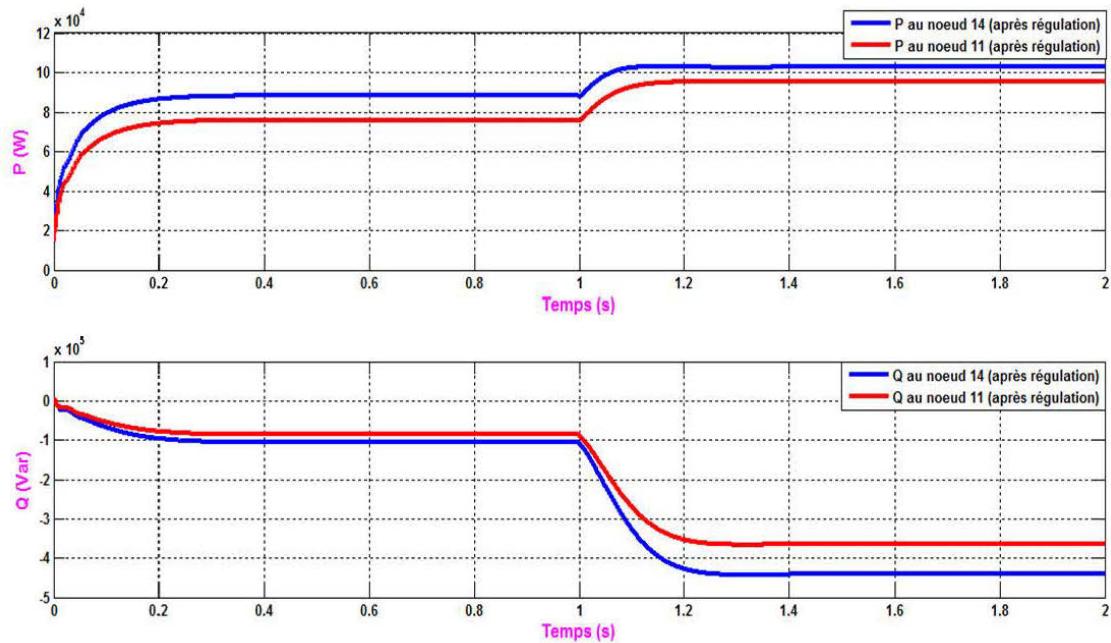
$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}{\tau} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \end{cases} \quad (4.13)$$

En fixant la pulsation de coupure à  $\omega_n = \frac{1}{\tau}$  pour conserver la dynamique de l'onduleur et  $\xi=1$  pour ne pas avoir de dépassement, les paramètres des correcteurs pourront donc être fixés grâce aux formules suivantes:

$$\begin{cases} k_i = \frac{1}{A_3 \cdot \tau} = \frac{V_d}{X \cdot \tau} \\ k_p = \frac{2\xi - 1}{A_3} = \frac{(2\xi - 1) V_d}{X} \end{cases} \quad (4.14)$$

#### 4.4.2.3 Simulations du modèle (P/V)

Le modèle de réglage (P/V) présenté à la figure 64 est simulé sur un réseau BT présenté à la figure 20. Deux panneaux solaires sont connectés aux nœuds 11 et 14 comme illustré à la figure 60. Des simulations ont été réalisées lorsque le réseau est en pleine charge pour les deux zones, 1 et 2. La figure 67 montre les résultats obtenus :



**Figure 67 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage (P/V) pour deux panneaux solaires connectés au réseau

Ainsi, le réglage ( $P/V$ ) permet d'obtenir deux événements intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. À  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 85 kW à 110 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 100 kVar à 420 kVAR à  $t=1.2s$ .

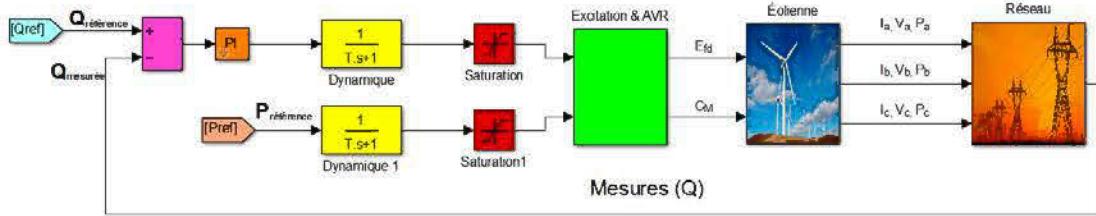
Les résultats obtenus montrent que l'asservissement de la tension est efficace puisque les valeurs de consigne sont bien imposées au nœud de connexion de producteurs d'énergie. Ainsi pendant le changement de production (à  $t = 1s$ ), la puissance active évolue avec la dynamique de la production modélisée. D'ailleurs, ce changement a un impact direct sur le profil de la tension.

## 4.5 Modélisation de réglage de production pour un générateur de type éolien

### 4.5.1 Réglage de production en puissances ( $P/Q$ )

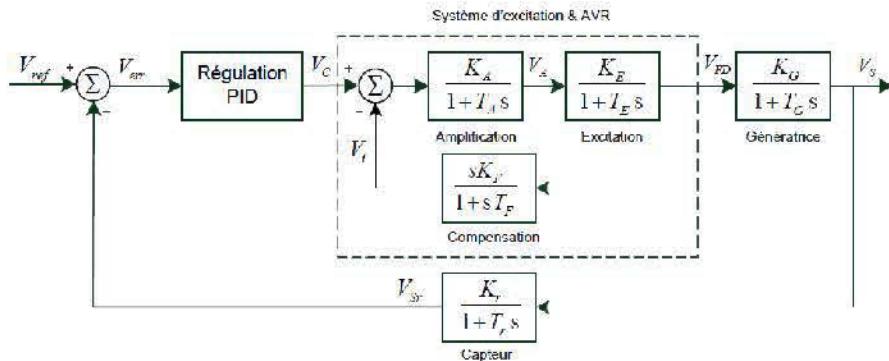
#### 4.5.1.1 Présentation du modèle

Dans ce type de réglage, il n'est pas nécessaire d'ajouter une boucle de régulation supplémentaire comme indiqué dans le mode de contrôle ( $P/Q$ ) pour un générateur de type panneau solaire. Ainsi, la consigne d'entrée en puissance est fixée directement en sortie de la génératrice synchrone. Cependant, la boucle de régulation en puissance réactive contient les limitations relatives à la génératrice synchrone comme illustré à la figure 68. Les commandes de la machine sont la tension d'excitation ( $E_{fd}$ ) pour le contrôle de puissance réactive ou de tension au nœud de connexion du générateur ainsi qu'une référence de couple mécanique ( $C_M$ ) traduisant une puissance active de consigne.



**Figure 68 :** Modèle de réglage ( $P/Q$ ) d'une éolienne connectée au réseau

Le modèle de réglage ( $P/Q$ ) a été amélioré, en y ajoutant un régulateur automatique de tension AVR [9] au point de connexion du générateur d'énergie. De plus, afin de corriger la tension de sortie de la génératrice  $V_s$ , un régulateur PID de type ST1 IEEE a été ajouté au système d'excitation comme illustré à la figure 69.



**Figure 69 :** Régulation de la tension de sortie de la génératrice

avec :

$V_C$  : Tension corrigée;

$K_G$  : Gain de la génératrice;

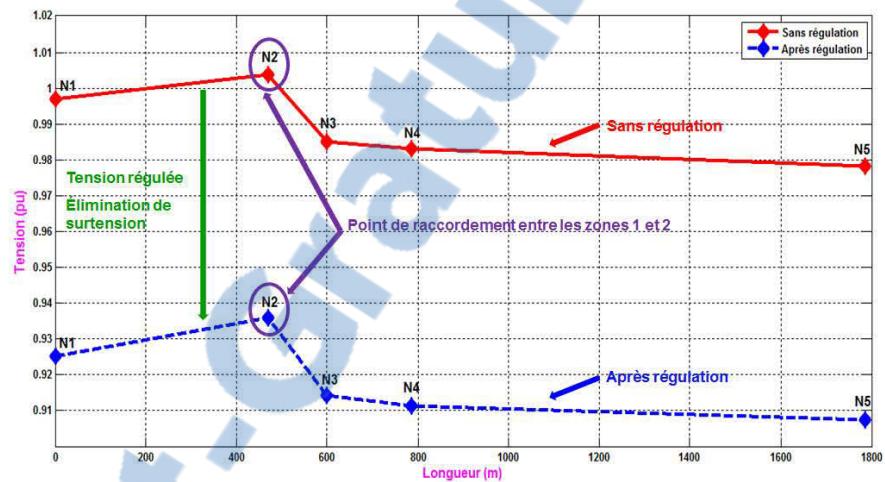
$K_r$  : Gain du capteur;

$T_G$  : Constante de la génératrice;

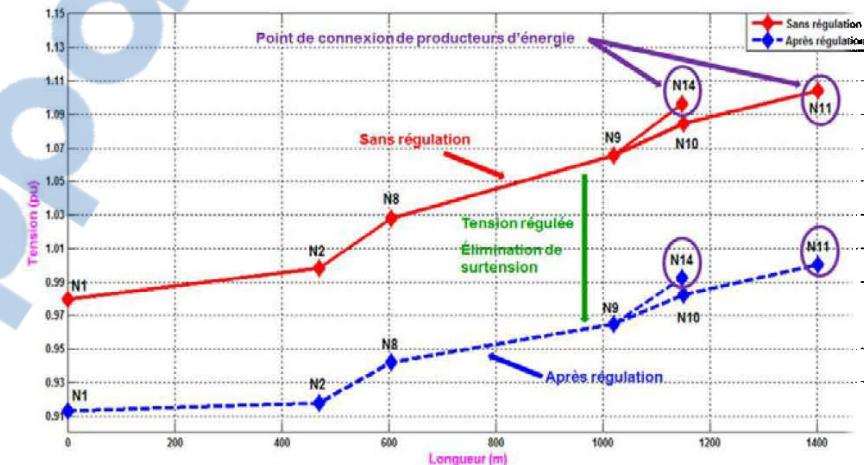
$T_r$  : Constante de temps du capteur.

