



HAL
open science

**CONTROLE DE TENSION AUTO ADAPTATIF
POUR DES PRODUCTIONS DECENTRALISEES
D'ENERGIESCONNECTEES AU RESEAU
ELECTRIQUE DE DISTRIBUTION**

Guillaume Rami

► **To cite this version:**

Guillaume Rami. CONTROLE DE TENSION AUTO ADAPTATIF POUR DES PRODUCTIONS DECENTRALISEES D'ENERGIESCONNECTEES AU RESEAU ELECTRIQUE DE DISTRIBUTION. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français. NNT: . tel-00160675

HAL Id: tel-00160675

<https://theses.hal.science/tel-00160675>

Submitted on 6 Jul 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Un petit avant propos en guise d'introduction à ces travaux de thèse mais de manière un peu plus personnelle. Cette thèse a été réalisée au sein du GIE IDEA (Groupement d'Intérêt Economique entre EDF, Schneider Electric et l'INPG) dans l'équipe SYREL du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.

Je voudrais remercier mes encadrants Nouredine Hadjsaid et Tuan Tran-Quoc pour m'avoir permis de travailler sur un sujet intéressant. Merci Tuan pour ta grande confiance et ta sympathie.

Ces travaux ont été réalisés avec les contributions de David Hinaux, Boris Berseneff et Diana Mincu, lors de leur master de recherche ou de leur projet de fin d'étude. Je les remercie donc pour leur aide, ça a été un réel plaisir de travailler avec eux.

Merci également aux partenaires industriels d'avoir suivi le projet avec intérêt. Je remercie en particulier Etienne Monnot et Gilles Malarange d'Electricité de France ainsi qu' Antonio Almeida de Schneider Electric.

Je remercie Florence Martin et Julie Laur pour leur soutien pendant ma thèse et après mon départ, en particulier pour l'organisation de ma soutenance.

Merci les amis... Ces trois années auront été riches en rencontres. Je voudrais donc saluer : toute l'équipe des habitués du D055, Guillaume.V, Alexandre, Benjamin, Mariya, Lora, Nataliya, Franck, Guillaume.L, Ady, Hervé, Corinne, Jpeg, Kiki, Raph, les grands musiciens du LEG (Ibbysh ou autres, mais Bbysh quand même !), Chaby mon éternel « copain de pot », Nicolas, Stéphane, Antoine, Yvan ainsi que les « CDI », Bertrand mon vieux « coloc », Vince des « Dox » et Dimitrios.

Merci d'avoir partagé appartement, groupes de musique, bureau, équipe de foot, virées en moto, soirées, repas, verres et d'avoir su rendre ces trois années très amusantes.

Merci enfin et surtout à ma famille pour m'avoir soutenu, conseillé et donné les moyens de concrétiser cette thèse. Merci à ma Solenne pour son support et ses encouragements quotidiens.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Le réseau électrique et les problèmes de réglage de la tension sur la distribution en présence de PDE	5
I Introduction.....	7
II Le réseau électrique français.....	8
II.1 Le réseau électrique et son rôle.....	8
II.1.a Les réseaux de transport et de répartition.....	9
II.1.b Le réseau de distribution.....	10
II.2 Les réglages de tensions.....	10
II.2.a Le réglage primaire.....	12
II.2.b Le réglage secondaire.....	12
II.2.c Le réglage tertiaire.....	13
II.2.d La compensation locale d'énergie réactive.....	13
III La production décentralisée d'énergie électrique connectée aux réseaux électrique de distribution.....	18
III.1 Les moyens de productions d'énergie.....	18
III.1.a Les piles à combustibles.....	18
III.1.b Les moteurs à combustibles fossiles.....	19
III.1.c Les panneaux solaires.....	19
III.1.d Les éoliennes.....	20
III.2 Mise en évidence des problèmes de tensions induits par l'insertion de PDE sur les réseaux de distribution.....	21
III.2.a Les surtensions induites par la connexion d'une PDE.....	21
III.2.b Problème de génération en aval d'un transformateur régleur en charge.....	23
III.2.c Illustration en simulation du problème de surtension.....	24
III.3 Solution pour le réglage de tension.....	26
III.3.a Utilisation spécifique des PDE.....	27
III.3.b Contrôles innovants de tension sur les réseaux de distribution grâce aux PDE.....	28
IV Conclusions.....	30

Chapitre II : Modélisation et contrôle de productions décentralisées d'énergie	31
I	Introduction.....33
II	La problématique de simulation.....33
II.1	La simulation : pourquoi ?.....33
II.2	Les logiciels utilisés pour réaliser les études.....34
II.3	La problématique de modélisation.....34
III	Modélisation de PDE utilisant un interfaçage à électronique de puissance.....35
III.1	Présentation du système.....35
III.2	Hypothèses de modélisation.....37
III.2.a	Simplifications des dynamiques.....37
III.2.b	Considération des limitations.....37
III.3	Contrôle de production en puissance (P/Q).....39
III.3.a	Présentation du modèle.....39
III.3.b	Tests et comparaisons du modèle.....42
III.4	Contrôle de production en puissance active et tension (P/V).....43
III.4.a	Présentation du modèle.....43
III.4.b	Tests et comparaisons du modèle.....46
IV	Modélisation de PDE de type génératrice synchrone.....48
IV.1	Présentation du système.....48
IV.2	Hypothèses de modélisation.....48
IV.2.a	Simplifications des dynamiques.....48
IV.2.b	Considération des limitations.....49
IV.3	Modèle de contrôle de production en puissance (P/Q).....50
IV.3.a	Présentation du modèle.....50
IV.3.b	Test par simulations.....50
IV.4	Modèle de contrôle de production en puissance active et tension (P/V).....51
IV.3.a	Présentation du modèle.....51
IV.4.b	Test par simulations.....52
V	Conclusions.....52

Chapitre III : Développement des régulateurs intelligents de tension pour des générations d'énergie dispersées.....55

I	Introduction.....57
II	Développement du régulateur adaptatif de tension.....57
II.1	Problématique du contrôle local de tension.....57

II.2	Régulateur adaptatif de tension.....	59
II.2.a	Principe de fonctionnement du correcteur adaptatif.....	60
II.2.b	Test du régulateur adaptatif de tension.....	61
II.2.b.1	Test pour des PDE contrôlées en tangente phi...62	
II.2.b.2	Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur adaptatif.....	63
II.3	Mise en place des modes de régulation du correcteur adaptatif.....	64
II.3.a	Principe de fonctionnement.....	64
II.3.b	Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur adaptatif deuxième version.....	66
III	Développement du régulateur auto adaptatif de tension.....	68
III.1	Introduction à la logique floue.....	69
III.1.a	Principe.....	69
III.1.b	La fuzzification.....	71
III.1.c	L'inférence.....	72
III.1.d	La défuzzification.....	74
III.2	Développement du régulateur auto adaptatif de tension.....	75
III.2.a	But du régulateur auto adaptatif.....	75
III.2.b	L'algorithme du superviseur flou.....	76
III.2.b.1	Fuzzification des mesures de puissance réactive et de tension.....	76
III.2.b.2	Etape d'inférence ou élaboration du noyau de réflexion flou.....	77
III.2.b.3	Etape de défuzzification.....	79
III.2.c	Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur auto adaptatif..	82
IV	Conclusions.....	83

Chapitre IV : Validation par simulation et sur un cas pratique du régulateur auto adaptatif.....85

I	Introduction.....	87
II	Performances du régulateur auto adaptatif de tension sur un réseau HTA.....	87
II.1	Simulation sur un réseau HTA alimenté via un transformateur avec prises réglables en charge.....	88
II.1.a	Contrôle en tangente phi des productions.....	89
II.1.b	Productions contrôlées avec le régulateur auto adaptatif.....	91
II.2	Simulation d'une production de type intermittente contrôlée avec le régulateur auto adaptatif.....	93
III	Expérimentation en temps réel et contrôle d'un onduleur.....	96

III.1	Présentation.....	96
III.2	Simulation temps réel.....	97
III.2.a	Présentation de l'architecture de test.....	97
III.2.b	Réalisation des expérimentations entre AreneURT et dSPACE...98	
III.2.b.3	Test du contrôle P/Q.....	98
III.2.b.3	Test du contrôle P/V.....	99
III.2.b.3	Test du contrôle adaptatif.....	100
III.3	Contrôle d'un onduleur de tension par le régulateur auto adaptatif.....	102
III.3.a	Résultats expérimentaux.....	104
IV	Conclusions.....	107
Chapitre V : Comparaison de méthodes de régulation de tension locale et coordonnée.....		
		109
I	Introduction.....	111
II	Le contrôle de tension coordonné sur le réseau de distribution.....	111
II.1	Principe du contrôle.....	111
II.2	Détermination des consignes de tension pour les groupes de productions.....	112
III	Cas d'étude pour la comparaison des contrôles en tension local et coordonné...115	
III.1	Modélisation des PDE et de leurs contrôles.....	115
III.2	Caractéristique du réseau de distribution de l'étude.....	116
IV	Comparaison des contrôles de tension local et coordonné.....	118
IV.1	Simulations et comparaisons pour des cas de faible et moyenne charge.118	
IV.2	Simulations et comparaisons pour des cas d'une forte charge.....	124
V	Conclusions.....	126
Conclusions.....		129
Perspectives.....		133
Bibliographie.....		137
Annexes.....		145
	Annexe I : Le mode Batch.....	147
	Annexe II : Détail des simulations du chapitre III.....	149
	Annexe III : Réseaux utilisés lors des simulations.....	153
	Annexe IV.....	159
I	Comparaison des méthodes d'inférence.....	159
II	Comparaison des méthodes de défuzzification.....	165

Introduction générale

Le marché de l'électricité est en pleine mutation. Anciennement un monopole d'état en France, celui-ci s'ouvre à la concurrence et l'organisation de ce secteur change profondément. En effet, diverses fonctions relatives à ce domaine se décentralisent, et sont jouées par des acteurs distincts (distributeur, producteur, commerçant, régulateur, etc.), cette décentralisation est également appelée « unbundling » [STER-2005]. Cette libéralisation permet donc à un producteur lambda, après une étude de raccordement préalable, de produire et de vendre son énergie sur le marché. Ainsi, il apparaît une multiplication de producteurs indépendants.

Il faut ajouter à cela la volonté de promouvoir la production d'électricité à base d'énergie renouvelable. En effet, en accord avec le protocole de Kyoto fixant à 21% la part d'électricité produite à base d'énergie renouvelable, dans le but d'éliminer les gaz à effet de serre, la commission européenne c'est fixée des orientations à court terme pour le développement de ces énergies. [Directive-2001].

Ainsi, différentes technologies de productions d'énergie sont d'hors et déjà disponibles pour atteindre ces objectifs comme les éoliennes, les panneaux solaires, les centrales de cogénération d'électricité et de chaleur, etc. Cette nouvelle donne économique va, par le biais de ces Productions Décentralisées d'Energies (PDE), venir impacter le fonctionnement du réseau électrique de distribution. En effet, au schéma classique, avec une production en amont de la distribution, s'ajoute la connexion de ces PDE, qui de par leur puissance, est réalisée sur le réseau de distribution. Il est à prévoir que cette production d'énergie va tendre à s'accroître dans les années à venir, amenant avec elle un problème d'intégration dans le réseau actuel de la distribution.

L'impact de ce type de générations sur le fonctionnement du réseau n'est pas négligeable et celles-ci amènent des problèmes de réglage de protections, de qualité d'énergie, de contrôle de la tension, etc [CANA-2000] [IEEE-2003]. Il convient donc de rechercher des solutions innovantes à ces problèmes. Les travaux présentés dans ce mémoire se focalisent sur les problèmes de tension dus à l'introduction de productions au niveau de la distribution.

La production sur le réseau de distribution n'étant pas observable, les méthodes de contrôle de tension existantes sur le transport ne sont pas directement applicables sans investissements lourds en matériels de mesures, de transmissions et de traitements de l'information. L'effacement des problèmes de tension est envisagé par la participation des PDE aux réglages. Ainsi, un contrôle local de la puissance réactive des productions est développé pour une gestion globale du plan de tension sur le réseau. Chaque PDE est contrôlée de manière indépendante, sans communication, ni organe de coordination.

Les travaux seront donc développés en cinq chapitres:

Le premier chapitre expose une présentation des acteurs de l'étude à savoir, les réseaux électriques ainsi que les différentes technologies de PDE envisagées dans le cadre de ces travaux. Les réglages de tension existants sur ces réseaux ainsi que les moyens de contrôles actuels de PDE seront également développés.

Dans le deuxième, nous développerons les hypothèses ainsi que les méthodes qui nous ont servi à modéliser les deux types de productions envisagées, à savoir : les productions interfacées avec le réseau via de l'électronique de puissance, et les productions raccordées au réseau sans interface d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre explique les différentes étapes du développement des régulateurs de tension intelligents pour ces PDE.

Le quatrième chapitre détaille le fonctionnement de ce régulateur sur plusieurs scénarii, mais également des travaux validateurs de la stratégie de régulation sur un cas expérimental.

Une comparaison entre une approche de contrôle de PDE coordonné et cette méthode locale sera faite dans le cinquième chapitre.

Chapitre I : Le réseau électrique et les problèmes de réglage de
la tension sur la distribution en présence de PDE

I Introduction

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système. Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau de distribution.

Le contexte actuel de la libéralisation du marché de l'électricité a provoqué un bouleversement dans la manière de gérer et d'exploiter le réseau électrique. Par ailleurs, l'ouverture du marché aux petits producteurs indépendants, sur le réseau de distribution, n'engendre pas de problèmes significatifs tant que le nombre de connexion de ces productions d'énergie dispersées (PDE) au réseau reste marginal [LEME-1999]. Cependant, il est fort probable que dans les années à venir ce nombre tende à s'accroître considérablement.

Or le réseau de distribution, conçu pour assurer le transit d'énergie du réseau amont vers les consommateurs et pour fonctionner sur la base de flux de puissance unidirectionnels, n'est pas prévu pour accueillir ces PDE à grande échelle. Le nombre de producteurs allant croissant sur ce réseau, les circulations de flux de puissance initiales vont changer et vont être à l'origine de problèmes divers perturbant le bon fonctionnement du réseau d'électricité [FOOT-2001], [CANA-2000].

Ce chapitre expose le contexte des études qui vont être développées pour résoudre le problème de tension sur le réseau de distribution en présence de PDE. Un premier axe présente le réseau électrique de distribution, ses spécifications en tension et les contrôles existants pour les maintenir.