#### 4.5.1.2 Simulations du modèle ( $P/Q$ )

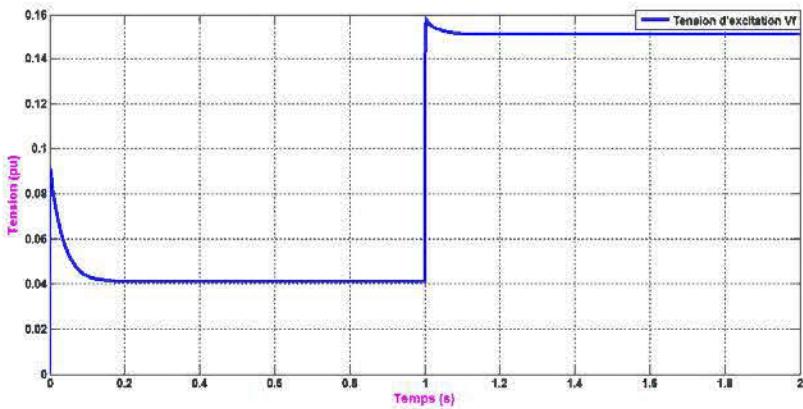
Les simulations ont été réalisées sur le réseau (figure 23) en présence du régulateur ( $P/Q$ ). Les tests effectués montrent que la régulation de la tension présente une bonne performance en termes de précision et de stabilité (figures 70, 71, 72 et 73). La parfaite concordance entre la tension de la génératrice et la tension d'excitation est bien évidente.



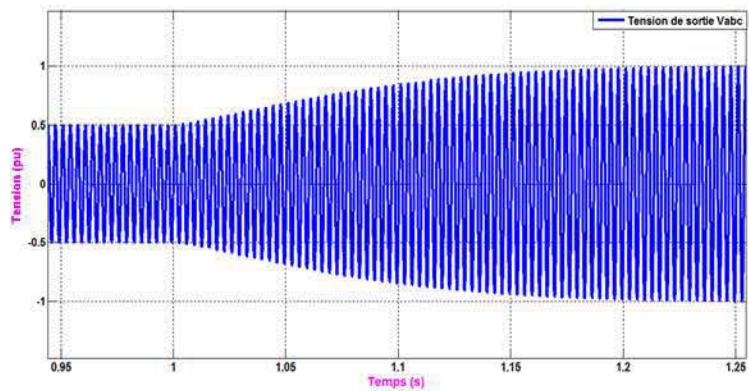
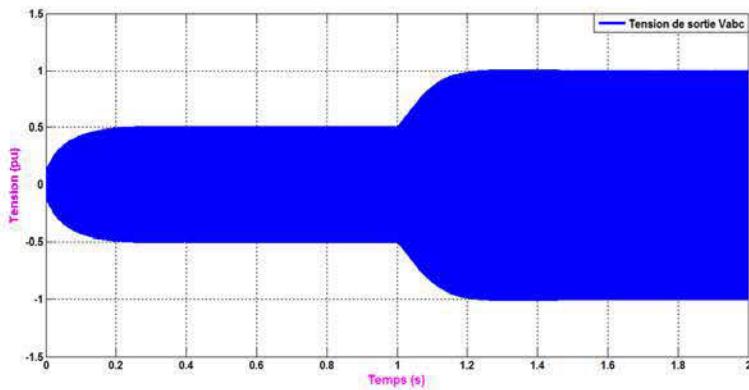
**Figure 70 :** Profil de la tension avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux éoliennes connectées au réseau (zone 1)



**Figure 71 :** Profil de la tension avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux éoliennes connectées au réseau (zone 2)

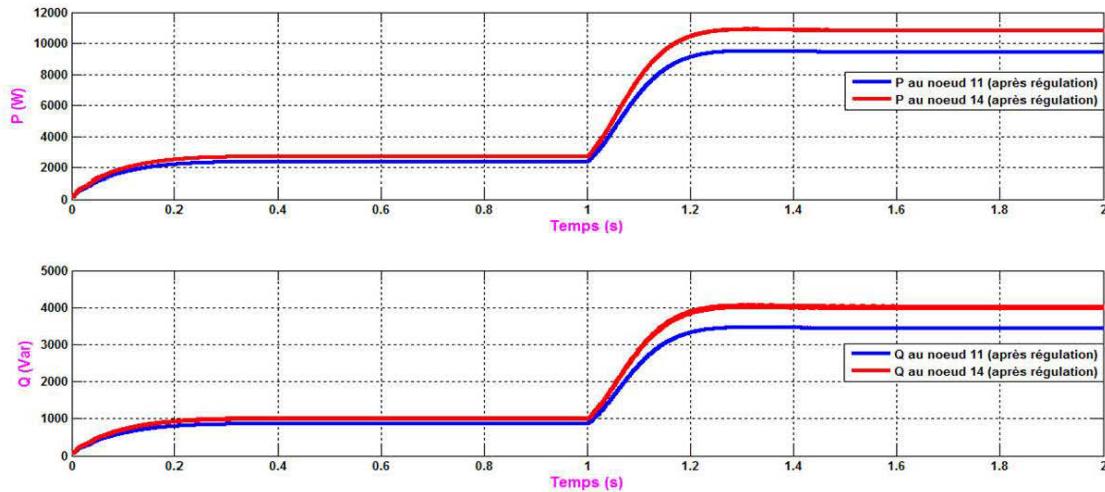


**Figure 72 :** Profil de tension d'excitation  $V_f$  (pu)



**Figure 73 :** Profil de tension de sortie  $V_{abc}$  (pu)

Les puissances électriques évoluent aussi en parfaite correspondance avec la régulation de la tension (figure 74).



**Figure 74 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour deux éoliennes connectées au réseau

Ainsi, le modèle de réglage ( $P/Q$ ) permet d'obtenir deux changements de consigne intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. À  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 2.5 kW à 10.5 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 1 kVAR à 4 kVAR à  $t=1.2s$ .

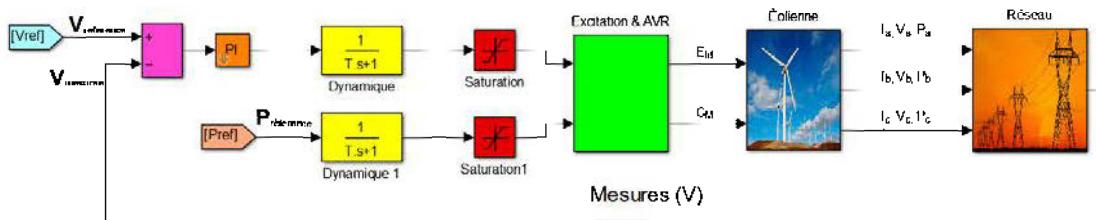
Puisque les valeurs de consigne ont bien été définies au point de raccordement de générateurs d'énergie, la régulation de la tension s'avère efficace. Ainsi la puissance active évolue avec la dynamique de la production modélisée pendant le changement de production (à  $t = 1s$ ). D'ailleurs, ce changement a un impact direct sur le profil de la tension.

#### 4.5.2 Réglage de production en puissances ( $P/V$ )

##### 4.5.2.1 Présentation du modèle

Pour ce type de réglage, une régulation classique de tension (de type AVR) pour le contrôle de la génératrice synchrone est utilisée [9] comme illustré à la figure 75.

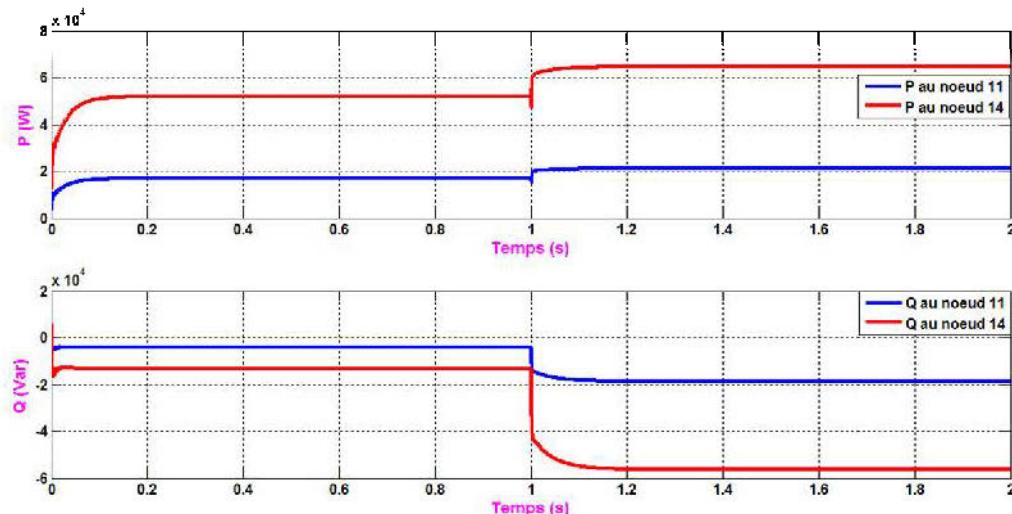
Ainsi, la modélisation du système de production est réalisée grâce aux limitations et aux dynamiques exposées précédemment. Le contrôle de la tension se fait via la tension d'excitation de la machine. Cependant, la génératrice surexcitée ou sous excitée a pour effet d'augmenter ou d'abaisser respectivement la tension au nœud de connexion du générateur d'énergie.



**Figure 75 :** Modèle de réglage ( $P/V$ ) d'une éolienne connectée au réseau

#### 4.5.2.2 Simulations du modèle ( $P/V$ )

Les simulations ont été réalisées sur le réseau (figure 23) en présence du régulateur ( $P/V$ ). La figure 76 illustre le profil des puissances pour deux éoliennes connectées au réseau.



**Figure 76 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage ( $P/V$ ) pour deux éoliennes connectées au réseau

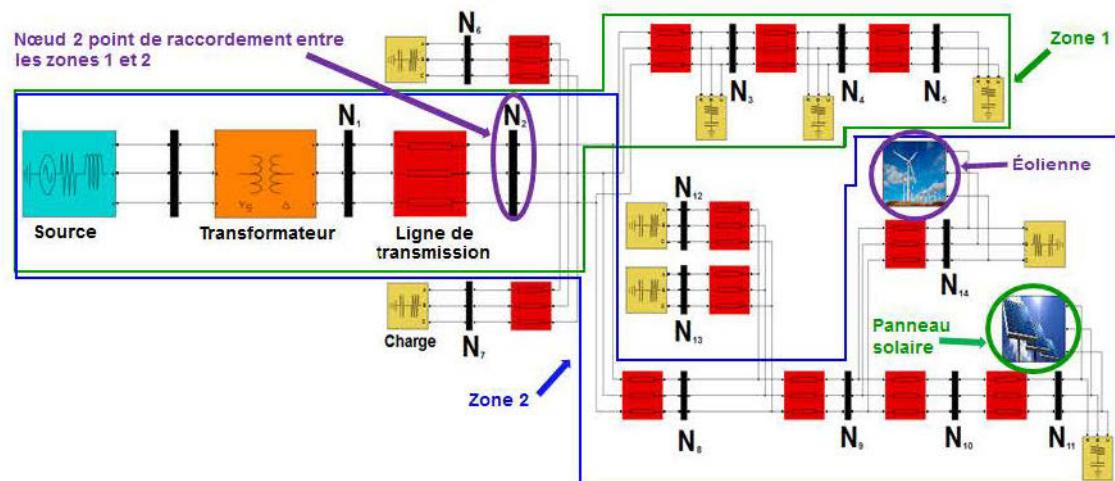
Par ce réglage ( $P/V$ ), nous avons obtenus deux changements de consigne intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. À  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 50 kW à 65 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 40 kVAR à 58 kVAR à  $t=1.2s$ .

Les régulations obtenues sont efficaces, les consignes sont atteintes et les perturbations ont été éliminées.

#### 4.6 Modélisation de générateur de type combiné panneau solaire – éolienne

##### 4.6.1 Présentation du système

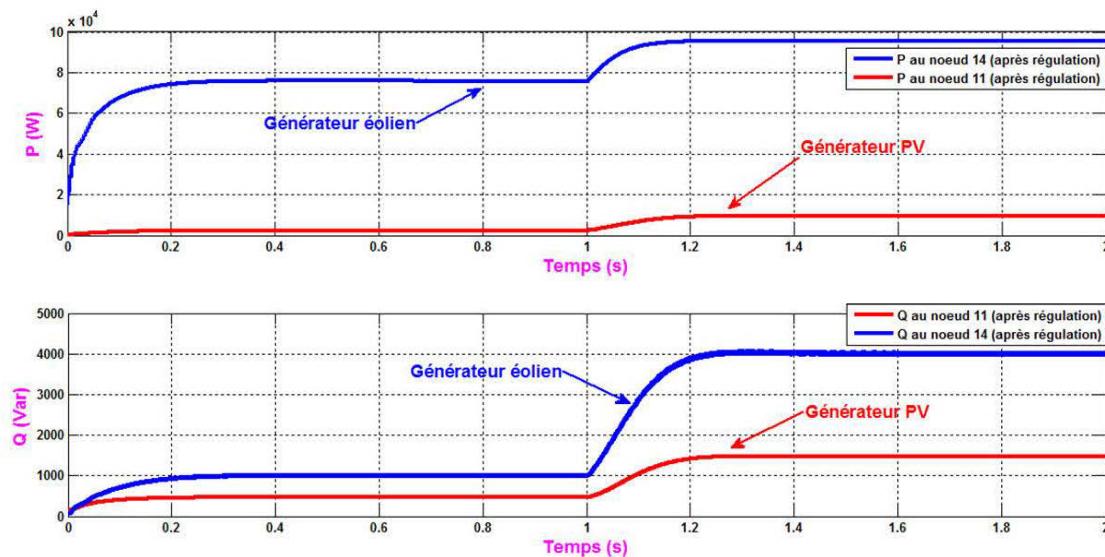
Les modèles de réglage présentés précédemment ( $P/Q$ ) et ( $P/V$ ) sont simulés sur un réseau BT présenté à la figure 20. Un panneau solaire est inséré au nœud 11 et une éolienne est connectée au nœud 14 comme illustré à la figure 77.



**Figure 77 :** Réseau BT simulé avec un panneau solaire raccordé au nœud 11 et une éolienne connectée au nœud 14

#### 4.6.2 Simulations du modèle ( $P/Q$ )

Des simulations ont été réalisées sur le réseau en présence du régulateur ( $P/Q$ ). La figure 78 illustre le profil des puissances séparément pour le panneau solaire et l'éolienne.



**Figure 78 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage ( $P/Q$ ) pour un panneau solaire et une éolienne connectés au réseau

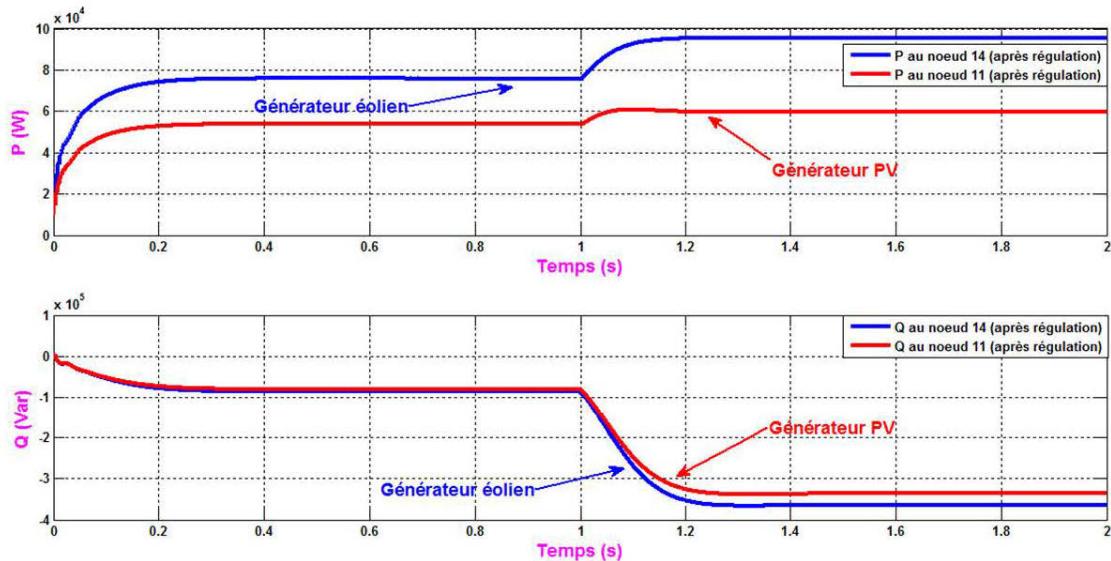
Ainsi, le modèle de réglage ( $P/Q$ ) permet d'obtenir deux changements de consigne intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. Pour le générateur d'énergie de type panneau solaire, à  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 5kW à 10kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 0.5 à 1.6 kVar à 1.3s. Pour le producteur d'énergie de type éolien, à  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 78 kW à 98 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 1 à 4 kVar à 1.2s.

Comme les valeurs de références ont bien été déterminées au point d'insertion de producteurs d'énergie, le réglage de la tension est efficace. Ainsi durant le changement de production (à  $t = 1s$ ), la puissance active évolue avec la dynamique de

la production modélisée. D'ailleurs, ce changement a un impact direct sur le profil de la tension.

#### 4.6.3 Simulations du modèle ( $P/V$ )

Des simulations ont été réalisées sur le réseau en présence du régulateur ( $P/V$ ). La figure 79 illustre le profil des puissances séparément pour le panneau solaire et l'éolienne.



**Figure 79 :** Profil de puissances avec le modèle de réglage ( $P/V$ ) pour un panneau solaire et une éolienne connectées au réseau

Par ce réglage, nous avons obtenus deux changements de consigne intervenant à des temps de 1 et 1.2 secondes. Pour le générateur de type panneau solaire, à  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 56 kW à 60kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 90 kVar à 35 kVar à 1.2s. Pour le générateur de type éolien, à  $t=1s$ , la puissance active passe d'une consigne de 78 kW à 98 kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 92 kVar à 37 kVar à 1.2s.

Le modèle de réglage utilisé a permis d'obtenir des régulations efficaces, d'atteindre les consignes et d'éliminer les perturbations générées à la suite d'insertion de producteurs d'énergie.

#### 4.7 Conclusions

Dans ce chapitre, l'importance de réglage de la fréquence, de la tension et de la puissance a été présentée. Les différentes méthodes de réglage de tension ont été illustrées. Ainsi, deux méthodes de réglage de tension ont été appliquées et simulées sur un réseau BT, soient: méthode de contrôle ( $P/Q$ ) et méthode de réglage ( $P/V$ ) pour un producteur d'énergie de type panneau solaire, un générateur d'énergie de type éolien et un GER combiné (PV-éolienne).

Les résultats obtenus de différentes simulations réalisées ont permis un réglage de la tension ainsi que les puissances active et réactive lors de la connexion d'un producteur (PV et/ou éolien) dans le réseau électrique.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de ce mémoire, l'impact de l'insertion croissante de générateurs d'énergie dans les réseaux de distribution a été étudié. Ainsi, dans un premier temps, nous avons développé la méthode du calcul de la chute de tension lors de l'insertion d'un producteur d'énergie pour un réseau composé de  $N$  charge.