Le deuxième axe du présent chapitre traite de l'arrivée des PDE sur le réseau électrique. Les technologies de source d'énergie ainsi que les problèmes engendrés par la connexion de celles-ci vont être illustrés. Cette thèse s'attachant au problème de tension ; celui-ci sera illustré. Par la suite une vision des différentes solutions proposées sera développée.

II Le réseau électrique français

II.1 Le réseau électrique et son rôle

Le réseau électrique français est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs

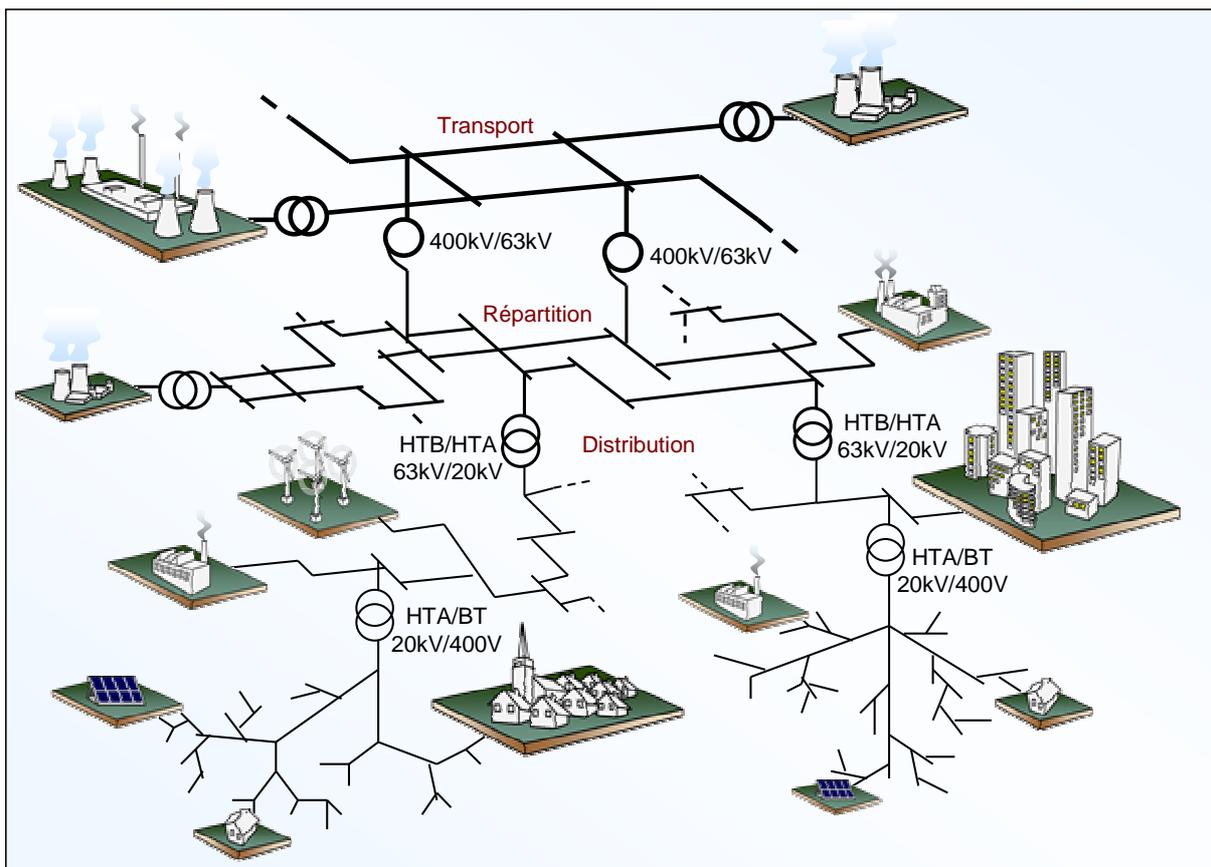


Figure I - 1 : Le réseau électrique français

Avec une capacité de production de l'ordre de 115000MW est une consommation de pointe de 86000MW, le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs [RTE-2004].

La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs. [RTE-2004]

L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale [CAIR-2004].

Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché européen de l'électricité.

II.1.a Les réseaux de transport et de répartition

La première de ces divisions est le réseau de transport (400kV, 225kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB). Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires de l'ordre du millier de mégawatts assurant 80% de la production électrique française. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une productions, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale.

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition (63kV, 90kV), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.

La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée. Des mesures de puissances active et réactive et de tension sont effectuées sur le réseau et sont rapatriées aux centres de téléconduite. Ces mesures sont ensuite

disponibles aux opérateurs en charge du bon fonctionnement du réseau ainsi que de la coordination des productions. L'opérateur en charge du bon fonctionnement de ces réseaux est le gestionnaire du réseau de transport, le RTE (Réseau de Transport d'Electricité), cette entité exploite et entretient le réseau public de transport français.

II.1.b Le réseau de distribution

La troisième et dernière subdivision est le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée une structure radiale est une structure arborescente. Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée. Le réseau électrique français a été conçu et dimensionné pour fonctionner avec les productions de fortes puissances connectées sur le réseau de transport ou de répartition, délivrant ainsi un flux de puissance unidirectionnel de la production (transport) à la consommation (distribution). Nous montrerons plus loin dans ce chapitre qu'à cause de l'apparition de générations d'énergie sur la distribution, ce flux de puissance peut devenir bidirectionnel provoquant ainsi des problèmes de fonctionnement de certains équipements du réseau (protections, régulateurs en charge, etc) et amenant une problématique de réglage de la tension.

Avant d'illustrer les conséquences néfastes de l'arrivée des PDE sur ce système, voyons quels sont les moyens de gestions disponibles aux opérateurs et permettant de garantir la continuité de service de réseau.

II.2 Les réglages de tension

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de l'exploitation du réseau tant du point de vu du consommateur, dont certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences ou de tensions fixes, que du point de vu de l'exploitant puisqu'un contrôle efficace de tension et de fréquence garanti une bonne qualité et une bonne continuité de service.

En France les valeurs de tension et de fréquence nominales ainsi que leurs déviations maximales sont fixées par la norme [NF 50160] et [Arrêté-1986] pour la tension ainsi que par

l'UCTE (Union pour la Coordination de la Transmission d'Electricité) pour la fréquence [UCTE-2003]. Ceux-ci fixent la plage de variation limites en tension devant être respectées en chaque point de livraison ainsi que le limites de fonctionnement au delà des quelles des systèmes de coupure telles que les protections de découplage doivent intervenir.

Pour le cas des réseaux de distribution, les limites de fonctionnement sont données par le Tableau I - 1 [NF 50160] [Arrêté-1986]. Une des problématiques principales du travail présenté dans cette thèse sera le respect de ces conditions de fonctionnement sur un réseau accueillant un fort taux de pénétration de PDE.

	Tensions et fréquences nominales	Déviations maximales de tension autorisées	Marges de variations de fréquence autorisées
BT	$U_n=400V$ $f_n=50Hz$	+6% -10%	$\pm 0,05$ Hz
HTA	$U_n=20kV$ $f_n=50Hz$	$\pm 5\%$	$\pm 0,05$ Hz

Tableau I - 1 : Limites de fonctionnement du réseau de distribution [NF 50160] [Arrêté-1986].

En France, la hausse de la tension, induite par l'installation de production, doit permettre de maintenir, en tout point de livraison du réseau, la tension à l'intérieur de la plage: 400V -10% et +6% en BT et 20 kV -5% à +5% en HTA. Nous appellerons ces plages "fenêtres d'admissibilités". Les caractéristiques de ces fenêtres sont liées à des critères aussi bien techniques (saturation des transformateurs, échauffement des conducteurs) qu'économiques (durée de vie de certaines charges).

Les variations de puissances consommées sur le réseau sont inévitables et dépendantes de plusieurs facteurs comme la période de la journée, les saisons ou encore les secteurs de consommations (tertiaires, industriels ou résidentiels). Or, cet équilibre entre la production et la consommation est un facteur de fluctuation de l'onde de tension. Ainsi, plus la production est importante par rapport à la consommation plus la tension sera élevée et inversement. La tension évolue donc également en permanence, le paragraphe suivant expose quels sont les dispositifs de réglage permettant de conserver la tension dans les limites admissibles définies dans le Tableau I - 1.

Les charges présentes sur le réseau électrique consomment une certaine quantité de puissance active mais également une part plus ou moins importante de puissance réactive selon leurs types et leurs caractéristiques. Cette puissance réactive appelée est en partie fournie par les groupes de productions connectés au réseau de transport ou encore par des dispositifs de

compensations d'énergie réactive. Cependant, le transit de puissance réactive n'est pas idéal. En effet, pour ce niveau de tension, les lignes ont un caractère plus inductif que résistif, le transit de puissance réactive induit donc de forte chute de tension. De plus, le fait de faire transiter de la puissance réactive dans une ligne diminue la puissance active maximale transmissible par celle-ci [RTE-2004]. Ainsi le contrôle de la tension sur un réseau s'effectue non seulement par les groupes de productions, grâce à des réglages hiérarchisés primaire secondaire et tertiaire, pour les réseaux HTB, mais aussi par des dispositifs de compensation de puissance réactive, placés au plus près de la consommation pour éviter les transits élevés de puissance réactive dans le réseau de transport vers le réseau de distribution. Il est intéressant de comprendre ces mécanismes de contrôles en tensions existants pour connaître quels sont les acteurs de ce contrôle, et les méthodes de réglages à intégrer ou à comparer pour la création d'un régulateur pour PDE.

II.2.a Le réglage primaire de tension [CRAP-1-2003]

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipés d'un régulateur primaire de tension. Grâce à ce régulateur les alternateurs fixent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Le principe est d'agir sur l'excitation d'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance réactive ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Inversement, dans le cas d'une sous excitation de l'alternateur celui-ci va absorber de la puissance réactive et donc faire diminuer la tension à ses bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur.

II.2.b Le réglage secondaire de tension [CRAP-1-2003]

Comme pour la fréquence les réglages primaires sont réalisés de manière locale par chacun des groupes de production concernés. Ils agissent rapidement mais doivent être coordonnés pour éviter toute dérive ou encore pour optimiser le fonctionnement de groupes proches et éviter que certains fournissent trop de puissance réactive pendant que d'autres n'en fournissent pas ou pire en absorbent, c'est le rôle du réglage secondaire de tension (RST).

Ce réglage de tension est envisagé par région ou zone. Ces zones sont des parties de réseau dont les évolutions du plan de tension sont sensiblement différentes. Sur cette zone est défini un nœud particulièrement représentatif de l'évolution de la tension, ce nœud est appelé « point pilote ». Le principe du RST est de réguler la tension en ce point pilote du réseau en agissant sur les productions de puissance réactive des groupes participants au réglage. Les

mesures de tension sont fournies au RST qui calcule de nouvelles consignes de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote.

II.2.c Le réglage tertiaire de tension [CRAP-1-2003]

Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes.

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition). Pour le réseau de distribution le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires.

II.2.d La compensation locale d'énergie réactive

Il existe sur le réseau électrique français des organes de réglage de la tension répartis depuis les groupes de productions jusqu'aux consommations. En effet, les spécifications et les régimes de fonctionnement en tension ne sont pas les mêmes pour le réseau de transport et le réseau de distribution.

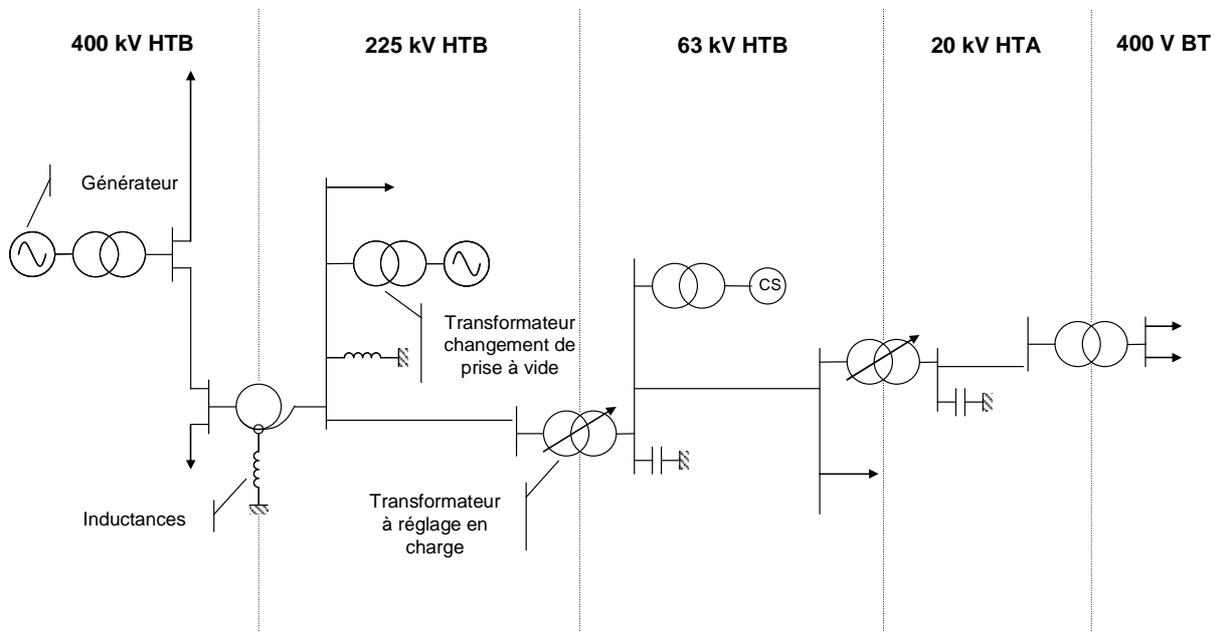


Figure I - 2: Représentation spatiale sur un réseau des organes de réglage en tension

Cette différence justifie la mise en place de moyen de réglage entre ces réseaux. La Figure I - 2 illustre les moyens de réglages existants ainsi que leur positionnement en fonction des niveaux de tension du réseau. [CRAP-1-2003]

Ces installations sont des dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de tenue en tension capable de fournir ou d'absorber de la puissance réactive pour un contrôle local de la tension. Ces automates permettent donc de soulager le contrôle des productions et limite ainsi le transit de puissance réactive indésirable sur les réseaux amont. Ces systèmes ne sont pas coordonnés, se sont des automates dont les réactions sont calibrées en fonction de contraintes sur l'onde en tension.