Par la suite, nous avons vérifié l'effet de la connexion d'un générateur d'énergie par simulation numérique. Les résultats de simulation obtenus montrent que la connexion de producteurs d'énergie provoque une augmentation significative de la tension au point de raccordement ainsi qu'aux nœuds voisins. D'ailleurs, dans le cas d'une charge partielle, la tension atteint même un niveau critique au point de connexion supérieur à la tension admissible.

Après, nous avons présenté les modèles mathématiques, les types de raccordement ainsi que la modélisation de deux types de producteurs d'énergie (panneau solaire et éolien).

Ensuite, nous avons adapté deux méthodes de réglage de tension ( $P/Q$ ) et ( $P/V$ ) pour le contrôle de la tension pour trois types de productions connectés au réseau de distribution, soient :

- panneau solaire (PV) raccordé au réseau via un onduleur;
- éolienne connectée au réseau via une génératrice synchrone;
- combinaison (PV – éolienne) raccordée au réseau.

Pour obtenir un réglage optimal de la tension, les méthodes de contrôle ont été améliorées, en y ajoutant deux régulateurs de type ST1 IEEE : i) un régulateur automatique de tension AVR et ii) un régulateur de type PID.

Finalement, nous avons effectuées des simulations de ces deux méthodes de réglage en utilisant la plate-forme Matlab®/Simulink® sur un réseau électrique BT.

Les résultats obtenus de différentes simulations réalisées montrent très bien la capacité de réglage optimal de tension des deux méthodes et leur efficacité de maintenir la stabilité et le bon fonctionnement du réseau.

## RECOMMANDATIONS

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire peuvent être continués et améliorés.

En effet, une suite logique à ces travaux serait de :

- ❖ simuler le modèle de réglage modifié sur un réseau plus grand (haute tension);
- ❖ réaliser des simulations en raccordant plusieurs générateurs d'énergie dans le réseau d'étude;
- ❖ comparer et valider les résultats de simulations obtenus avec un cas expérimental réel (banc d'essai);
- ❖ essayer d'optimiser les paramètres de chaque régulateur (par ex., à l'aide du code génétique);
- ❖ développer d'autres méthodes de réglage de tension et comparer les résultats obtenus avec ceux des travaux réalisés;
- ❖ réaliser un réglage auto-adaptatif afin d'avoir un fonctionnement intelligent. Ainsi, ce contrôle permet de basculer automatiquement d'un modèle de réglage à l'autre (par exemple: modèle de réglage ( $P/Q$ ) ou ( $P/V$ )).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Anderson, P.M. & Fouad, A.A. (1977). *Power System Control and Stability.* (2<sup>nd</sup> ed.). The IOWA State University Press Ames IOW. USA.
- [2] Ragaller, K. (1987). *Current interruption in High-Voltage Networks.*, editor Plenum Press, New York.
- [3] Croguennoc, A. (1991). Protection des réseaux à basse tension de distribution publique. Techniques de l'ingénieur.
- [4] Croguennoc, A. (1991). Protections des réseaux à moyenne tension de distribution publique. Techniques de l'ingénieur.
- [5] Corroyer, C. (1991). Protection des réseaux. Techniques de l'ingénieur.
- [6] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.* IEEE Std 421.5-1992, 1992: p. 0\_1.
- [7] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.* IEEE Std 519-1992, 1993: p. 1-112.
- [8] Bornard, P., Pavard, M. (1993). Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement. Techniques de l'ingénieur.
- [9] Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control.* McGraw-Hill Inc. New York.
- [10] Chung-Yuen, W., Duk-Heon K., Sei-Chan K, Won-Sam K. & Hack-Sung K. *A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller.* in *Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE.* 1994.
- [11] Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T. & Osakada, M. *Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions.* Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 1995. 142(1): p. 59-64.

- [12] Cortinas, D. & P. Juston. *Assessing the impact of dispersed generation on medium voltage networks: analysis methods.* in *Electric Power Engineering, 1999. PowerTech Budapest 99. International Conference on.* 1999.
- [13] Canard, J.F., Dumas F & Hadjsaid, N. *Dispersed generation impact on distribution networks.* Computer Applications in Power, IEEE, 1999. 12(2): p. 22-28.
- [14] Barker, P.P. & de Mello, R.W. *Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems.* in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE.* 2000.
- [15] Hohm, D.P. & Ropp. M.E. *Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed.* in *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE.* 2000.
- [16] Caire, R., Retiere, N., Martino, S & Andrieu, C. *Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network.* in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE.* 2002.
- [17] Aarts, L.P. & Veer, P.V.D. *Neural Network Method for Solving Partial Differential Equations.* Neural Process. Lett., 2001. 14(3): p. 261-271.
- [18] Aarts, L.P. & Veer, P.V.D. *Solving Nonlinear Differential Equations by a Neural Network Method,* in *Proceedings of the International Conference on Computational Science-Part II, 2001,* Springer-Verlag. p. 181-189.
- [19] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook* », John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- [20] Jäntti, S & Olof, S. (2003). *CODGUNet – Connection of Distributed Energy Generation Units in the Distribution Network and Grid.* Elforsk, Stockholm.
- [21] Kiprakis, A.E & Wallace, A.R. *Hybrid control of distributed generation of distributed generators connected to weak rural networks to mitigate voltage variation.* 17<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, CIRED, May 2003, Barcelone, Espagne.
- [22] Luque, L & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering,* John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.

- [23] Kelouwani, S. & Agbossou, K. *Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2004. 19(3): p. 607-612.
- [24] Blaabjerg, F., Zhe, C & Kjaer, S.B. *Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems*. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004. 19(5): p. 1184-1194.
- [25] Duc-Pham, C., Raison, B., Rognon, J.P & Bonnoit, S. *Optimization of fault indicators placement with dispersed generation insertion*. in *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*. 2005.
- [26] Bahgat, A.B.G., Helwa, N.H., Ahmad, G.E. & El Shenawy, E.T. *Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks*. Renewable Energy, 2005. 30(8): p. 1257-1268.
- [27] Kjaer, S.B., Pedersen, J.K. & Blaabjerg, F. *A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules*. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2005. 41(5): p. 1292-1306.
- [28] Patel, M.R. (2006). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis and Operation* (2<sup>nd</sup> ed.). CRC PRESS, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
- [29] International Energie Agency. (2006). *World energy outlook 2006*. Récupéré de <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2006.pdf>.
- [30] Richardot, O., Viciu A., Bésanger, Y., Hadjsaïd N & Kieny, C. *Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Using Distributed Generation*. in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*. 2006.
- [31] Faranda, R & Leva, S. (2008). *Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems*. WSEAS Transactions on Power Systems, Vol. 6, 3. 446-455.
- [32] Gil, H.A. & Joos, G. *Models for Quantifying the Economic Benefits of Distributed Generation*. Power Systems, IEEE Transactions on, 2008. 23(2): p. 327-335.
- [33] Htay, M. & San Win, K. (2008). *Design and Construction of Automatic Voltage Regulator for Diesel Engine Type Stand-alone Synchronous Generator*. World Academy of Science, Engineering and Technology Vol. 44, p. 763.

- [34] Le, T.L., Tran, Q.T., Devaux, O & Chilard, O. *Reduction and aggregation for critical and emergency operation of distribution network in presence of distributed generators.* in *Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on.* 2009.
- [35] Hydro-Québec. (2009). *Service d'électricité en basse tension à partir des postes distributeurs, Norme E.21-11 (5<sup>e</sup> éd.).* Récupéré de [http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-vert/livre\\_vert.pdf](http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-vert/livre_vert.pdf)
- [36] Dung Tran Khanh, V., Agbossou, K & Doumbia M.L. *Voltage unbalance treatment for distribution network with massively connected distributed generators.* in *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on.* 2010.
- [37] Hydro-Québec. (2011). *Service d'électricité en moyenne tension, Norme E.21-12, (3<sup>e</sup> éd.).* Récupéré de [http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-rouge/livre\\_rouge.pdf](http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-rouge/livre_rouge.pdf)
- [38] Hydro-Québec. (2012). *Norme pour la conception, l'installation et la vérification des Structures aériennes.* Récupéré de [http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/produits\\_services/pdf/norme uc stucture poteau.pdf](http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/produits_services/pdf/norme uc stucture poteau.pdf)
- [39] Chia-Hung, L., Wei-Lin, H., Chao-Shun, C & Cheng-Ting, H. *Optimization of Photovoltaic Penetration in Distribution Systems Considering Annual Duration Curve of Solar Irradiation.* Power Systems, IEEE Transactions on, 2012. 27(2): p. 1090-1097.
- [40] Hsu, C.T., Tsai, L.J., Cheng, T.J., Chen, C.S & Hsu C.W. *Solar PV generation system controls for improving voltage in distribution network.* in *Next-Generation Electronics (ISNE), 2013 IEEE International Symposium on.* 2013.
- [41] Hydro-Québec. (2014). *Service d'électricité en basse tension, Norme E.21-10, (10<sup>e</sup> éd.).* Récupéré de [http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-bleu/livre\\_bleu.pdf](http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-bleu/livre_bleu.pdf)
- [42] <http://www.encorp.com/VPP-TechDataSheet.pdf>
- [43] [http://fr.sputniknews.com/sci\\_tech/20150218/1014792436.html](http://fr.sputniknews.com/sci_tech/20150218/1014792436.html)
- [44] [http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/technologies-de-l-energie-thematique\\_89428/le-monde-comptera-3-2-tw-de-solaire-photovoltaïque-et-d-eolien-en-2030-article\\_286511/](http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/technologies-de-l-energie-thematique_89428/le-monde-comptera-3-2-tw-de-solaire-photovoltaïque-et-d-eolien-en-2030-article_286511/)

- [45] <http://encyclopedie-energie.org/notices/production%C3%A9lectricit%C3%A9-%C3%A9-%C3%A9olienne-de-la-caract%C3%A9risation-du-gisement-%C3%A9olien-aux-technologies>
- [46] [www.hydroquebec.com/affaires/service-a-la-clientele/qualite-de-londe/](http://www.hydroquebec.com/affaires/service-a-la-clientele/qualite-de-londe/)
- [47] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>
- [48] [http://www.nellanotizia.net/scheda\\_it\\_1375\\_Siemens-entra-nel-mercato-prom\\_1.html](http://www.nellanotizia.net/scheda_it_1375_Siemens-entra-nel-mercato-prom_1.html)
- [49] <http://www.archiexpo.fr/prod/abb-ltd/product-82776-1309319.html>
- [50] <https://www.lenergieenquestions.fr/comment-fonctionne-une-centrale-biomasse/>

## ANNEXE A

Le réseau BT utilisé pour toutes les simulations a les caractéristiques suivantes :

➤ **Paramètres du poste source :**

Le réseau a été modélisé par une source de tension triphasée  $V_{\text{source}} = 20 \text{ kV}$ .