- Les condensateurs

Ces bancs de condensateurs peuvent atteindre quelques MVar, ils sont utilisés pour corriger le facteur de puissance dans le cas de fortes charges inductives. Cette solution est généralement utilisée pour la compensation réactive des flux de puissance dans le réseau, mais elle pourrait être envisagée quand le plan de tension est bas afin de le remonter. Le but est de compenser la somme de puissance réactive absorbée par le réseau et par le transformateur HTB/HTA. Ainsi, Le banc de condensateur permet de compenser cette puissance réactive consommée en mettant en service le bon nombre d'éléments pour une compensation optimale toutes les 10min. En règle générale, une batterie de condensateur est composée de 3 gradins, chaque gradin est composé de 6 éléments [KOCH-1997]. Le raccordement des PDE au réseau peut provoquer des sursensions, ainsi cette solution reste difficile à mettre en œuvre au alentour d'une connexion de PDE.

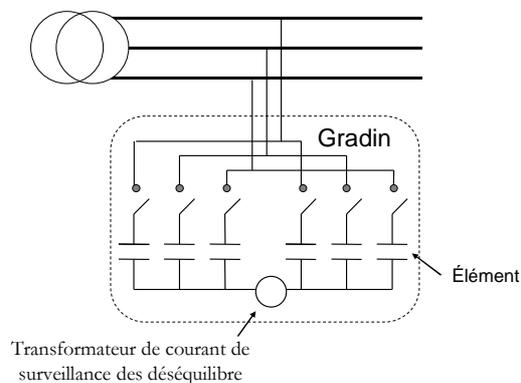


Figure I - 3 : Représentation d'un gradin d'une batterie de condensateur [KOCH-1997]

- Les inductances

Les inductances sont souvent utilisées pour absorber la puissance réactive produite par de longue ligne dans le réseau de transport. Elles peuvent être raccordées en direct ou via le tertiaire de transformateurs. Leur puissance peut aller de 50 à 400 MVar.

- Compensateurs synchrones

Cette solution utilise des générateurs du réseau pour produire ou absorber du réactif. En effet, une machine synchrone peut être commandée de manière à préserver la tension via la puissance réactive qu'elle produit. Le principe du contrôle est le même que celui des machines soumises au réglage primaire avec un régulateur en charge du maintien de la tension. Une sous excitation permet à la machine synchrone d'absorber de la puissance réactive et donc de diminuer la tension ; inversement, une sur excitation lui permet d'en fournir et donc d'augmenter la tension.

- Transformateurs avec prises réglables en charge

Un régleur en charge est un transformateur capable d'adapter son rapport de transformation dans une plage définie. Ceci permet de régler, en fonction du transit de puissance et/ou de la tension mesurée, la tension du secondaire du transformateur. La Figure I-4 montre les deux types de régleurs en charge existants :

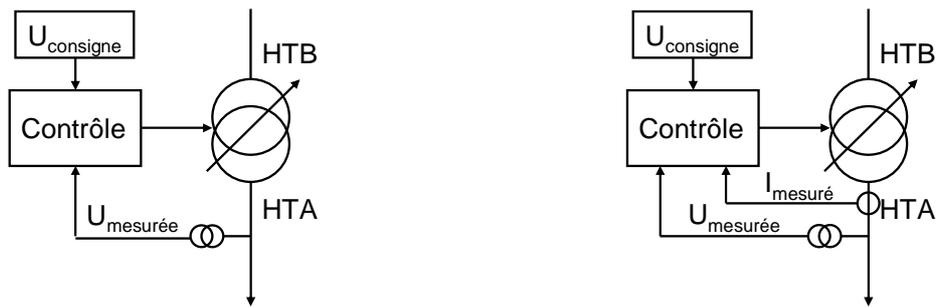


Figure I - 4.a : Régleur en charge sans compundage

b : Régleur en charge avec compundage

Un régleur en charge peut être avec ou sans compundage [CANA-2000]. Le régleur en charge sans compundage change de prise lorsque la tension mesurée au secondaire du transformateur est supérieure ou inférieure à un écart de tension par rapport à une consigne donnée ($U_{consigne}$). Ainsi si la tension du secondaire dépasse les bornes fixées pendant un temps supérieur à T_{min} (généralement de 60s), le changement de prise s'opère. Si un changement de prise n'est pas suffisant un deuxième suit après un temps plus court T_{pmin} (avec $T_{pmin} < T_{min}$).

Le régleur en charge avec compundage fonctionne quasiment de la même façon, une mesure de courant est ajoutée. La tension comparée aux tensions limites est une somme vectorielle de la tension au secondaire et de la chute de tension dans la résistance de compundage. Ceci permet d'avoir une image de la puissance transitée via le transformateur et donc de l'état de charge du réseau aval. L'introduction de cette résistance permet d'estimer la chute de tension en un point du réseau.

Cette solution est disponible en France mais pas dans tous les pays. De plus, la présence des PDE dans le réseau peut provoquer des disfonctionnements sur la régulation standard d'un transformateur avec prises réglables en charge en modifiant les transits de puissance le traversant. Le changement manuel des prises des transformateurs HTA/BT est également une solution existante. Cette solution n'est pas adaptée aux variations fréquentes de tension dans le réseau de distribution.

- Les systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems)

Le réglage de tension est réalisé de manière locale sur le réseau de distribution par des systèmes de gestion de puissance réactive capable de maintenir la tension dans les limites admissibles et de limiter les transits de puissance réactive depuis le réseau de transport. Les systèmes FACTS sont développés à cet effet, ces systèmes à base l'électronique de puissance utilisent les performances de contrôle offertes par l'utilisation de cette technologie.

Une liste non exhaustive des moyens de réglages par compensation d'énergie réactive va être donnée, nous nous intéresserons uniquement aux compensateurs les plus connus. Le fonctionnement de ces systèmes ne sera pas développé ici, le lecteur pourra cependant trouver plus d'informations dans les ouvrages suivants [CRAP-2-2003], [GOMB-2-2005].

Les moyens de compensation par compensateur statique : l'électronique de puissance à permis la réalisation de compensateurs statiques composés de capacités et d'inductances commandées. Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) ainsi que le SVC (Static Var Compensator) sont des systèmes basés sur ce principe. Ces compensateurs fournissent ou consomment de l'énergie réactive grâce à une commande de thyristor adaptée comme un variateur de courant pour les inductances ainsi qu'un commutateur à thyristors pour contrôler les gradins du banc de condensateurs. Les applications de ces systèmes sont diverses, ils servent notamment à améliorer le maintien de la tension, réduire les oscillations de puissance ou encore augmenter le transfert de puissance. [CRAP-2-2003]

Les moyens de compensations utilisant un convertisseur : Ces systèmes comme le SVG (Static Var Generator) ou STATCON ou le UPFC (Unified Power Flow Controller) utilisent des convertisseurs AC\DC ou DC\AC pour réaliser une source de tension commandable. Le SVC met en oeuvre un convertisseur DC\AC avec un élément de stockage, généralement une capacité sur le bus continu. Cet onduleur est connecté en parallèle (connexion shunt) sur le réseau. La tension de ce dernier doit être en phase avec celle du réseau, ainsi, il va être possible de gérer via le courant, l'échange de puissance réactive entre le réseau et le bus continu du système. Ceci est

réalisable en commandant l'onduleur pour que le système fonctionne soit comme un récepteur de puissance réactive soit comme un générateur.

L'UPFC lui est composé de deux convertisseurs avec un bus continu en commun. Le premier convertisseur est un convertisseur AC\DC relié au réseau par une connexion shunt. Le deuxième est un convertisseur DC\AC relié au réseau avec une connexion série. Grâce à ce type de système il va être possible d'utiliser un des deux convertisseurs pour intervenir sur la tension du réseau en se servant du deuxième pour alimenter le bus continu. La connexion shunt permet de se servir du UPFC comme d'un SVG et donc de gérer l'injection ou l'absorption de puissance réactive. La connexion série elle permet de gérer statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne.

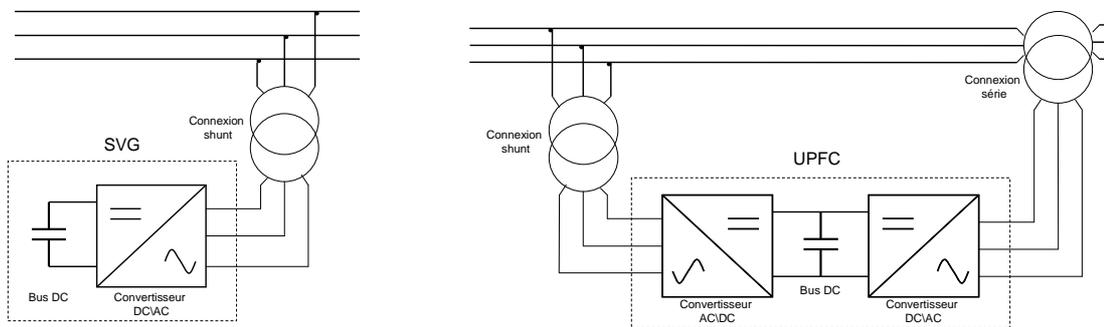


Figure I - 5: Système FACTS shunt de type SVG et hybride (shunt+série) de type UPFC

Tous ces réglages et automates présents sur le réseau permettent le bon fonctionnement et l'exploitation optimale de celui-ci. Les deux paramètres de tension et de fréquence, témoins du bon fonctionnement du réseau, sont gérés de manière décorrélée, le premier grâce à la puissance réactive, le second grâce à la puissance active.

Toutes ces stratégies existantes actuellement pour le contrôle de la tension sont efficaces dans une configuration classique d'exploitation du réseau de distribution avec un flux de puissance unidirectionnel des productions vers les consommations. Cependant, avec l'arrivée des PDE sur le réseau ces contrôles risquent d'être mis en défaut.

Le paragraphe suivant s'attache à identifier quels sont les différents types de PDE ainsi que les problèmes pouvant être causés par ceux-ci. Nous nous attacherons plus particulièrement à mettre en évidence les problèmes liés à l'onde de tension ainsi que les solutions possibles de contrôles de tension sur le réseau de distribution par ces PDE

III La production décentralisée d'énergie électrique connectée aux réseaux électrique de distribution

La libéralisation du marché d'électricité permet à tout producteur de vendre son énergie au distributeur, sous réserve d'une étude de faisabilité de raccordement préalable. Ainsi, beaucoup de moyen de production peuvent être identifiés comme PDE. Il est à noter que ces productions d'énergie sont de moins en moins marginales puisque 3600 MW de demandes de raccordement, à l'organisme en charge du fonctionnement du réseau de distribution français, ont été faites en l'espace de 3 mois fin 2005, dont plus de 3000 MW d'éolien. [ERD-2005]

III.1 Les moyens de productions d'énergie

Il existe plusieurs technologies matures de productions d'énergies électriques raccordées au réseau de distribution. Celles-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies dites renouvelables comme le soleil ou le vent.

Ces technologies de productions se différencient également par leur méthode de raccordement au réseau. D'une part, il y a les PDE utilisant un alternateur synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau, d'autre part celles utilisant un interfacement d'électronique de puissance, comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires. Les caractéristiques des sources d'énergie électrique envisagées dans cette thèse vont être à présent développées.

III.1.a Les piles à combustibles

La pile à combustible (PAC) est un système de production permettant de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique. Aucune masse tournante n'est présente dans ce système. En effet, l'énergie est produite grâce à une réaction électrochimique comme dans le cas d'une pile classique. Cependant une PAC, comme son nom l'indique, nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner, l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène et son comburant l'oxygène.

Ce système n'émet aucun gaz à effet de serre et produit de l'eau ainsi que de l'électricité. Grâce à cet avantage environnemental l'utilisation de ce système est envisagé pour diverses

applications d'alimentation autonome, les plus citées étant l'alimentation de véhicules électriques propres, ainsi que la cogénération de chaleur et d'électricité. Les puissances disponibles de ce type de source varient en fonction de la technologie d'électrolyte considéré, de quelques kilowatts à quelque mégawatts [DISP-2003].

Type de PAC	Ordre de grandeur de capacité de production	Température (°C)
AFC-PAFC : (Phosphoric) Alkaline Fuel Cell	10kW-1MW	60-200
PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell	1kW-1MW	60-100
MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell	100kW-10MW	500-650
SOFC : Solid Oxide Fuel Cell	100kW-10MW	800_1000

Tableau I - 2 : Propriété des piles à combustibles en fonction de leur électrolyte

Dans cette thèse les puissances envisagées pour ce type de production seront le plus souvent de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts.

III.1.b Les moteurs à combustibles fossiles

Les turbines à gaz et les groupes diesel sont des moyens de productions utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique développée par celles-ci en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent envisagé pour des cogénérations de quelques mégawatt.

III.1.c Les panneaux solaires

Les photons présents dans le rayonnement solaire transportent l'énergie de celui-ci. Le principe d'une cellule photovoltaïque est donc de convertir cette énergie à travers un matériau semi-conducteur en énergie électrique. Ainsi, les propriétés diélectriques du semi conducteur, généralement du silicium, font que l'énergie solaire est captée entraînant la mise en mouvement d'électrons dans le matériau. La quantité de puissance produite par des panneaux solaires dépend donc des variations de l'ensoleillement ; cette production est donc intermittente et ne permet pas de fournir une puissance constante sans utiliser d'organe de stockage.

Les panneaux solaires sont de plus en plus utilisés dans le cadre d'utilisations résidentielles. Ces moyens de productions sont limités en puissance par leur encombrement car en moyenne il faut 10m² de cellules photovoltaïques pour atteindre une puissance de 1kW. Ainsi elles conviennent parfaitement à la niche résidentielle ou pour les petites alimentations

autonomes. La connexion au réseau électrique de ce type de production est réalisée à l'aide d'un interfaçage d'électronique de puissance, cette connexion est surtout envisagée sur des réseaux BT.

III.1.d Les éoliennes

Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour se faire, l'énergie du vent est captée par les pales qui transforment l'énergie cinétique en couple mécanique que la génératrice convertit ensuite en électricité. De la même façon que précédemment, ce type de production est intermittent et ne permet pas de fournir une puissance constante et garantie mais dépendante des ressources captables.

Les éoliennes sont une solution adoptée et actuellement développée notamment pour répondre aux objectifs de Kyoto pour la France qui fixe à 20% le part de génération d'électricité à l'aide d'énergie renouvelable de la production totale d'ici 2010. La puissance délivrable par une éolienne est de l'ordre du mégawatt et il est d'usage d'exploiter cette énergie en mutualisant les puissances fournies par plusieurs éoliennes voisines, on parle alors de « ferme » éolienne ou de « parc » éolien. Un parc éolien peut fournir une puissance de quelques mégawatts.