➤ **Paramètres du transformateur HT/BT :**

La configuration (couplage) du transformateur utilisé est :  $Yg - \Delta$ . Le tableau 2 présente les paramètres du transformateur :

**Tableau 2 :** Paramètres du transformateur HT/BT

Paramètre	Valeur
Puissance nominale (S)	160 kVA
Résistance de magnétisation ( $R_m$ )	3 750 $\Omega$
Inductance de magnétisation ( $L_m$ )	11 937 H
Enroulement primaire	
Tension au primaire ( $V_1$ )	20 kV
Résistance ( $R_1$ )	110.25 $\Omega$
Inductance ( $L_1$ )	0.889 H
Enroulement secondaire	
Tension au secondaire ( $V_2$ )	0.4 kV
Résistance ( $R_2$ )	0.001 $\Omega$
Inductance ( $L_2$ )	0.003 mH

➤ **Paramètres des lignes :**

Tout le réseau a été modélisé avec les mêmes paramètres de ligne, du poste source aux charges. Le tableau 3 illustre les caractéristiques des câbles.

**Tableau 3 :** Paramètres des lignes du réseau

Paramètre	Valeur
$r_1$ (Ohms/km)	0.01273
$r_0$ (Ohms/km)	0.3864
$l_1$ (mH/km)	0.9337
$l_0$ (mH/km)	4.1264
$c_1$ ( $\mu$ F/km)	0.01274
$c_0$ ( $\mu$ F/km)	0.007751

➤ **Modélisation des charges :**

Toutes les charges sont modélisées par des charges monophasées PQ (un circuit RL en série) variables de quelques kW avec  $\operatorname{tg}\phi = 0.4$ . Le tableau 4 présente les puissances active et réactive des charges.

**Tableau 4 :** Paramètres de charges du réseau BT

Charges					
Nœud	P (kW)	Q (kVar)	Nœud	P (kW)	Q (kVar)
N3	47	17.5	N10	7	2.6
N4	6.3	2.3	N11	7.3	2.7
N5	2.2	0.8	N12	4.2	1.6
N6	4.9	1.8	N13	7.2	2.7
N7	1.3	0.5	N14	6.3	2.3

## ANNEXE B

### ➤ Caractéristiques de l'éolienne :

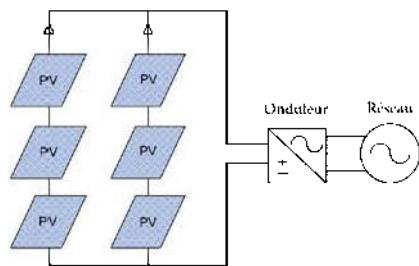
Les données caractéristiques du générateur d'énergie de type éolienne utilisé sont présentées dans le tableau 5.

**Tableau 5 :** Caractéristiques du producteur d'énergie de type éolienne

Paramètres	Valeur
Puissance apparente (S)	120 VA
Tension nominale au stator (V)	208 V
Courant maximal au stator (A)	0.33 A
Fréquence (f)	60 Hz
Vitesse de rotation (N)	120 rpm
Résistance statorique ( $r_a$ )	0.0198 pu
Réactance statorique ( $x_a$ )	0.0101 pu
Résistance de l'amortisseur axe D ( $r_D$ )	0.012 pu
Réactance de l'amortisseur axe D ( $x_D$ )	0.669 pu
Résistance de l'amortisseur axe Q ( $r_Q$ )	0.0073 pu
Réactance de l'amortisseur axe Q ( $x_Q$ )	0.1352 pu
Résistance homopolaire ( $r_h$ )	1
Réactance homopolaire ( $x_h$ )	1
Résistance de fuite ( $r_f$ )	0.1983 pu
Réactance de fuite ( $x''_d$ )	0.0295 pu
Réactance statorique ( $x_a$ )	0.0101 pu
Réactance mutuelle à l'axe d ( $x_d$ )	0.350 pu
Réactance mutuelle à l'axe q ( $x_q$ )	0.3417 pu
Réactance de Kany ( $x_{kfl}$ )	-0.0081 pu

## ANNEXE C

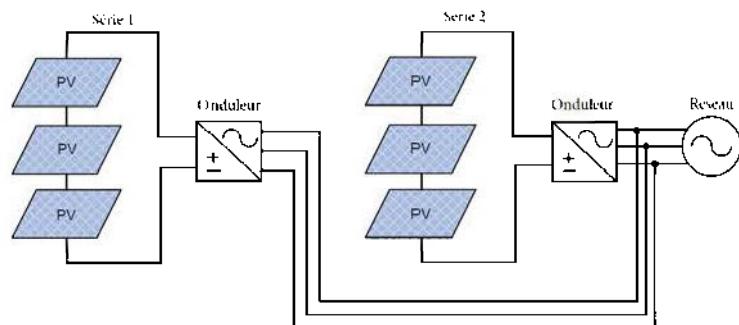
Il existe différents types de raccordement électrique de producteurs d'énergie de type panneau solaire. La figure 80 illustre plusieurs modules PV connectés en série au réseau via un onduleur.



**Figure 80 :** Modules PV connecté au réseau via un onduleur

Le principal avantage de cette configuration est que le coût n'est pas élevé en raison de la présence d'un seul onduleur. Par contre, l'inconvénient de ce raccordement est que les pertes de puissance peuvent être élevées en raison de la présence de diodes. De plus, cette configuration a un seul point de défaillance dans l'onduleur, par conséquent, il a moins de fiabilité.

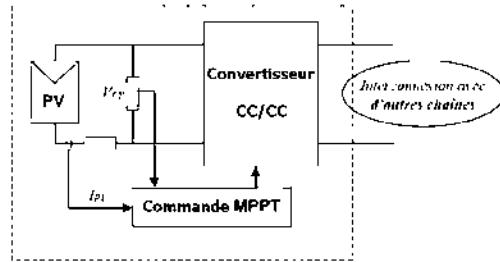
La figure 81 présente la configuration de deux groupes de PV connectés en série dans le réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur.



**Figure 81 :** Modules PV connecté en série au réseau via un onduleur

Le principal avantage de cette configuration est qu'il n'y a pas de pertes associées aux diodes. De plus, chaque série de PV peut être commandée séparément par la commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) afin d'atteindre le point de fonctionnement maximum de puissance. Ceci est particulièrement utile lorsque plusieurs PV sont installés sur des surfaces fixes dans plusieurs orientations (direction). Par contre, l'inconvénient de cette configuration est le coût élevé dû à l'ajout de plusieurs onduleurs [24] et [27].

Comme nous l'avons mentionné, afin de produire le maximum de puissance de la cellule, quel que soit le niveau d'éclairement, il faut intégrer la commande MPPT comme illustré sur le schéma montré à la figure 82.



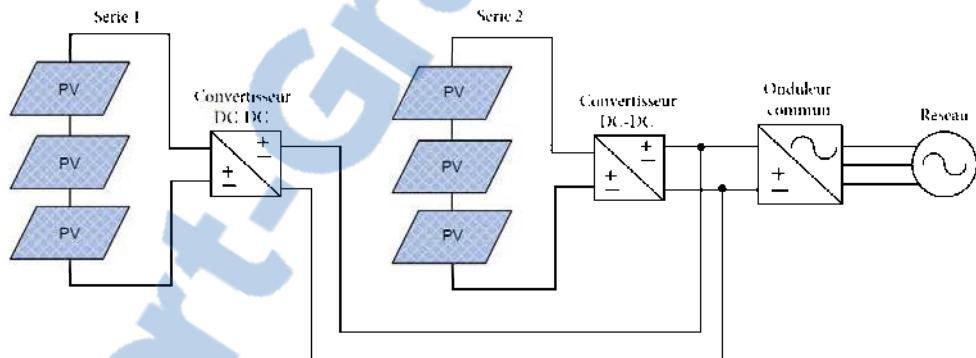
**Figure 82 :** Schéma d'un panneau PV avec son convertisseur cc/cc et sa commande MPPT

La commande MPPT permet de varier le rapport cyclique du convertisseur statique de telle sorte que, quelles que soient les conditions météorologiques (irradiation solaire et température), le système fonctionne à son point de puissance maximale ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) équivalent à  $V_{pmax}$  et  $I_{pmax}$ , afin d'extraire à chaque instant le maximum de la puissance disponible aux bornes du panneau PV. Cette commande MPPT maintient le fonctionnement du générateur photovoltaïque en optimisant la capture de l'énergie maximale en tout temps (matin, midi et soir; été et hiver).

D'ailleurs, plusieurs algorithmes ont été développés pour déterminer le MPPT. Parmi ces méthodes, on peut citer, notamment:

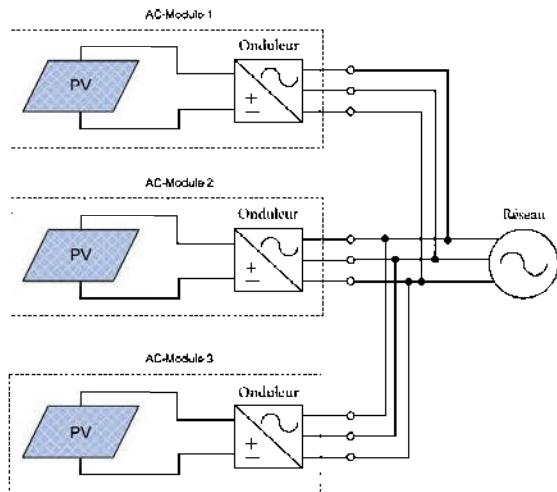
- la méthode «perturber et observer» (P&O), [26] [15];
- la méthode d'incrémentation de la conductance différentielle [11] [15];
- la logique floue (Fuzzy Logic Control) [10];
- la méthode à base des réseaux de neurones (Neural Network) [17] et [18];
- la méthode « Open Voltage » (OV) [31];
- la méthode « Constant Voltage » (CV) [31] et [15].

La figure 83 présente la configuration de deux groupes de PV connectés en série dans le réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC (élévateur de tension) qui permet d'amplifier la tension produite par les panneaux. Les deux groupes de PV sont ensuite raccordés au réseau via un onduleur commun.



**Figure 83 :** Modules PV reliés par un convertisseur DC-DC et connectés au réseau via un onduleur commun

La figure 84 illustre une configuration dans laquelle chaque module PV a son propre onduleur (DC-AC). Cette conception est également connue sous le terme « AC-module ».



**Figure 84 :** Modules PV reliés ensemble par des onduleurs (AC-Module)

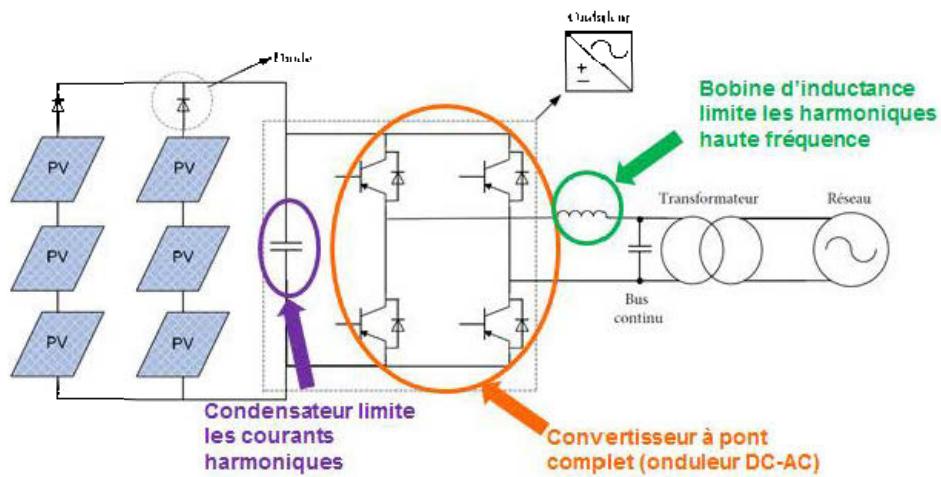
L'avantage de ce type de système est qu'il est facile d'ajouter plusieurs modules PV parce que chaque module possède son propre onduleur continu-alternatif (DC-AC). Tous les onduleurs sont connectés en série au réseau électrique (connexion des câblages extérieurs de chaque onduleur de courant-alternatif ensemble). De plus, cette configuration offre une amélioration globale de la fiabilité du système, car il n'y a aucune défaillance ponctuelle pour le système.

- Configuration des PV en utilisant un interfaçage à base d'électronique de puissance

La configuration des PV en utilisant l'électronique de puissance peut être classée selon le nombre d'étages de traitement de puissance, l'emplacement de condensateurs de puissance de découplage, l'utilisation des transformateurs et les types d'interfaces de réseau.

❖ Monophasé – seul niveau

La configuration la plus fondamentale pour un onduleur photovoltaïque est un système monophasé autonome à commutation comme représenté à la figure 85.



**Figure 85 :** Modules PV monophasé à seul niveau connectés au réseau via un transformateur

Le générateur photovoltaïque est raccordé à un condensateur de filtrage qui permet de limiter les courants harmoniques dans le réseau. La sortie du condensateur est connectée à un convertisseur à pont complet (onduleur DC-AC). La sortie de l'onduleur est reliée à une bobine d'inductance afin de limiter les harmoniques à haute fréquence injectées dans le système AC. Finalement, le producteur d'énergie de type PV est relié au réseau électrique par un transformateur d'isolement électrique. L'inconvénient de cette configuration est que tous les modules sont connectés au même dispositif MPPT. Cela provoque de graves pertes de puissance en cas d'ombrage partiel.

❖ Monophasé – multi niveau

Pour éviter l'utilisation des transformateurs à basse fréquence, qui sont considérés comme de mauvais composants principalement en raison de leur taille relativement importante et une faible efficacité, plusieurs niveaux (2 étages) sont utilisés pour les générateurs PV comme illustré à la figure 86.

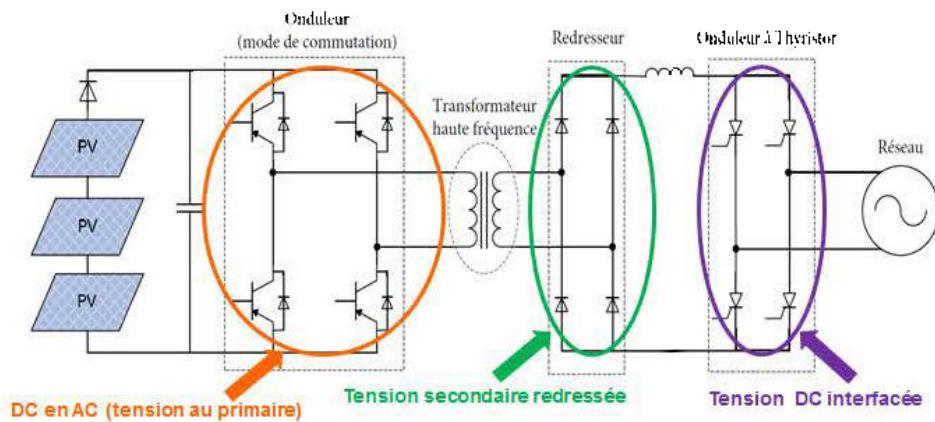


Figure 86 : Raccordement monophasé (multi niveau) de plusieurs PV

La tension continue (DC) de l'entrée est inversée pour produire une tension alternative (AC) à haute fréquence aux bornes du transformateur à haute fréquence (tension au primaire). La tension au secondaire du transformateur est redressée et la tension de la sortie (DC) produite est interfacée entre le redresseur et l'onduleur à thyristor.

❖ Triphasés

Pour les générateurs PV de plus de 10 kW, les onduleurs triphasés sont le plus souvent utilisés. De plus, toutes les configurations décrites pour la connexion de producteur PV monophasé peuvent être utilisées pour les configurations triphasées.

Encore une fois, l'isolation du réseau peut être réalisée soit à l'aide d'un transformateur de fréquence-ligne ou un transformateur haute-fréquence. Dans le cas d'un transformateur haute-fréquence, un convertisseur supplémentaire est nécessaire pour la conversion du DC de PV en AC (courant alternatif haute fréquence).

La figure 87 montre une configuration typique d'un onduleur PV triphasé en utilisant une ligne de fréquence de transformateur triphasé. La sortie en courant continu du générateur photovoltaïque est connectée à travers un condensateur de filtrage qui est raccordé à l'entrée d'une tension de source onduleur triphasé. La sortie de chaque phase des convertisseurs est connectée à une bobine d'inductance et condensateur pour limiter les harmoniques à haute fréquence injectées dans le système AC. Une tension de sortie alternative de synthèse est produite par une commande appropriée des interrupteurs. Un transformateur triphasé est ensuite utilisé pour connecter l'alimentation au réseau électrique.

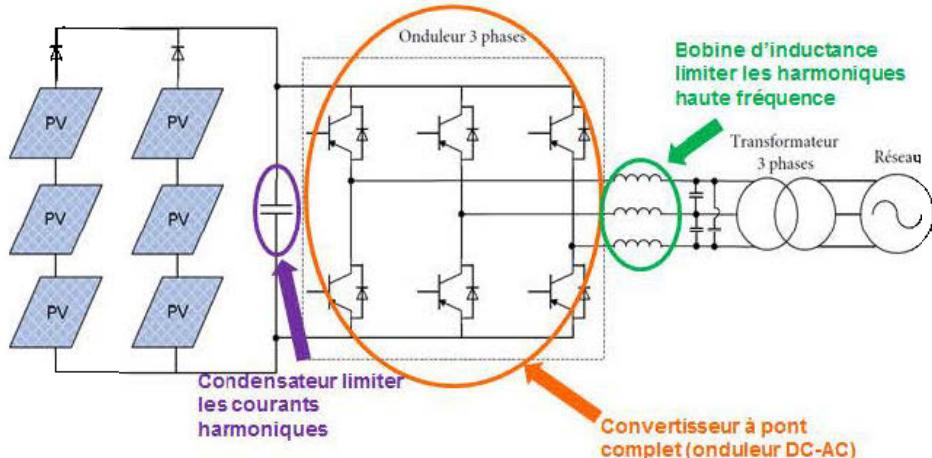
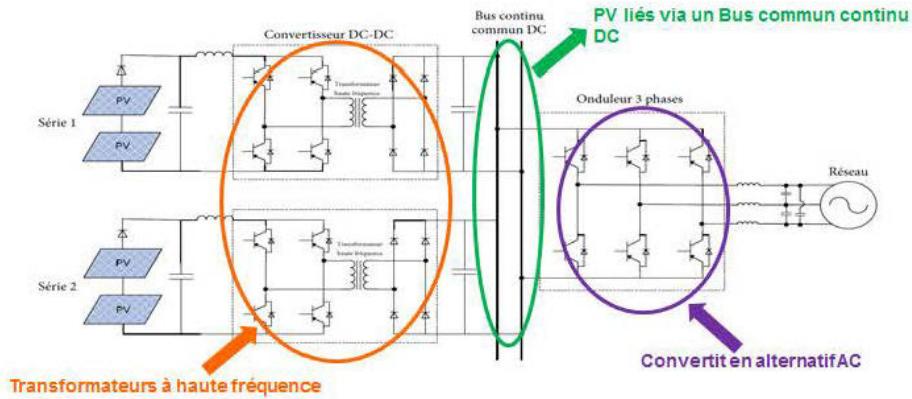


Figure 87 : Raccordement triphasé de plusieurs PV (transformateur triphasé)

Aujourd'hui, les onduleurs modernes ont tendance à utiliser un transformateur à haute fréquence pour l'isolation galvanique. Cette technologie est utilisée dans les nouveaux modèles technologiques tels que la carte de circuit imprimé intégré des

composants magnétiques (PCB) [27]. Une telle configuration est représentée à la figure 88.