Plusieurs technologies existent pour les génératrices éoliennes. Ainsi il existe plusieurs possibilités de raccordement au réseau. Les génératrices asynchrones peuvent être raccordées directement au réseau, on parle alors de couplage direct où l'éolienne fonctionne à vitesse constante pour fournir un courant alternatif à la fréquence du réseau. Cependant, dans ce cas, cette solution n'autorise pas de contrôle efficace sur la tension puisque la puissance réactive de ce type de génératrice ne peut être régulée. Ainsi cette solution peut être couplée avec un système FACTS de type SVC ou une batterie de condensateur pour garder un contrôle sur la tension.

Les génératrices peuvent être également couplée au réseau via un étage d'électronique de puissance, ce couplage indirect est réalisé en deux étapes. Dans un premier temps un redresseur permettant de transformer le courant alternatif de la génératrice fonctionnant à vitesse variable en courant continu puis dans un deuxième temps un onduleur permettant de créer un courant alternatif à injecter sur le réseau cette fois ci à la bonne fréquence.

III.2 Mise en évidence des problèmes de tensions induits par l'insertion de PDE sur les réseaux de distribution

Le réseau électrique français a toujours été exploité en dissociant d'une part la production et d'autre part la consommation d'énergie. 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.

Ainsi, les dispositifs présents sur le réseau comme les protections ou les organes de réglages de tension comme les transformateurs réglables en charge sont dimensionnés et fonctionnent pour cette configuration de réseau. L'insertion de PDE 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 de distribution et la présence de production d'énergie sur celui-ci. [BARS-2001],

Toutes ces problématiques font l'objet de thématiques de recherches, cette thèse traite du problème de tension induit par la présence de PDE sur le réseau de distribution.

III.2.a Les surtensions induites par la connexion d'une PDE

La principale problématique du producteur et du distributeur en charge du réseau électrique est la continuité du service ainsi que le respect des caractéristiques contractuelles en tension et en fréquence.

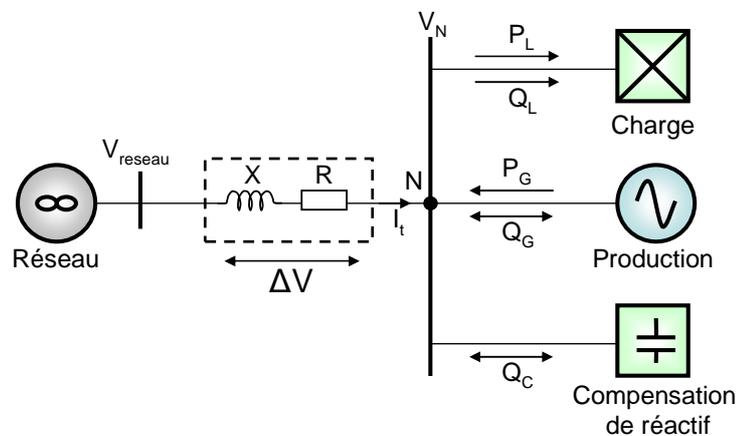


Figure I - 6 : Détermination de la chute de tension sur une ligne

Dans le réseau de distribution classique de structure radiale, la tension est, en règle générale, plus élevée au poste source et diminue vers l'extrémité du départ. La puissance circule dans un sens à partir du poste source vers les consommations. Mais, avec la présence de PDE sur le réseau, le réseau devient actif et les transits de puissance sont modifiés. La chute de tension (ΔV en pu) entre le poste source et le point de raccordement d'une PDE via une ligne (Figure I - 6) est déterminée comme suit :

$$\Delta V = R.I_t . \cos \varphi + L.\omega.I_t . \sin \varphi \quad (\text{I - 1})$$

Où : R, L sont la résistance et l'inductance totale de la ligne

V_N la tension au nœud N et I_t le courant transitant dans la ligne

P_N, Q_N les puissances active et réactive au nœud N

$$\Delta V = R. \frac{P_N}{V_N} + L.\omega. \frac{Q_N}{V_N} = \frac{R(P_G - P_L) + L\omega(\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \quad (\text{I - 2})$$

$$\Delta V = \frac{R.P_N + X.Q_N}{V_N} \quad (\text{I - 3})$$

P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournie par PDE

P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation

Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation

L'équation (I - 3) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de PDE 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 différentes selon le type de réseau auxquelles elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par la PDE, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée ou limite admissible.

Dans le réseau de transport, la réactance est supérieure à la résistance, ainsi si $X \gg R$, la formule (I - 3) peut être simplifiée comme suit :

$$\Delta V = \frac{X.Q_N}{V_N} \quad (\text{I - 4})$$

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

Dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique $R \gg X$:

$$\Delta V = \frac{R.P_N}{V_N} \quad (\text{I - 5})$$

La puissance active injectée par PDE joue donc un rôle important dans la modification de la tension.

De plus, la production des PDE est non garantie en général pour les sources d'énergie renouvelable (caractère intermittent), pouvant provoquer une fluctuation imprévue de la tension.

Le plan de tension dans le réseau de distribution dépend fortement du niveau de consommation et du facteur de puissance de ces charges. Un changement de charge provoque une variation de tension sur le réseau. Le cas extrême pour une élévation de tension correspond à une charge consommée nulle associée à une production maximale. Cette situation peut cependant être réaliste en imaginant une consommation nocturne très faible alors que les productions de PDE restent nominales. La tension peut être également affectée par l'apparition de courts-circuits ou de défauts d'isolement provoquant des creux de tension.

Ainsi, il existe des dispositifs capables de maintenir la tension dans la fenêtre d'admissibilité. De par leur fonction, ces dispositifs présentés au paragraphe II.2.d sont aussi à l'origine de variations de tension sur le réseau.

III.2.b Problème de génération en aval d'un transformateur régleur en charge

La présence de PDE sur les réseaux HTA peut induire des problèmes de fonctionnement des régleurs en charge. En effet, ceux-ci n'étant pas dimensionnés pour avoir en aval de leur secondaire une production trop importante, cette configuration peut affecter leur vision de l'état de charge du réseau en particulier pour les régleurs en charge avec compundage. [CANA-2000] a mis en évidence ce phénomène où la production par PDE en aval du transformateur réduit le flux de puissance transitant par celui-ci. Ainsi, le courant mesuré dans la résistance de compundage devient moins important de même que la chute de tension aux bornes de celle-ci. Pour le régleur en charge, ce nouveau transit est vu comme un état de charge faible, ce qui peut provoquer un changement de prise (diminution) dans le but de baisser la tension du transformateur.

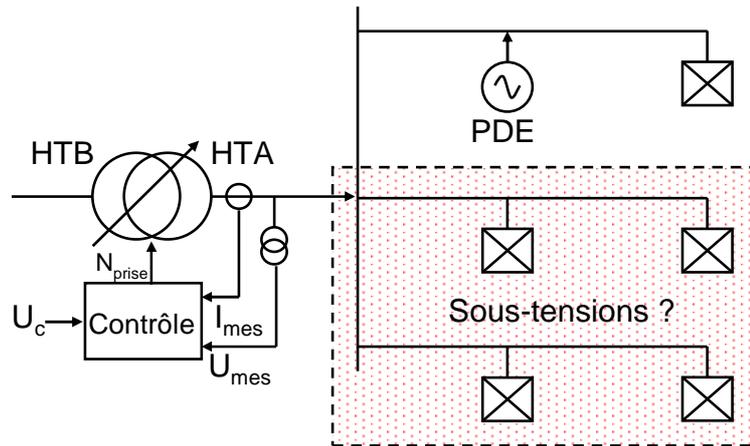


Figure I - 7 : Configuration d'un réseau de distribution HTA pouvant être problématique

Ce changement n'a pas d'impact négatif sur le départ où sont connectées les PDE puisque celles-ci tendent à augmenter la tension sur ce départ. Cependant cette configuration peut être critique pour les départs adjacents sans PDE qui peuvent voir apparaître des tensions trop basses.

III.2.c Illustration en simulation du problème de surtension

Les simulations présentées ici ont pour but d'illustrer l'impact de l'insertion de PDE sur le réseau de distribution d'électricité.

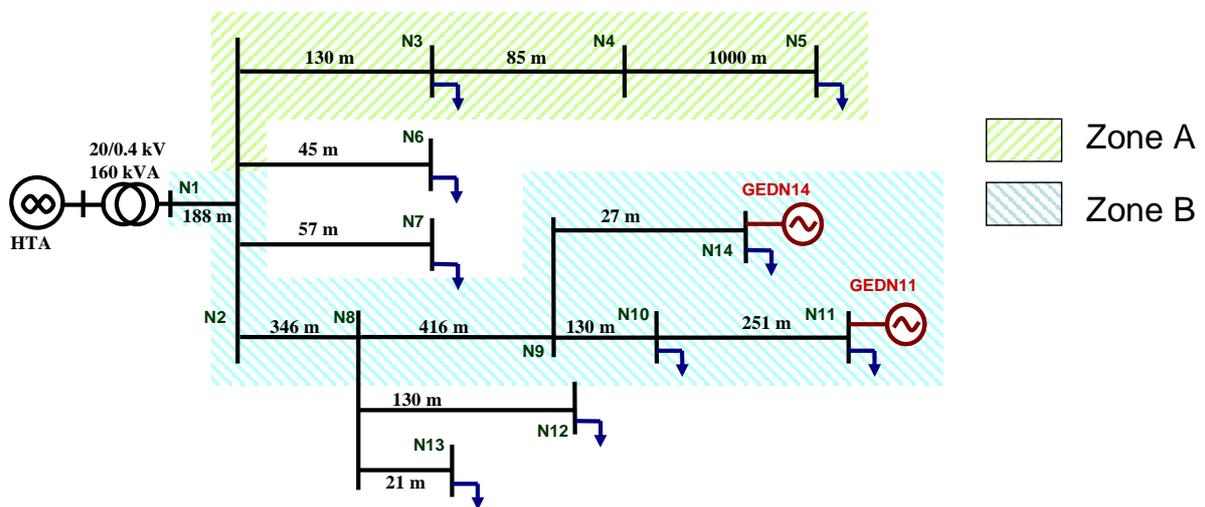
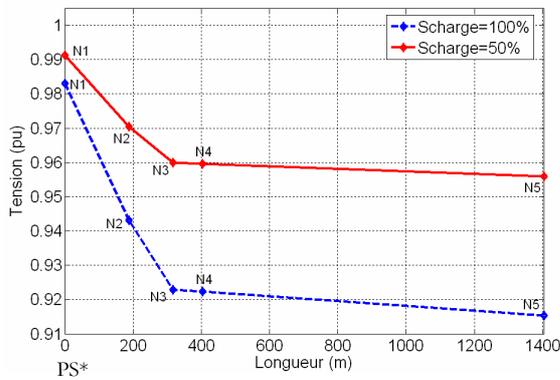


Figure I - 8 : Représentation du réseau BT avec deux PDE connectées aux nœuds N14 et N11

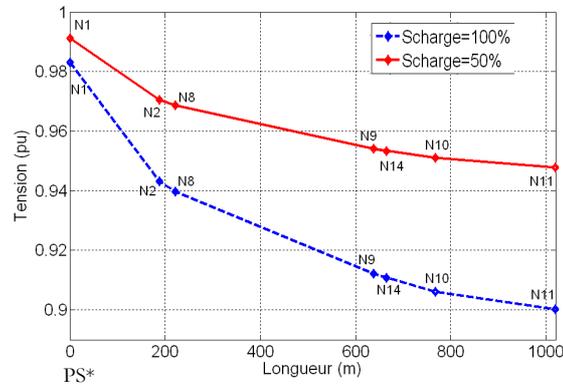
Ainsi, la Figure I - 8 présente un réseau BT de type rural de 14 nœuds alimenté par un transformateur HTA\BT de 160 kVA, le lecteur pourra trouver toutes ses caractéristiques en annexe. Ce type de réseau est utilisé ici car le phénomène de surtension est facilement observable puisque sur ce niveau de tension la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique ($R \gg X$). Ainsi, les courbes Figure I - 9 vont illustrer les conséquences de la production

de puissance sur la tension. Deux scénarii sont réalisés, le premier envisage le réseau sans PDE, le second avec PDE. Les courbes Figure I - 9.a (Zone A) et Figure I - 9.b (Zone B) présentent la tension sur ce réseau avec deux états de charge :

- Le premier avec la totalité de la charge.
- Le deuxième avec la moitié de la charge.



a. Zone A

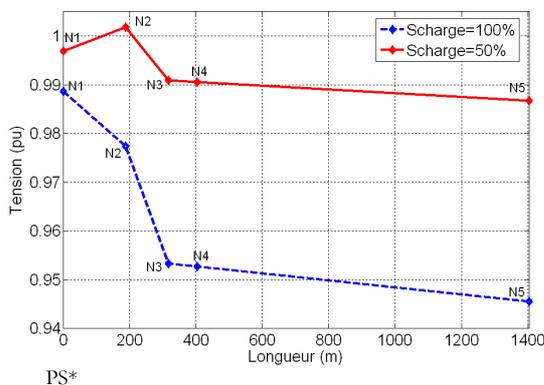


b. Zone B

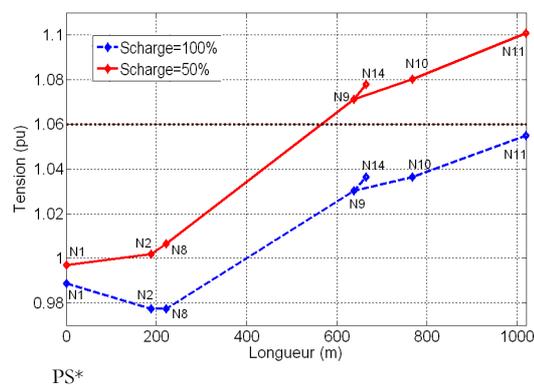
Figure I - 9 : Profile de tension pour deux régimes de charge sans génération pour les zone A (a) et zone B (b)

Sans PDE, le réseau est dans une configuration d'exploitation classique. Ainsi la tension chute du poste source jusqu'au point de consommation le plus éloigné. Il est notable que dans les deux zones, la tension atteint des valeurs basses en tension en bout de ligne pour le cas en pleine charge. Cependant celles-ci restent sur l'ensemble du réseau dans les valeurs limites de tensions de +6% et -10% en BT.

Dans le second scénario, deux PDE sont connectées aux nœuds 11 et 14, Zone B. Les deux productions sont identiques et de 40 kW chacune.



a. Zone A



b. Zone B

Figure I - 10 : Profile de tension pour deux régimes de charge avec générations pour les zone A (a) et zone B (b)

* PS : poste source

Ces PDE ne produisent pas de puissance réactive. Cette configuration induit un taux de pénétration de 50%. Nous définissons le taux de pénétration comme le rapport la puissance totale des PDE sur la puissance nominale du poste source :

$$T_{pénétration} = \frac{S_{PDE}}{S_{poste_source}} \quad (\text{I - 6})$$

De la même façon que pour la Figure I - 9, le tracé des courbes Figure I - 10 est réalisé en pleine charge et en charge partielle. Il est aisément visible que l'injection de puissance entraîne une augmentation de la tension significative au point de connexion des PDE, entraînant dans la zone B un accroissement de celle-ci aux nœuds voisins. Dans le cas d'une charge partielle, la tension atteint même un niveau critique pour les nœuds 10, 11 et 14, supérieur à la tension admissible de 1,06 pu.

Le fait de produire de la puissance entraîne donc une surtension au point de connexion et sur les nœuds voisins. Les conséquences sont le non respect des normes de tension et dans certain 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 la PDE.

Pour éviter ces surtensions et par conséquent le découplage de la production, des systèmes de compensation peuvent être utilisés à proximité des productions afin de contrôler la tension. Il peut être également envisagé de faire participer les productions au contrôle de tension grâce à des contrôles efficaces de celles-ci.

III.3 Solutions pour le réglage de tension

Pour palier au problème de surtension, il est possible d'utiliser les PDE pour aider au réglage de tension en utilisant les possibilités d'absorption ou de production de puissance réactive. A l'heure actuelle, le distributeur impose un fonctionnement à puissances constantes appelé contrôle en tangente phi. Les conditions de raccordement varient en fonction de la taille de la PDE ainsi que du niveau de tension auquel la production est raccordée. Le Tableau I - 3 donne les puissances limites de raccordement pour chaque niveau de tension des réseaux de distributions. [Arrêté-2003].

Niveau de tension	Puissance limite
BT	250 kVA
HTA	12 MW

Tableau I - 3 : Puissance limite des PDE en fonction du niveau de tension considéré

Ainsi sur un réseau HTA le distributeur fixe les consignes de puissances active et réactive et peut les réactualiser mensuellement en fonction des impératifs d'exploitation du réseau. Les consignes de puissances sont également fonction de la puissance de la production. Le Tableau I - 4 résume les capacités de production de puissance réactive demandées aux installations nécessaires pour un raccordement au réseau de distribution [Arrêté-2003].

Taille de l'installation	Capacité de production en réactif demandée	Capacité d'absorption en réactif demandée
< 1MW	0,4xSn	Absorption interdite en BT
>1MW & <10MW	0,5xSn	0,1xSn
> 10MW	0,6xSn	0,2xSn

Tableau I - 4 : Capacité de réglage demandée aux productions en fonction de leur puissance

Cette thèse fait abstraction de ces conditions et se place à un temps où le taux d'insertion de production indépendante sur le réseau de distribution ne sera plus marginal. Dans cette situation un nouveau contrôle plus efficace pour ces PDE doit être pensé. Ainsi des solutions envisageables pour faire participer les PDE au contrôle de la tension vont être proposées.

III.3.a Utilisation spécifique des PDE

Comme il a été expliqué dans le paragraphe III.2, la connexion de PDE modifie le plan de tension du réseau en injectant une puissance produite en un point du réseau. Cependant, beaucoup d'études sont menées dans l'optique de trouver des solutions efficaces quant à l'intégration de ces PDE dans le réseau de distribution. Des contrôles de PDE en puissance et en tension existent déjà, le principe de ceux-ci diffère en fonction du type de PDE utilisée à savoir un raccordement direct de la machine synchrone ou un interfaçage d'électronique de puissance. [LASS-1998]

Pour les PDE de type machine tournante (machine synchrone), il existe deux types de régulation:

- Le régulateur de tension (Automatic Voltage Regulator: AVR) est capable de maintenir la tension de la machine constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les générateurs de quelques dizaines à quelques centaines de MVA dans le réseau de transport ou, par les générateurs fonctionnant en réseau séparé. Le principe est de régler la tension via l'excitation de la machine. En sous excitation, la machine réagit comme une inductance en absorbant de la puissance réactive induisant donc une baisse de la tension réseau. A l'inverse, si celle-ci est surexcitée elle fournit de la puissance réactive induisant une augmentation de la tension réseau.

- Le régulateur de facteur de puissance (Power Factor : PF/VAR) est capable de maintenir le facteur de puissance ou la puissance réactive constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les PDE ou les générateurs connectés aux réseaux de distribution de quelques kVA à quelques dizaines de MVA. Ce système de régulation (PF/VAR) est bien adapté pour les PDE, en particulier celles de petites puissances.

De la même façon, pour les PDE utilisant une interface d'électronique de puissance (onduleur) pour leur connexion au réseau, il est possible de contrôler les courants fournis par l'onduleur de manière à créer des régulations similaires à celles exposées pour les machines synchrones :

- La régulation en tension ou mode P/V : dans ce mode, la commande de l'onduleur est créée pour fixer au nœud de connexion la tension et la puissance active de consigne. La tension au point de connexion est contrôlée par injection ou absorption de puissance réactive. Un contrôle adapté de l'association source primaire et onduleur de tension permet de fixer la puissance active et la tension via les courants produits. Ainsi il est possible de contrôler, dans les limites du système la tension et la puissance active au point de connexion.

- La régulation en puissance ou mode P/Q : dans ce mode, la commande de l'onduleur est créée pour fixer au nœud de connexion les puissances active et réactive de consigne. Ce modèle de régulation est très similaire au mode P/V. Une boucle de régulation en courant génère la commande de l'onduleur et fixe les puissances au nœud de connexion de la PDE via les courants produits sur le réseau.

III.3.b Contrôles innovants de tension sur les réseaux de distribution grâce aux PDE

La participation au réglage de tension ainsi que la proposition de solutions pour les problèmes liés à l'introduction des PDE sont des sujets de recherche très présents dans la

littérature, que se soit pour la réorganisation du système de protection, pour une meilleure gestion de l'énergie ou pour des réglages de fréquence et de tension.

Dans notre problématique du contrôle de tension sur les réseaux BT et HTA, deux axes de recherche se dégagent. Le premier axe envisage un contrôle de tension grâce à une coordination des PDE. Le deuxième envisage un contrôle de tension sans coordination et réalisé par une adaptation des productions de puissances autonome et locale de chacune des PDE. La Figure I - 11 illustre ces deux méthodes.

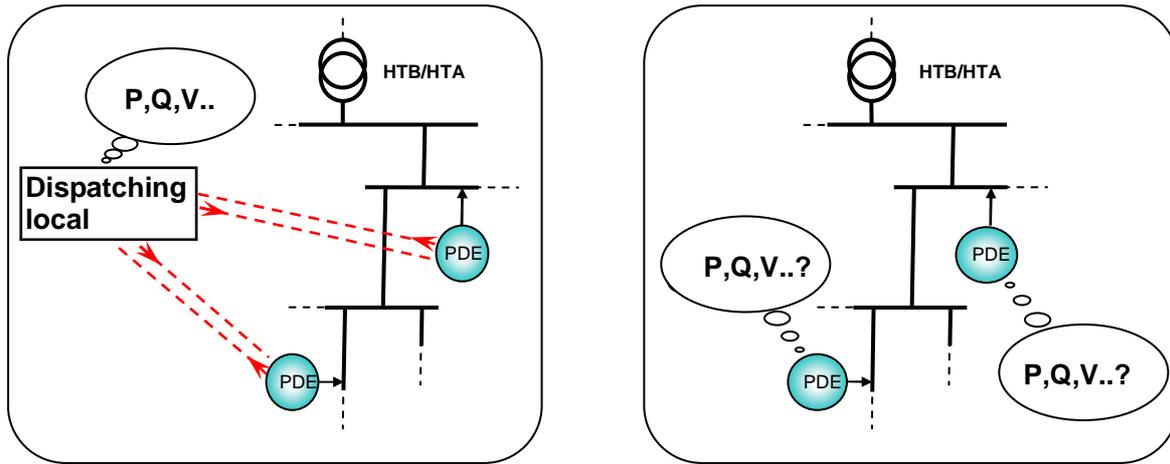


Figure I - 11 : solutions envisagées pour le contrôle de la tension sur les réseaux de distribution

La première solution envisage donc une coordination des PDE. Chaque PDE est contrôlée en puissance ou en tension (cf. § III.3.a). Dans ce cas, chaque PDE doit être capable de communiquer avec un centre de dispatching centralisant les informations et, en fonction de celles-ci, à même de fournir les consignes en puissance ou en tension optimales pour chaque PDE. Ces systèmes de coordination optimale de production peuvent avoir des objectifs divers comme la réduction de pertes sur le réseau tout en conservant la tension dans les limites contractuelle [CAIR-2004] ou encore la conservation du plan de tension [CALD-2005] [RICH-2-2006]. Ces solutions calculant les possibilités de contrôles existants sur le réseau de transport restent cependant difficilement adaptables. En effet, une quantité significative de ces générations est difficilement observable ; la mise en place de moyen de télémessures et de communications est très onéreuse. De plus, ceci est envisageable dans le cas d'une mutualisation de moyen de production non envisagée dans cette thèse.

Le deuxième axe de recherche pour le contrôle de tension, est d'embarquer dans chaque PDE un contrôle intelligent et autonome capable de réaliser une régulation locale pour une sauvegarde globale de la tension. Cette solution moins développée que la précédente, a l'avantage de se passer de communications lourdes à gérer et coûteuses. Ainsi le principe de ce contrôle est

de réguler la PDE en puissance ou en tension en fonction du niveau de contraintes mesurées au point de connexion de la PDE [KIPR-2003].

Cette solution apporte des avantages économiques évidents puisque les communications entre PDE ou avec un centre de calcul de consignes ne sont pas envisagées. De plus le contrôle intelligent ainsi créé est indépendant des configurations du réseaux et donc transposable à n'importe quel cas de fonctionnement en terme de nombre de PDE connectées sur le départ considéré ou d'évolution de charge.

Cette thèse expose donc le cheminement d'un tel raisonnement vers la réalisation d'un contrôle auto adaptatif de tension pour PDE.

IV Conclusions

Ce chapitre expose une vision du contrôle de la tension sur le réseau électrique ainsi que la problématique induite par l'arrivée des PDE sur la tension du réseau de distribution. Ce réseau, de par son architecture et sa conception, n'est pas adapté pour un accueil significatif de ces productions. Ainsi, le fait de produire une quantité de puissance localement sur un réseau de distribution crée des problèmes de tension au point de connexion. Cette surtension s'étend aux nœuds voisins et peut selon les niveaux de charge du réseaux devenir critiques. Ainsi, il apparaît nécessaire de penser des contrôles intelligents pour ces PDE dans le but de les faire participer activement à la conduite du réseau et dans ce cas précis au contrôle de tension.

Chapitre II : Modélisation et contrôle de productions
décentralisées d'énergie

I Introduction

Le contrôle des PDE est un facteur très important d'une part pour la tenue en tension des réseaux en limitant les effets de surtensions, d'autre part pour favoriser l'insertion sur le réseau de distribution de celles-ci. Grâce à un contrôle optimale des PDE, les capacités d'accueil d'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.

Dans cette optique, deux principaux contrôles existent pour les PDE, un contrôle dit en « tangente phi » où les puissances active et réactive sont fixées, ainsi qu'un contrôle à puissance et tension fixes. Le chapitre suivant expose les travaux de modélisation effectués pour pouvoir utiliser les modèles de régulations précités. Ces modèles nous serviront de base pour les études de régulations de tension à l'aide de PDE et pour la création d'un régulateur « intelligent » fait dans le chapitre suivant.

II La problématique de simulation

II.1 La simulation : pourquoi ?

Une problématique de modélisation nécessite une réflexion préalable sur le type de phénomène à mettre en évidence ainsi que ses dynamiques. Cette réflexion essentielle détermine le niveau de complexité de la modélisation à effectuer. Le problème de niveau de tension a des dynamiques assez lentes et pourrait même être étudié grâce à des travaux en régime permanent ou statique. Cependant le régulateur à développer doit pouvoir s'adapter en fonction des évolutions du réseau. Ainsi la modélisation des PDE doit pouvoir faire apparaître les dynamiques d'évolution de productions sans aller jusqu'à la mise en évidence de phénomènes transitoires trop rapides ou la représentation d'une pollution harmonique due à de l'électronique de puissance.

Les études présentées feront l'objet d'hypothèses simplificatrices permettant une modélisation simplifiée et une rapidité de simulations accrue.

II.2 Les logiciels utilisés pour réaliser les études

Trois principaux logiciels ont été utilisés pour la mise en place de régulateurs de productions dispersées ainsi que pour le régulateur de tension intelligent à savoir, Arene, Eurostag et Matlab/Simulink.

Arene est un logiciel proposé et développé par EDF. Il permet de simuler les phénomènes transitoires électromagnétiques de réseau électrique, idéal pour la modélisation de système de contrôle commande d'électronique de puissance [AREN-2002]. En effet, Arene permet de réaliser des simulations de courte durée destinées à l'observation de phénomènes de quelques millisecondes jusqu'à quelques secondes.

Eurostag est un logiciel développé par EDF et Tractebel. Il permet de simuler les phénomènes dynamiques des réseaux électriques (de quelques secondes à plusieurs heures), en utilisant les modèles monophasés en régime équilibré ou les composants symétriques en régimes déséquilibrés. [EURO-2003]

Matlab/Simulink n'est plus à présenter, puisque ce logiciel est très renommé pour la simulation et la modélisation par blocs fonctionnels. Par contre, ce logiciel est moins utilisé pour la simulation de réseaux électriques. Ceci est rendu possible grâce à la Toolbox SimPowerSystem permettant de gérer la simulation de réseaux triphasés ou monophasés.