**Figure 88 :** Raccordement triphasé de plusieurs PV (transformateur haute-fréquence)

Dans cette configuration, les transformateurs sont intégrés à haute fréquence dans les convertisseurs continu-continu (DC-DC). Les deux groupes de PV sont liés à l'aide d'un bus commun continu (DC) avant de se raccorder au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur triphasé (DC-AC).

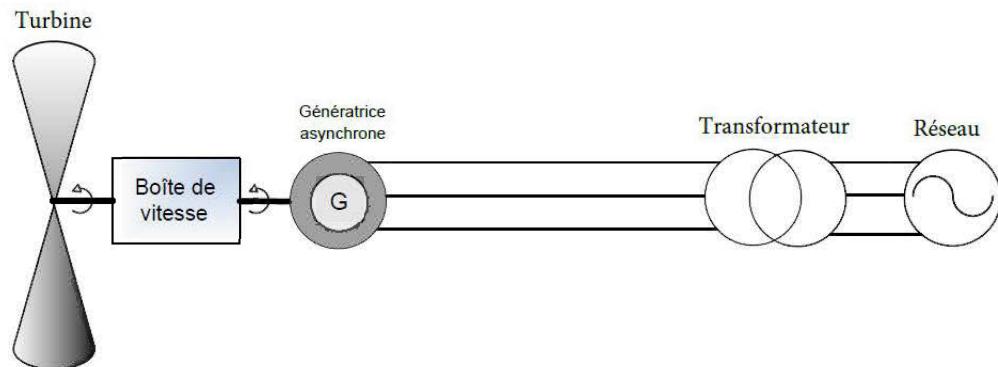
## ANNEXE D

La section suivante présente les configurations d'éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable les plus couramment utilisées. Il existe un grand nombre de concepts et de structures de chaînes de conversion éolienne. Nous n'allons présenter que trois principaux types de générateurs éoliens:

- ❖ Éolienne à vitesse fixe

Le rotor d'une éolienne à vitesse fixe possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique.

Ce type d'éolienne est couplé au réseau via une machine asynchrone (MAS) à rotor à cage comme illustré à la figure 89.



**Figure 89 :** Éolienne à vitesse fixe connectée au réseau via une génératrice asynchrone à cage

Pour ce type de configuration, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau électrique via un transformateur. Tandis que le rotor de l'éolienne est couplé au rotor de la machine asynchrone par le biais d'une boîte de

vitesse. Cette dernière, jumelée à un nombre de paires de pôles de la génératrice électrique, permet de déterminer une vitesse fixe d'opération.

❖ Éolienne à vitesse variable à couplage électronique par le stator

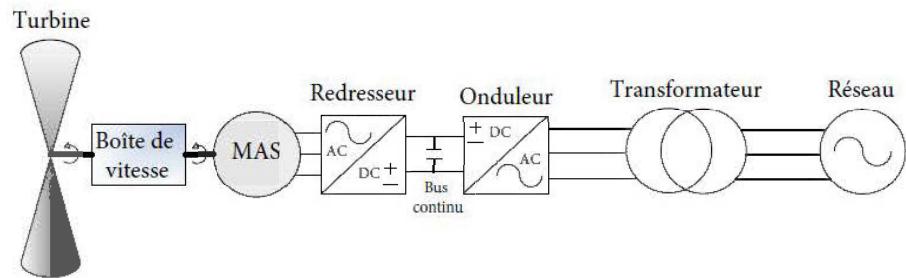
Pour ce type d'éolienne, la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe [23].

Les éoliennes à vitesse variable peuvent être classées en deux catégories, soient: les éoliennes avec convertisseur pleine puissance ou les éoliennes avec convertisseur de puissance partielle.

La configuration la plus simple est celle présentant des éoliennes avec convertisseur pleine puissance. Le principe est de découpler le stator de la génératrice électrique de la fréquence du réseau via le convertisseur de puissance. De cette façon, l'ensemble de la puissance électrique produite par la génératrice passe par le convertisseur de puissance. Typiquement, ce convertisseur de puissance est composé de deux convertisseurs dos-à-dos reliés par un bus à courant continu (DC). L'un est appelé le convertisseur de puissance côté génératrice (redresseur) et l'autre le convertisseur de puissance côté réseau (onduleur).

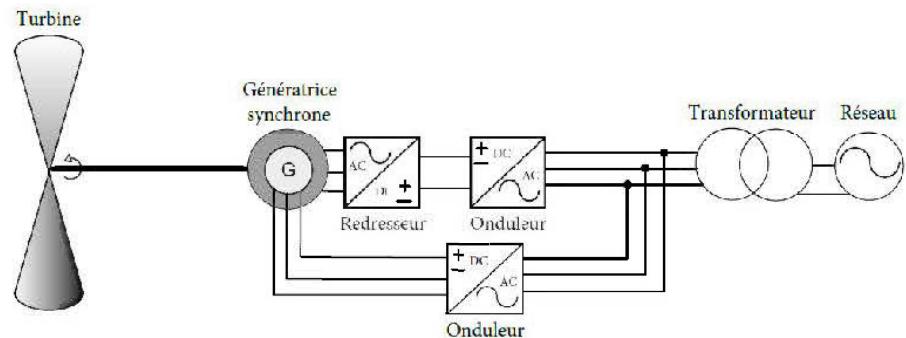
Les génératrices utilisées pour ce type de configuration sont la machine asynchrone à cage (figure 90), la machine synchrone avec un nombre élevé de pôles (figure 91) ou non (figure 92) et la machine synchrone à aimant permanent avec un nombre élevé de pôles (figure 93).

Pour ce qui est des machines asynchrones à cage, le rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse. Étant donné que la fréquence électrique de la machine est indépendante de la fréquence du réseau, la boîte de vitesse peut être réduite comparativement à une MAS utilisée à vitesse fixe ou une MASDA utilisée à vitesse variable comme présenté à la figure suivante :



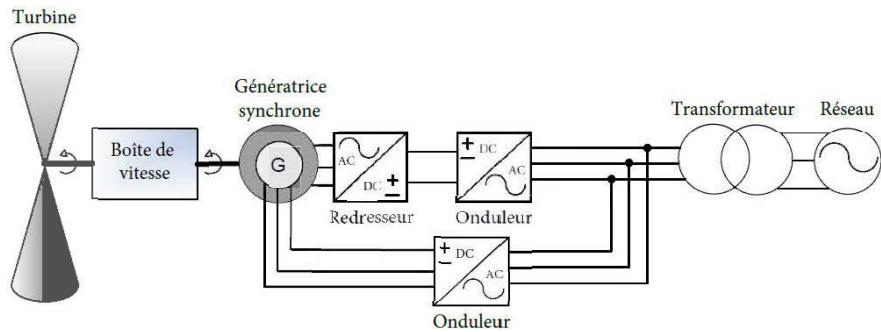
**Figure 90 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance

Pour les machines synchrones avec un nombre élevé de pôles, le rotor de la machine est directement couplé au rotor de la turbine. C'est ce qu'on appelle une transmission à attaque directe. La génératrice peut posséder un circuit d'excitation externe ou être auto-excitée comme illustré à la figure suivante :



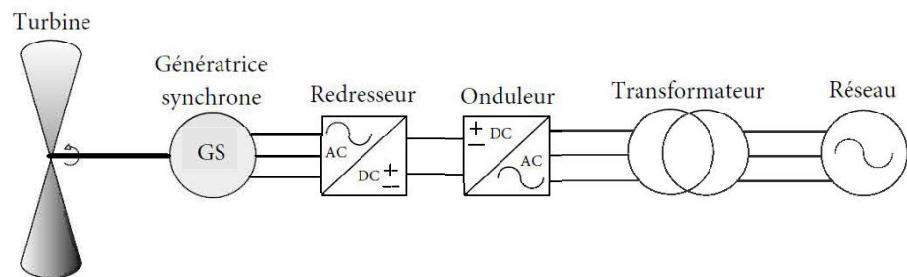
**Figure 91 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice synchrone à nombre élevé de pôles et un convertisseur pleine puissance

Au niveau des machines synchrones conventionnelles, elles doivent être composées d'une boîte de vitesse entre le rotor de la machine et le rotor de la turbine comme montré à la figure suivante :



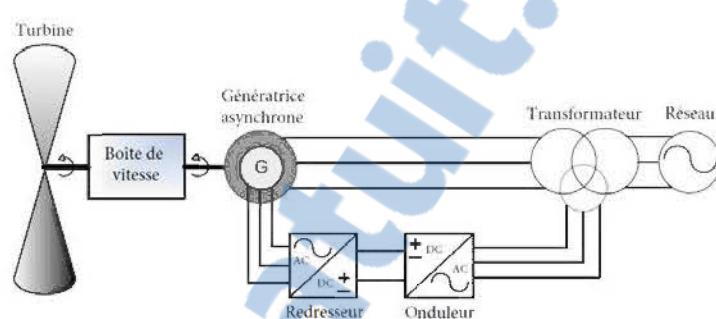
**Figure 92 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice synchrone et un convertisseur pleine puissance

Pour les machines synchrones à aimants permanents, le rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse ou non. Ceci dépend du nombre de paires de pôles de la machine. Par contre, le circuit d'excitation de la machine n'est plus nécessaire à cause de la magnétisation permanente de la génératrice comme illustrée à la figure 93.