Les modèles présentés sont établis sous plusieurs environnements pour l'observation de phénomènes différents. Ainsi Eurostag sera utilisé plus largement pour la simulation de scénarii de longue durée de plusieurs centaines de secondes, où les résultats concernent la mise en avant de niveau de tension sur le réseau et les réactions des régulateurs à certains événements (enclenchement, déclenchement de charge). Le développement de l'algorithme du régulateur intelligent en code Matlab et C ainsi que des observations de phénomènes rapides (court-circuit et interaction avec une protection de découplage, etc.) sont réalisés à l'aide de Simulink, Arene lui nous a servi d'une part à comparer les résultats des modèles créés et d'autre part à réaliser les simulations en temps réel développées dans le chapitre IV.

II.3 La problématique de modélisation

Les PDE présentées au premier chapitre peuvent être séparées en deux catégories, les PDE utilisant une génératrice synchrone (sans compter les machines asynchrones raccordées au réseau) comme les groupes diesel, ou les cogénérations classiques et les PDE interfacées au

réseau par de l'électronique de puissance, comme les panneaux solaires, les piles à combustibles, les micro-turbines ou encore une fois, les éoliennes.

Le sujet de cette thèse est de réaliser un contrôle original de PDE efficace pour maintenir la tension dans des limites contractuelles définies par le distributeur. Ainsi, en considérant les systèmes illustrés Figure II - 1, l'accent sera mis lors de la modélisation sur le système à réguler ainsi que sur le système de régulation lui-même.

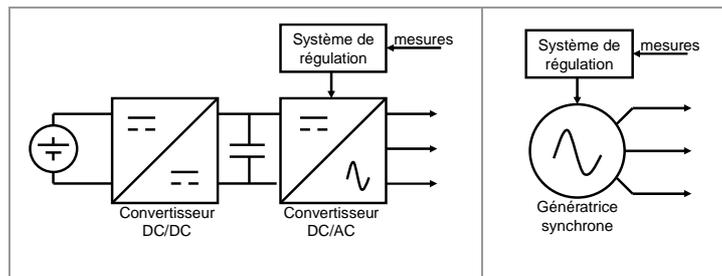


Figure II - 1 : Systèmes de PDE à modéliser

Ainsi les systèmes à réguler seront, selon le type de PDE considérées, soit un onduleur soit une génératrice synchrone.

Tout problème de modélisation fait l'objet d'un compromis entre la complexité et la rapidité. Compte tenu des applications envisagées, certaines hypothèses ont été retenues, afin de disposer de modèles permettant de réaliser des simulations relativement rapides tout en bénéficiant d'une certaine précision sur les résultats obtenus.

III Modélisation de PDE utilisant un interfaçage à base d'électronique de puissance

III.1 Présentation du système

La modélisation de structure de production d'énergie interfacée par de l'électronique de puissance est un problème complexe [HAAN-1996] [WALL-2001] [ETXE-2003]. En effet dans ce type de structure un grand nombre d'éléments entre en jeu comme la source primaire de puissance (PAC, panneaux solaire, éolienne...etc.) [LASS-2001] [VALE-2004], un étage hacheur permettant d'adapter la tension au bus continu, l'onduleur de tension et le contrôle commande de tout ce système. La structure d'électronique de puissance assurant la conversion DC/AC est un onduleur de tension triphasé. En faisant abstraction (dans un souci de simplification des

schémas) des étages de filtrages et du transformateur situé entre la PDE et le réseau de distribution, le système est représenté Figure II - 2 :

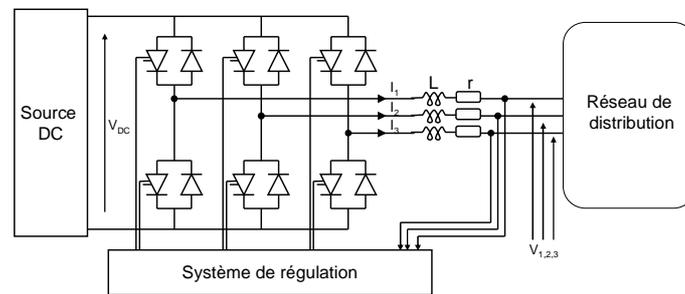


Figure II - 2 : Vision du système de production avec onduleur de tension

Les notions de contrôle « amont » et de contrôle « rapproché » peuvent être introduites. La Figure II - 3 illustre la séparation du système de régulation, avec premièrement le contrôle « amont » capable de fournir des courants de consignes fonction de puissances désirées ou calculées pour (dans notre cas) réaliser un contrôle de tension locale. Vient ensuite le contrôle « rapproché » capable de fournir la commande de l'onduleur en fonction de l'erreur entre les courants injectés sur le réseau par celui-ci et les courants de consignes en sortie du contrôle « amont ».

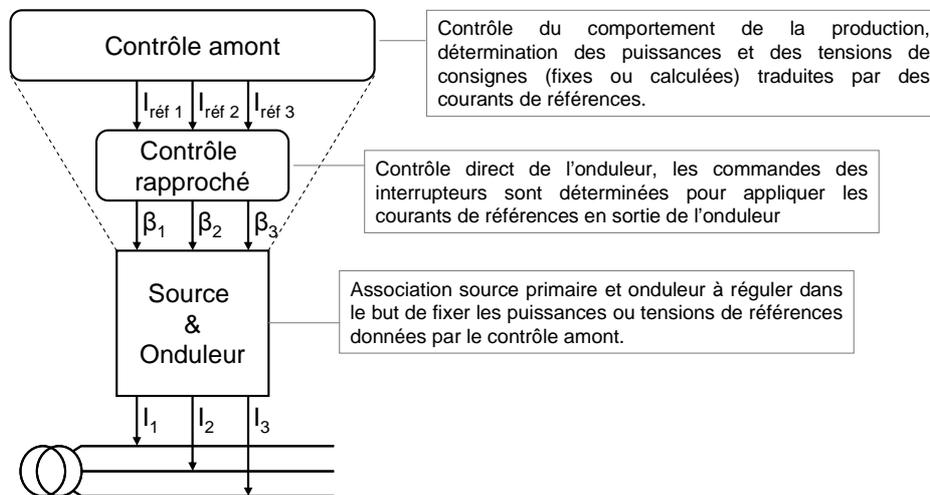


Figure II - 3 : Hiérarchisation des contrôles de l'onduleur de tension

Des travaux de thèse antérieurs [ETXE-2003] ont fait l'objet de recherches sur la manière de modéliser et de réaliser le contrôle rapproché de l'onduleur de tension. Ces travaux nous ont permis de nous appuyer sur des régulations valides, pour des systèmes d'électronique de puissance et plus particulièrement, pour notre application, d'onduleurs.

Comme il a été expliqué dans les paragraphes précédents, le degré de modélisation d'un système est fonction des phénomènes à mettre en évidence. Ainsi, il va être nécessaire d'analyser

le fonctionnement d'un tel système pour réaliser une modélisation de la production, illustrée Figure II - 2, simple et adaptée à notre problématique de contrôle de la tension. La simplification de la modélisation va être faite d'une part au niveau des éléments de production mais également au niveau de leurs contrôles.

Notre but est de réaliser des modèles simples, partant du postulat que l'association de la source primaire et de l'onduleur est considérée comme bien commandée, il est alors possible d'émettre l'hypothèse que le contrôle rapproché de l'onduleur fonctionne et est capable de fixer les courants de références directement en sortie de l'onduleur. En effet, l'étude de l'évolution de la tension pourrait se faire en régime statique, ainsi les phénomènes transitoires trop rapide liés à la commutation des interrupteurs de l'onduleur et à son contrôle rapproché ne nous intéressent pas directement pour nos travaux. Fort de ces considérations, il est possible de simplifier la modélisation du système en prenant en compte uniquement le contrôle amont. Ceci est l'objet du paragraphe suivant.

III.2 Hypothèses de modélisation

III.2.a Simplifications des dynamiques

Afin de créer des modèles simples, plusieurs hypothèses sont faites sur la dynamique des différents éléments du système [LASS-2000].

On considère que la dynamique des convertisseurs (onduleurs et hacheurs) est très rapide par rapport à la dynamique de l'élément de production. La dynamique retenue pour les convertisseurs est de l'ordre du dixième de seconde. Quant à la dynamique de l'unité de production, elle peut être de plusieurs secondes voire plusieurs minutes, selon le type de production considéré.

Dans ces conditions, la seule dynamique à prendre en compte est celle du système le plus lent, à savoir la dynamique de l'onduleur pour la régulation de la puissance réactive ou la dynamique de l'unité de production pour la régulation de la puissance active. Pour rendre compte de ces dynamiques, des systèmes du premier ordre dont la constante de temps τ est choisie de manière adéquate sont insérés au sein du système de régulation et de commande de l'onduleur, comme cela est illustré Figure II - 5.

III.2.b Considération des limitations

Les limitations considérées concernent uniquement l'élément de production et les convertisseurs :

- l'élément de production fixe une limite en puissance active débitée,
- les convertisseurs imposent une limite en amplitude du courant transité.

La puissance réactive produite ou absorbée par le système n'est donc limitée que par l'intermédiaire du courant maximal dans les convertisseurs.

En tenant compte des différentes remarques précédemment exposées, il est possible de proposer un schéma simplifié illustrant le principe général des systèmes de régulation que nous allons envisager Figure II - 3.

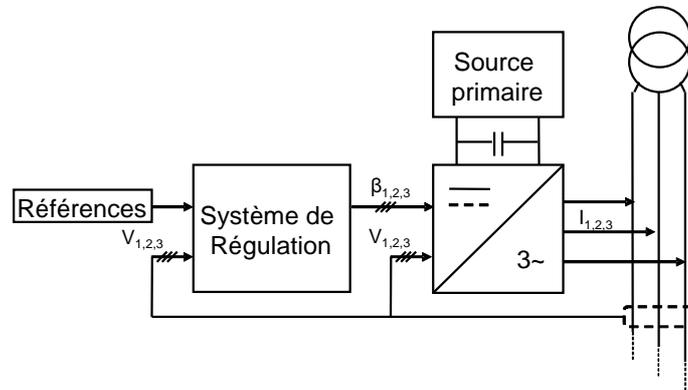


Figure II - 4 : Illustration du système complet par blocs fonctionnels

Le principe de régulation mis en oeuvre nécessite un calcul dans le plan de Park afin de déterminer, à partir des consignes et des mesures effectuées au point de connexion, les courants à injecter [ETXE-2003]. Cette réflexion a conduit à envisager une simplification de l'ensemble du système. Celle-ci consiste à faire abstraction de l'étage « onduleur - source DC », et à effectuer directement une transformée de Park inverse après calcul des composantes I_d et I_q dans la boucle de régulation, afin de disposer des courants triphasés à injecter sur le réseau. Cette approximation est valide dans la mesure où les aspects dynamiques et les limitations inhérentes à l'onduleur et à la source DC peuvent être pris en compte au sein même de la boucle de régulation [CALD-2003].

Le courant peut être directement limité en amplitude ou sur les valeurs I_d et I_q dans le plan de Park, situées en sortie de la boucle de régulation, et correspondant aux composantes du courant à injecter sur le réseau. Ces composantes sont visibles sur la Figure II - 5. Les limitations pour la composante I_d sont choisies en fonction du courant maximal en sortie de l'onduleur et de la limitation en puissance de la source DC. Les limitations pour la composante I_q sont choisies en

conséquence, de manière à ne pas dépasser la limitation en puissance réactive choisie en fonction d'un tangente phi limite généralement de 0,4.

Cette simplification a conduit à une modélisation dite « modélisation simplifiée par injecteurs de courants », illustrée Figure II - 5.

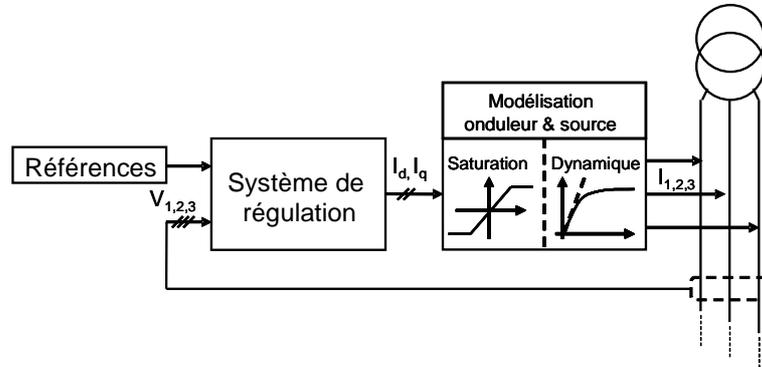


Figure II - 5 : Modélisation simplifiée par injecteur de courant

Ainsi, les courants calculés à partir des références sont les courants injectés au réseau. La PDE et l'onduleur vont être modélisés par une limitation et un retard pour garder l'aspect dynamique de ceux-ci comme cela est visible sur la Figure II - 5 [AZMY-2003], [HINA-2002].

III.3 Contrôle de production en puissance (P/Q)

III.3.a Présentation du modèle

Fort des hypothèses simplificatrices exposées précédemment, il va être à présent possible de réaliser les modèles de PDE cohérents pour la visualisation de l'évolution de la tension suite à la connexion d'une PDE sur un réseau de distribution. Ainsi le premier contrôle est une régulation dite en P/Q, ou tangente phi. Le but de ce contrôle est d'imposer les puissances active et réactive injectées, par la PDE, au nœud de connexion. La Figure II - 6 illustre le système global à commander [MARE-2002].

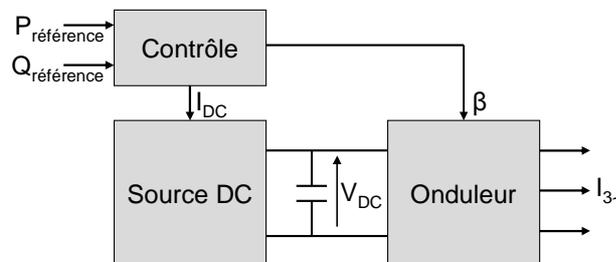


Figure II - 6 : Contrôle en puissance (P/Q)

Les différentes simplifications réalisées après analyse du système nous ont permis de conclure que les courants de consignes en sortie du contrôle amont seront injectés au point de connexion de la PDE. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissances et à la mesure de tension au point de connexion ; ceux-ci vont être calculés dans le référentiel de Park selon (II - 1) [ETXE-2003].

Soit :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \\ Q = \frac{3}{2}(V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q) \end{cases} \quad \text{(II - 1)}$$

On en déduit

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

Où P et Q sont les puissances de référence de la PDE.

V_d et V_q sont les composantes directe et quadratique de la tension, mesurée au point de connexion de la PDE, dans le référentiel de Park.

I_d et I_q sont les composantes directe et quadratique du courant produit par la PDE sur le réseau où elle est connectée.

Ces courants dépendent donc des puissances demandées ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production. Cette tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. Ceci est illustré Figure II - 7.

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau. Ainsi, lorsque le système est dans un régime établi, la composante directe V_d en sortie de la transformation de Park est une image de l'amplitude de la tension mesurée, et la composante quadratique V_q est nulle. Ainsi, les équations (II - 2) font apparaître I_d comme une image directe de la puissance active et I_q comme une image de la puissance réactive.

D'après ces hypothèses le schéma de commande peut être modélisé comme suit :

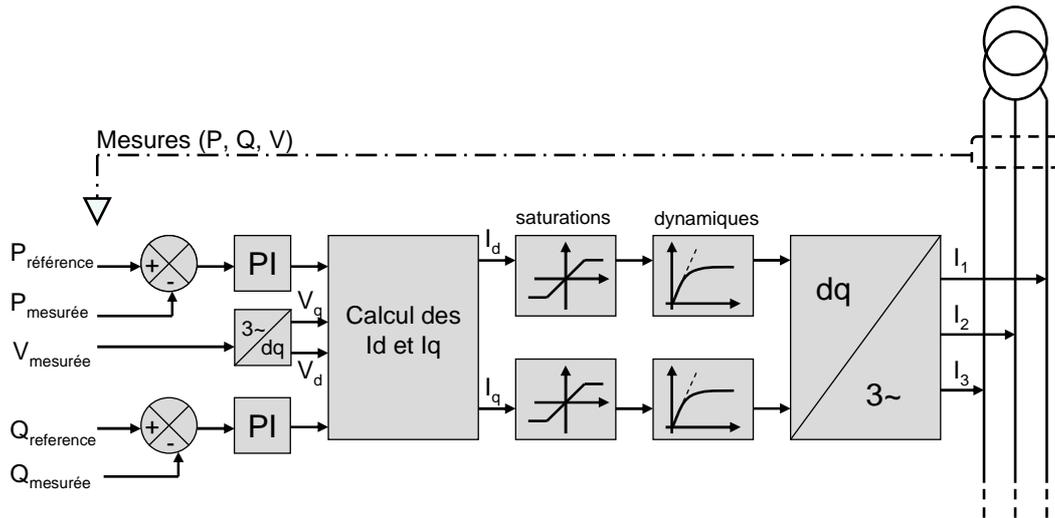


Figure II - 7 : Production contrôlée en puissance

Comme il a été expliqué précédemment, la source primaire et l'onduleur sont modélisés par un retard et une limitation. Deux correcteurs Proportionnel Intégral (PI) sont en charge de réguler les puissances active et réactive à leur valeur de consigne. Les limitations et les dynamiques du système sont traduites sur les courants I_d et I_q , ces signaux sont ensuite traités par une transformation de Park inverse à la même pulsation que celle utilisée pour la transformation de la mesure en tension. Enfin ces courants, traduisant les puissances à commander, sont injectés sur le réseau au point de connexion de la PDE.

L'étude, au sens automatique du terme, de ce système va se faire en séparant la boucle de régulation de la puissance active de la boucle de régulation de la puissance réactive. Le dimensionnement des correcteurs étant similaire pour ces deux boucles de puissance active et réactive, seule l'étude de la boucle de puissance active sera développée.

En considérant que le référentiel de Park choisit tourne à la pulsation de la tension, alors il est possible de fixer $V_q=0$ et $V_d=V_{max}$. De plus en considérant que V_d bouge très peu il est possible de simplifier la régulation de puissance active comme suit :

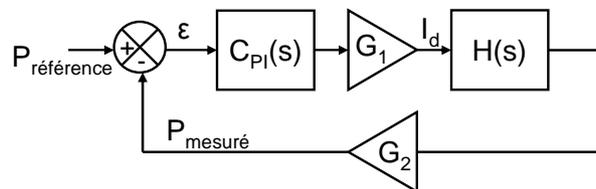


Figure II - 8 : Boucle de régulation de la puissance active.

Avec ϵ la différence entre la puissance de consigne et la puissance mesurée.

G_1 la simplification de l'équation (II - 2) en considérant $V_q = 0$ et V_d comme constant.

G_2 la simplification de l'équation (II - 1) en considérant $V_q = 0$ et V_d comme constant.

$$\text{Avec } G_1 = \frac{2}{3 \cdot V_d} \text{ et } G_2 = \frac{1}{G_1} = \frac{V_d \cdot 3}{2}$$

$H(s)$ est la modélisation de la dynamique de l'onduleur.

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{(II - 3)}$$

Le correcteur est de la forme d'un PI classique donné par la formule (II - 4).

$$C_{PI}(s) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \quad \text{(II - 4)}$$

Où k_p est le coefficient proportionnel et k_i le coefficient intégral du correcteur.

Ainsi, 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 la fonction de transfert du système en boucle fermée Figure II - 8 $F_{BF}(s)$ sous la forme de la fonction transfert du second ordre (II - 5).

$$F_{BF}(s) = \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2} = \frac{C_{PI}(s) \cdot G_1 \cdot H(s)}{1 + C_{PI}(s) \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot H(s)} = \frac{G_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s^2} \quad \text{(II - 5)}$$

$$\text{Ainsi } \begin{cases} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot G_1 \cdot G_2}{\tau} \\ 2\xi = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \end{cases} \quad \text{(II - 6)}$$

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 expressions suivantes :

$$\begin{cases} ki = \omega_n \\ kp = 2 \cdot \xi - 1 \end{cases} \quad \text{(II - 7)}$$

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.

III.3.b Tests et comparaisons du modèle

Ce paragraphe s'attache à montrer les résultats obtenus en simulation avec ce modèle de régulation. Ainsi le modèle présenté précédemment sera simulé sur un réseau test et comparé avec un modèle de PDE plus complet en terme de modélisation physique et de régulation. Ce modèle plus complet est le résultat de travaux de [ETXE-2003] antérieurs à cette thèse, il intègre le contrôle amont ainsi que le contrôle rapproché que nous avons simplifié dans notre approche. Ainsi, le modèle représenté Figure II - 4 comprend une modélisation moyenne de l'onduleur de tension et un contrôle de celui-ci grâce à une boucle d'asservissement de courant [BACH-1994] [ETXE-2003].

Ces deux modèles P/Q vont être simulés pour le même scénario sur un réseau simplifié BT composé d'une ligne de 1km et d'une charge constante (annexe III). Ce scénario se compose de deux événements intervenant à des temps de 6 et 8 secondes. A $t=6s$ la puissance active passe d'une consigne de 30kW à 37,5kW et la puissance réactive passe d'une valeur de 1kVAR à 1,5kVAR à $t=8s$. Les courbes suivantes montrent la superposition des réponses en puissances et en courant des modèles « complet » et « simplifié » pour une régulation P/Q au scénario décrit précédemment.

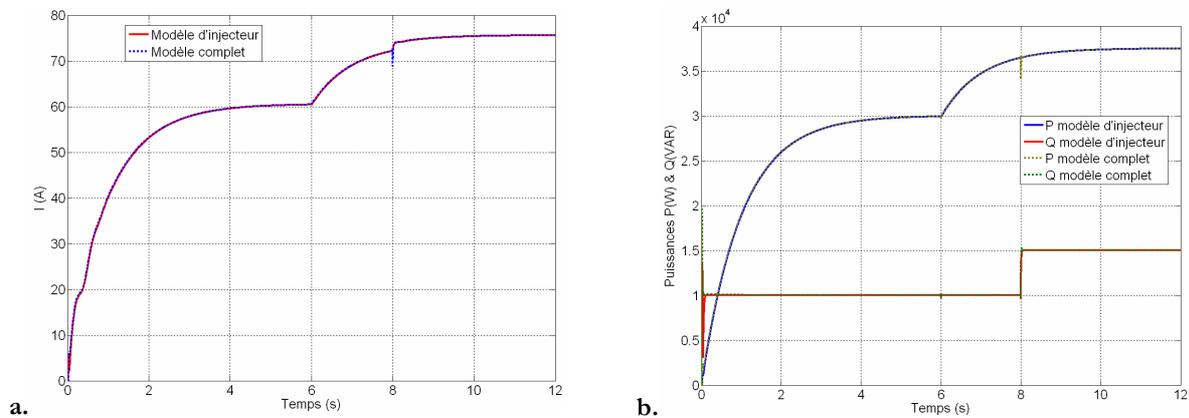


Figure II - 9 : a- Courants injectés au réseau

b- Puissances mesurées au nœud de connexion

Les résultats présentés sur les deux courbes montrent la pertinence, sur le scénario et le réseau considéré, des simplifications effectuées lors de la réalisation de notre modèle de PDE. Ainsi les réponses en courants et en puissances des deux modèles sont très proches, les principales différences viennent lors des transitoires dus aux changements de consignes de productions. En effet, le modèle plus complet utilisant une modélisation plus fine de l'ensemble du système, permet de retranscrire des transitoires plus réalistes, cependant notre application ne nécessite pas une telle précision. Il est donc possible de conclure d'après le bon suivi des consignes, et la réjection efficace des perturbations que les régulations sont valides.

III.4 Contrôle de production en puissance active et tension (P/V)

III.4.a Présentation du modèle

Pour ce modèle, le schéma de principe est pratiquement le même que pour la régulation P/Q ; seul le contrôle du courant I_q diffère.

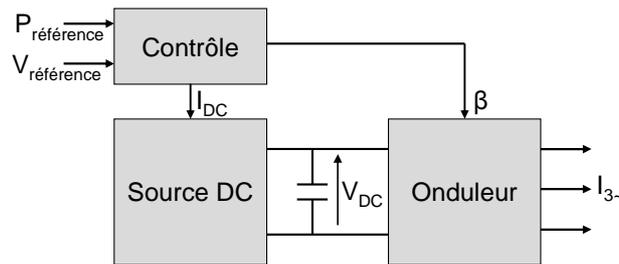


Figure II - 10 : Contrôle en puissance active et tension (P/V)

En effet, le but n'est plus de commander en puissance mais de contrôler la tension ainsi que la puissance active au nœud de raccordement.

Pour régler la tension en ce point, nous allons nous servir de la définition de la variation de tension sur le réseau due au transit de puissance, vue dans le paragraphe III.2.a du premier chapitre :

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad (\text{II - 8})$$

Il va donc être possible de régler V en agissant sur la puissance réactive et ainsi créer une variation de tension positive ou négative permettant d'atteindre la valeur de consigne $V_{\text{référence}}$. Dans ce modèle, seule la puissance réactive règle la tension. En effet, la puissance active pourrait jouer le même rôle que la puissance réactive, surtout dans les réseaux BT où la résistance linéique est plus conséquente que sur les réseaux de niveau de tension plus élevé. Cependant, pour un modèle P/V la puissance active est un paramètre à réguler, on ne peut donc pas s'en servir pour régler la tension.

La simplification du modèle P/V est réalisable en effectuant les mêmes hypothèses que celles utilisées pour simplifier le modèle P/Q [CALD-2003]. Comme précédemment, la source primaire et l'onduleur vont être modélisés par des limitations et des dynamiques.

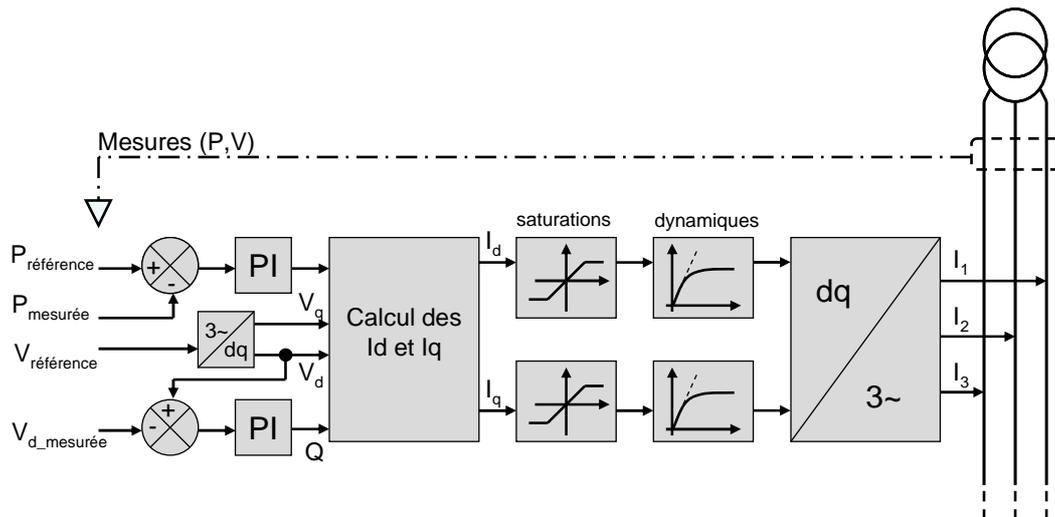


Figure II - 11 : Production contrôlée en puissance active et en tension

La boucle de contrôle de puissance réactive est remplacée par une boucle de contrôle sur la tension. La différence entre l'amplitude de la tension de référence et celle mesurée sur le réseau est traduite, par le correcteur PI, en une quantité de puissance réactive à absorber ou à fournir. Si la tension mesurée est en dessous de la consigne de tension, le système va donc produire plus de puissance réactive ce qui aura pour effet d'augmenter la tension. Inversement, si la tension est trop élevée la puissance réactive injectée sera diminuée. Ainsi, en restant dans les limitations internes au modèle, il va être possible de contrôler la tension ainsi que la puissance active en un point du réseau.

Ici encore le problème de dimensionnement des correcteurs peut être séparé en deux avec d'une part la boucle de régulation en puissance active et de l'autre la boucle de régulation de tension. Les conclusions relatives au dimensionnement du correcteur en charge de la puissance active sont les mêmes que celles obtenues pour le modèles P/Q.

La boucle de régulation de tension peut être modélisée comme suit :

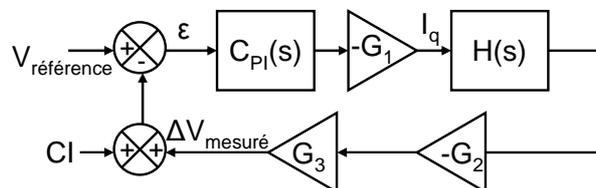


Figure II - 12 : Boucle de régulation de la tension

Les gains G_1 et G_2 et les fonctions $C_{PI}(s)$ et $H(s)$ sont les mêmes que ceux définis pour la Figure II - 8. Le gain G_3 traduit l'impact de la puissance réactive sur la tension, via l'inductance linéique X .