**Figure 93 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance

Les éoliennes à vitesse variable équipé d'un convertisseur de puissance partiel sont composées de génératrices asynchrones à double alimentation (MASDA). Cette configuration est également reconnue sous l'expression « *Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)* » comme illustré à la figure 94.

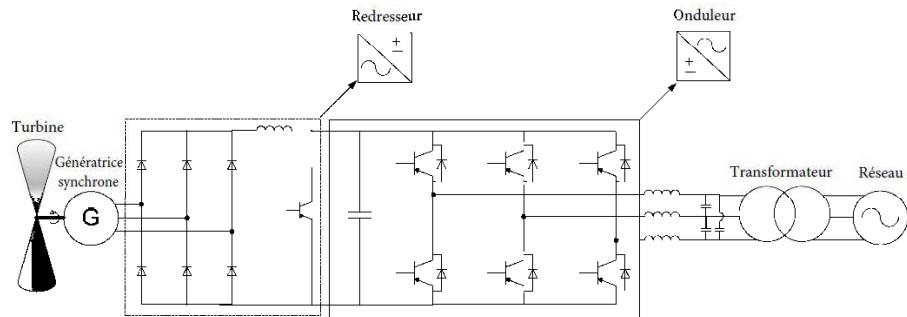


**Figure 94 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice asynchrone à double alimentation (MASDA)

Dans cette configuration, le stator de la machine est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté via un convertisseur de puissance au réseau. Une boîte de vitesse joue le rôle de couplage entre la vitesse du rotor de la turbine et le rotor de la machine asynchrone. Ceci permet d'avoir une vitesse variable autour de la vitesse de synchronisme de la génératrice.

- Configuration des éoliennes en utilisant un interfaçage à base d'électronique de puissance

Une configuration typique d'électronique de puissance pour un générateur synchrone à aimant permanent est représentée à la figure 95.



**Figure 95 :** Éolienne à vitesse variable connectée au réseau via une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance

La variation de la tension triphasée et la variation de la fréquence à la sortie de la turbine éolienne sont redressées au moyen d'un convertisseur à pont de diodes. Avec la variation de la vitesse du générateur synchrone, la tension continue (DC) côté redresseur varie aussi.

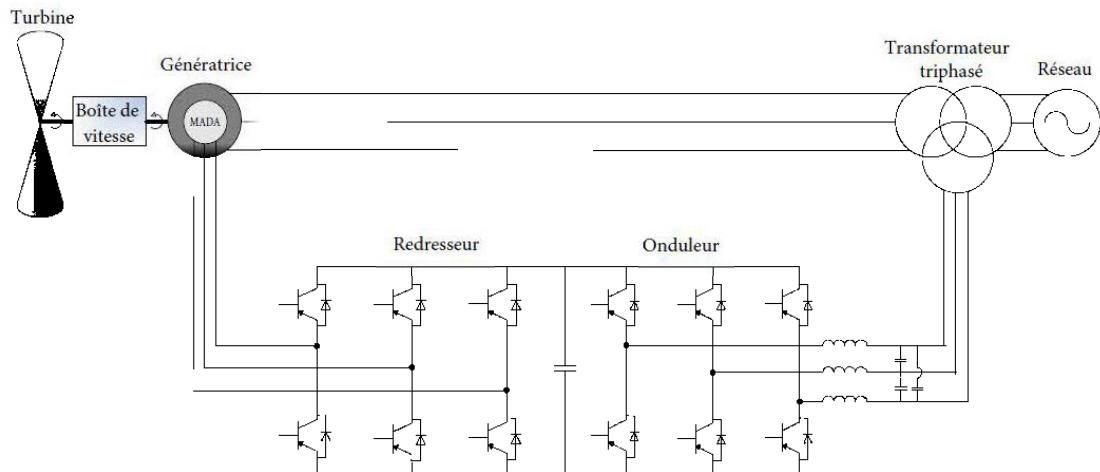
Afin de maintenir une tension de l'inverseur du circuit intermédiaire constante, un hacheur élévateur de tension est utilisé pour adapter la tension du redresseur. Ce signal de sortie redressé à l'aide d'un pont de diodes est filtré dans une forme d'onde lisse à courant continu (DC) en utilisant un grand condensateur.

Le signal de courant continu (DC) est ensuite inversé sous forme d'onde triphasée au moyen de commutateurs semi-conducteurs. Ce signal est ensuite converti en alternatif (AC) avant d'être injecté dans le réseau via un transformateur triphasé.

Cette configuration fournit d'excellentes caractéristiques contrôlables pour le système de l'énergie éolienne. Ce type de convertisseur de puissance permet un contrôle rapide de la puissance active et réactive.

La figure 96 présente une autre configuration d'électronique de puissance pour un générateur électrique MADA. Cette configuration se compose d'un convertisseur PWM à base d'IGBT (AC-DC-AC). L'enroulement de stator est relié directement au

réseau tandis que le rotor est alimenté à une fréquence variable dans le convertisseur (AC-DC-AC).



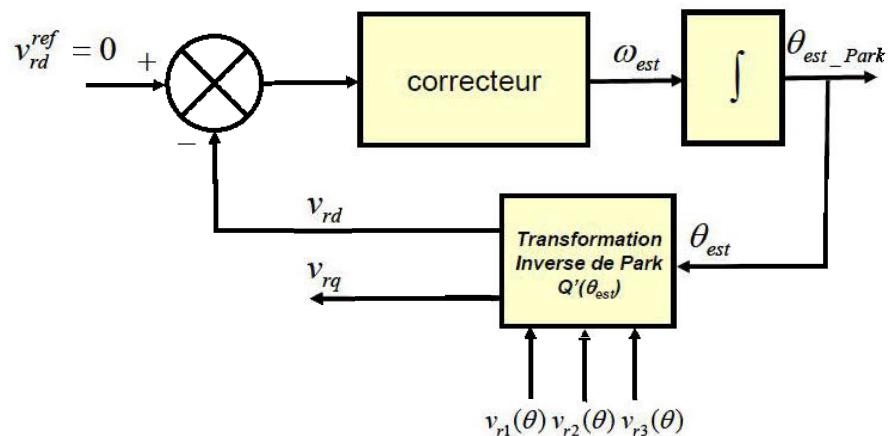
**Figure 96 :** Générateur électrique MADA composé d'un convertisseur PWM à base d'IGBT (AC-DC-AC) raccordé au réseau via un transformateur triphasé

Typiquement, cette configuration utilise un dispositif convertisseur de puissance qui est composé de deux convertisseurs dos-à-dos reliés par un bus à courant continu (DC) pour le transfert de puissance. L'un est appelé le convertisseur de puissance côté génératrice (redresseur) et l'autre le convertisseur de puissance côté réseau (onduleur). Le côté courant alternatif du redresseur (AC) est raccordé au rotor de la machine à induction par l'intermédiaire des bagues collectrices; la sortie de l'onduleur est liée au réseau électrique au moyen d'un transformateur triphasé. Ce système peut être classé en tant que fréquence constante à vitesse variable. La configuration MADA est généralement utilisée dans les éoliennes de plus de 1 MW.

## ANNEXE E

### ➤ La boucle à verrouillage de phase (PLL) dans le cas d'un réseau triphasé dans le domaine de Park :

La méthode la plus répandue pour les systèmes triphasés est celle basée sur la transformation dans le référentiel de Park des tensions mesurées sur le réseau. La boucle à verrouillage de phase réalise l'asservissement d'un angle de phase arbitraire à l'angle de référence  $\theta$ . Le schéma de principe de la PLL dans le domaine de Park est illustré à la figure suivante :



**Figure 97 :** Schéma de principe de la PLL triphasé dans le domaine de Park

Dans le cas d'un système équilibré, la tension du système triphasé de tension s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{cases} v_{r1}(t) = \sqrt{2}V \sin(\theta) \\ v_{r2}(t) = \sqrt{2}V \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{r3}(t) = \sqrt{2}V \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (E.1)$$

Le principe de base de la PLL triphasé consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe  $d$  générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park ( $\theta_{est}$ ). En régime établi, l'angle  $\theta_{est}$  est égal à l'angle du réseau  $\theta$ .

L'application de la transformation inverse de Park d'angle  $\theta_{est}$  sur le système de tension triphasé du réseau d'angle  $\theta$  conduit aux expressions suivantes pour  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$  :

$$v_{rd,q} = \begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V \begin{bmatrix} \sin(\theta - \theta_{est}) \\ -\cos(\theta - \theta_{est}) \end{bmatrix} = \sqrt{3}V \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta) \\ -\cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{E.2})$$

Avec  $\Delta\theta = \theta - \theta_{est}$ , on constate qu'il s'agit d'un système non linéaire.

## ANNEXE F

### ➤ Caractéristique du panneau solaire :

Les données caractéristiques du générateur d'énergie de type panneau solaire sont présentées dans le tableau 6.

**Tableau 6 :** Caractéristiques du producteur d'énergie de type panneau solaire

Paramètre	Valeur
Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )	36.8 V
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	8.45 A
Nombre total de cellules en série ( $N_s$ )	72
Nombre total de cellules en parallèle ( $N_p$ )	1
Température d'opération ( $T_c$ )	25°C
Irradiation (G)	1 000 W/m <sup>2</sup>
Constante de Boltzman (k)	1.38 x 10 <sup>-23</sup> J/K
Charge de l'électron (q)	1.6 x 10 <sup>-19</sup> C
Facteur de qualité de la diode (A)	1.6
Coefficient de température ( $k_t$ )	0.0017 A/K
$R_s$	0.1 Ω
$R_{sh}$	0.080 Ω