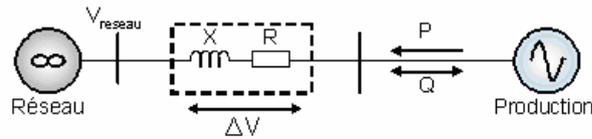


Figure II - 13 : Représentation de l'inductance X intervenant dans l'expression de G_3

Dans cette étude seul l'impact de la puissance réactive sur la tension nous intéresse. Le gain G_3 est donc égale à $\frac{X}{V}$ où X représente la partie inductive de la ligne représentée Figure II - 13. Ainsi, la variation de tension due à la production ou à l'absorption de puissance réactive est obtenue, dans la boucle de régulation, en sortie de ce gain. Il faut y ajouter les conditions initiales de tension pour obtenir finalement une image de la tension mesurée.

Les spécifications du contrôle désiré sont les mêmes que pour la boucle de régulation de puissance, les dépassements vont être évités tout en conservant la dynamique du système modélisé.

Ainsi, dans le but de caractériser les paramètres k_p et k_i du correcteur de la boucle Figure II - 12, la fonction de transfert en boucle fermée peut être donnée sous la forme d'un second ordre:

$$F_{BF}(s) = \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2}} = \frac{G_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_3 \cdot G_2} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot G_3 \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s^2} \quad (\text{II - 9})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}{\tau} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3} \end{cases} \quad (\text{II - 10})$$

Maintenant les paramètres k_p et k_i peuvent être calculés en fixant $\omega_n = \frac{1}{\tau}$ et $\xi = 1$.

$$\begin{cases} k_i = \frac{1}{G_3 \cdot \tau} = \frac{V_d}{X \cdot \tau} \\ k_p = \frac{2 \cdot \xi - 1}{G_3} = \frac{(2\xi - 1)V_d}{X} \end{cases} \quad (\text{II - 11})$$

III.4.b Tests et comparaisons du modèle

Comme dans le paragraphe précédent, les modèles de régulation P/V « complet » et « simplifié » ont été comparés sur un scénario similaire. Ici, les changements de consignes s'opèrent aux temps $t=10s$ où la production de puissance active augmente de 30kW à 40kW et au

temps $t=16$ ou la tension précédemment régulée à une valeur de 1,03pu change pour une valeur de 1,05pu.

Les courbes Figure II - 14 illustrent trois grandeurs à observer à savoir le courant, la tension ainsi que les puissances. La comparaison des modèles complet et simplifié est concluante sur les tests illustrés puisque les réactions des modèles sont très proches. Là encore les principales différences se font sur les transitoires pour les mêmes raisons que pour le modèle P/Q.

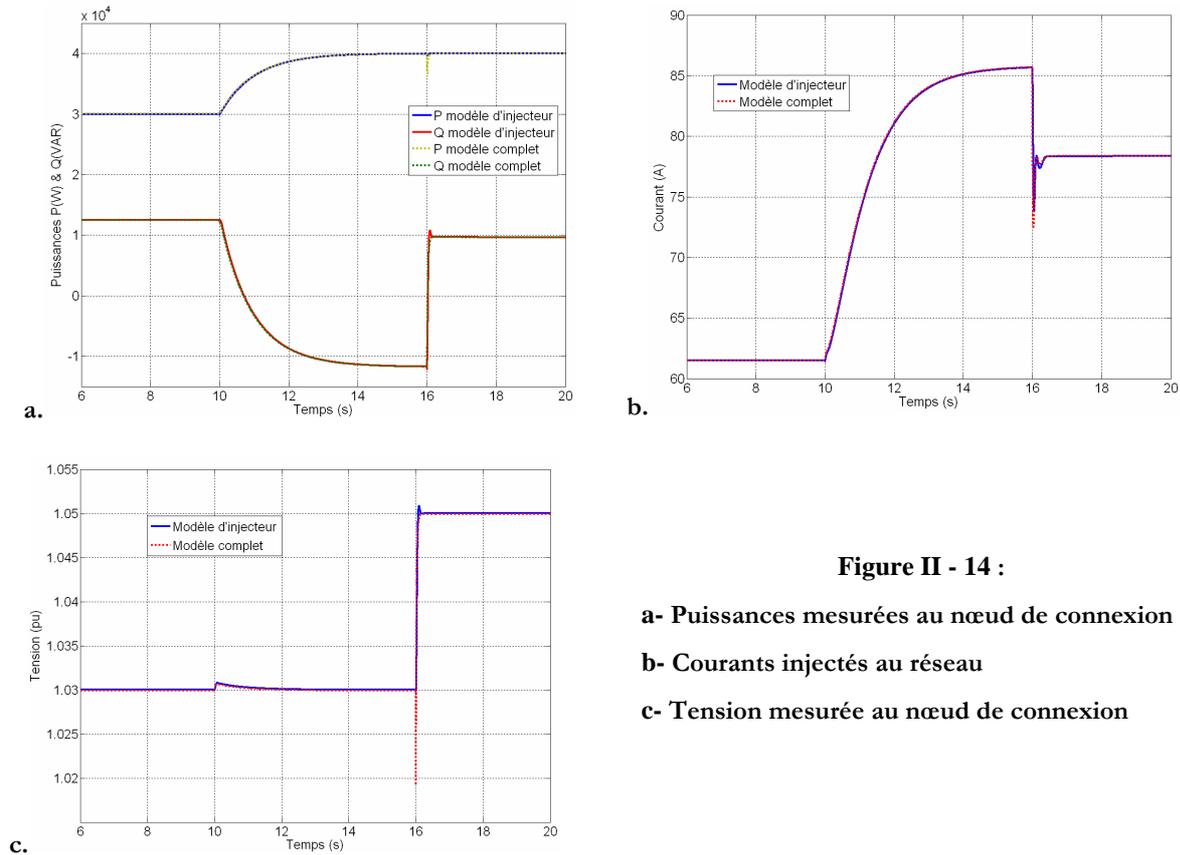


Figure II - 14 :

- a- Puissances mesurées au nœud de connexion**
- b- Courants injectés au réseau**
- c- Tension mesurée au nœud de connexion**

La courbe de tension montre que l'asservissement de celle-ci est efficace puisque les valeurs de consigne sont bien imposées au nœud de connexion de la PDE. Ainsi lors du changement de production à $t=10s$, la puissance active évolue avec la dynamique de la production modélisée. Ainsi, ce changement de production de puissance active a un impact direct sur le niveau de tension. Il est notable que l'évolution de la puissance réactive est donc fonction de cette dynamique dans ce cas puisque celle-ci corrige une erreur de tension fonction de la production de puissance active.

Le deuxième événement est un changement de consigne de tension. Celui-ci est effectué très rapidement puisque la seule dynamique entrant en jeu pour atteindre la consigne est celle de l'onduleur donc de l'ordre de la centaine de millisecondes. Là encore la cohérence entre les résultats autorise l'utilisation du modèle simplifié, assez précis pour retranscrire les phénomènes

d'évolutions de la tension, en fonction des évolutions des productions de puissances et permettant une rapidité de simulation accrue.

Ainsi, la modélisation de production utilisant une association de source primaire et d'un onduleur ainsi que le contrôle spécifique en tension et en puissances est effectué. La pertinence de ces modèles présentés également dans [RAMI-1-2004] a aussi permis la réalisation de travaux transversaux [TRAN-2004] intervenant au sein du projet EDF GERMER (« Gestion des Energies Réparties Mutualisées En Réseau»). Cette étude entre dans un programme d'anticipation à long terme des systèmes électriques intégrant un fort taux de production décentralisée et répartie.

Dans le premier chapitre, nous avons montré que certaines technologies de PDE utilisent une génératrice synchrone comme moyen de conversion. Ainsi le paragraphe suivant s'attache à présenter les modélisations ainsi que les régulations réalisées.

IV Modélisation de PDE de type génératrice synchrone

IV.1 Présentation du système

De la même façon que pour la modélisation précédente, plusieurs éléments peuvent être identifiés dans ce type de production. En effet, la Figure II - 15 schématise la constitution de ce type de PDE composée d'une part par un système d'entraînement de type moteur thermique ou encore un entraînement par pales d'éolienne et d'autre part par une génératrice synchrone.

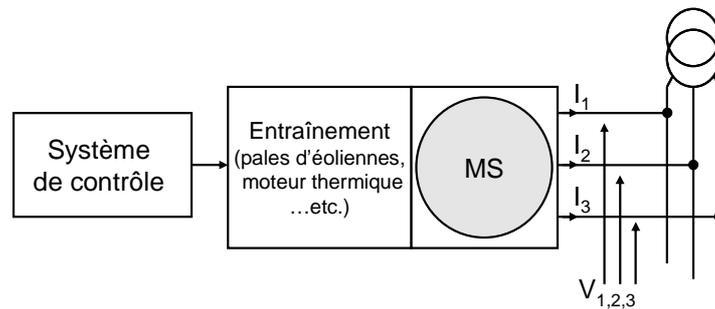


Figure II - 15 : Vision globale du système de production avec génératrice synchrone

La modélisation de telles PDE est moins problématique que la modélisation de productions interfacées via de l'électronique de puissance puisque, un modèle de génératrice synchrone existe sous l'environnement Eurostag. Ainsi nos réflexions sur la modélisation de tout le système ainsi que les hypothèses à poser vont se concentrer sur la façon de représenter le moyen de production ainsi que le système de contrôle de l'ensemble.

IV.2 Hypothèses de modélisation

IV.2.a Simplifications des dynamiques

Les hypothèses réalisées vont être sensiblement les mêmes que celles faites pour modéliser le système précédent. En effet, nous allons traduire le comportement du système de production par ses caractéristiques dynamiques ainsi que par des limitations.

La dynamique du système retenue est, la plus lente c'est-à-dire celle du moyen de production pour la puissance active. La puissance réactive ne dépend elle que du temps de réponse de la génératrice synchrone et de la dynamique du système de régulation. Ainsi des constantes de temps du premier ordre traduisant ces dynamiques sont insérées dans la boucle de régulation des modèles.

IV.2.b Considération des limitations

Le but étant de réaliser des modèles simples, sans modèle physique du système d'entraînement (moteur thermique, éolienne, etc.) représenté Figure II - 15, il est important de connaître les limitations du système qui ici seront traduites en puissance,

- l'élément de production fixe une limite en puissance active débitée,
- l'alternateur synchrone fixe une limitation en puissance réactive débitée via une limitation de tension d'excitation.

En effet, le fait d'agir sur l'excitation de la machine modifie la quantité de puissance réactive échangée avec le réseau. Ainsi une surexcitation de celle-ci va traduire une injection de puissance réactive et inversement une sous excitation de la génératrice va induire une absorption de puissance réactive. Une limitation d'excitation équivaut à une limitation de puissance réactive.

Grâce aux hypothèses précitées, il est possible de simplifier le système de production. La machine synchrone modélisée sous Eurostag est conservée, ses limitations sont retranscrites dans la boucle de régulation et le système de production est modélisé par ses dynamiques et ses limitations en puissance fournie. La Figure II - 16 représente donc le système final modélisé [EURO-2003].

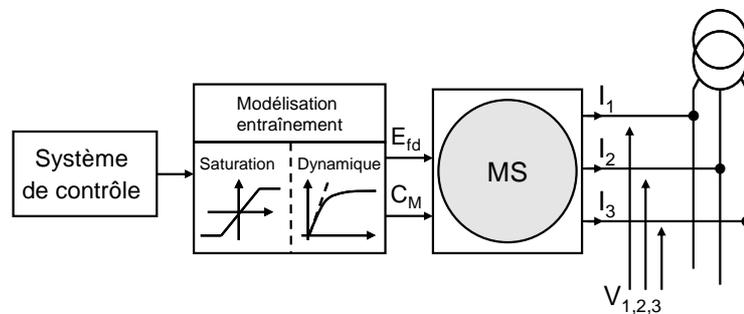


Figure II - 16 : vision simplifié du système de production

Les commandes de la machine sont donc la tension d'excitation pour le contrôle de puissance réactive ou de tension au nœud de connexion de la PDE ainsi qu'une référence de couple mécanique traduisant une puissance active de consigne.

IV.3 Modèle de contrôle de production en puissances (P/Q)

IV.3.a Présentation du modèle

Comme pour les régulations précédemment exposées, les hypothèses réalisées permettent de créer les modèles de régulation désirés en puissance et en tension. Ainsi, il est possible de réguler en puissances active et réactive, le modèle de génératrice synchrone existant sous Eurostag. La Figure II - 17 expose la modélisation d'un contrôle en puissance d'une telle PDE.

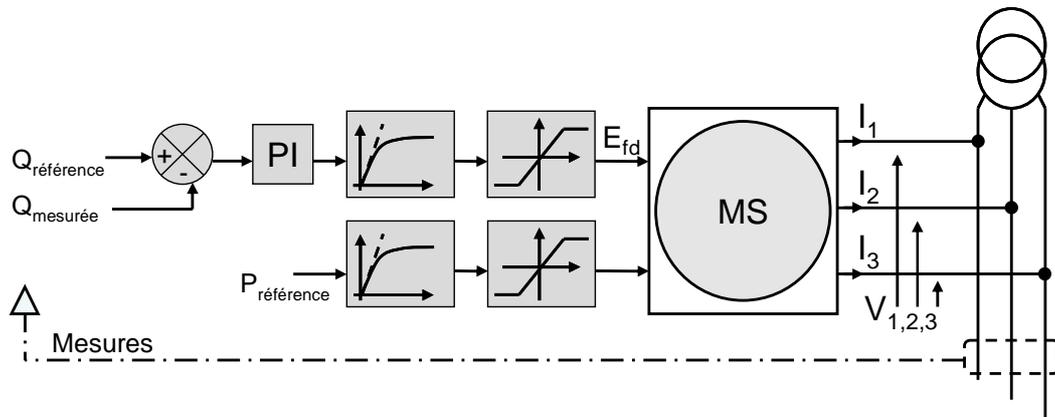


Figure II - 17 : Modèle de production contrôlée en puissances

Ainsi, la source de production est retranscrite par une limitation et une dynamique en puissance active, le modèle Eurostag permet de fixer la consigne d'entrée en puissance directement en sortie de la génératrice. Ainsi, nous n'avons pas ajouté de régulation supplémentaire. Les limitations relatives à la machine synchrone se retrouvent sur la boucle de régulation en puissance réactive. La différence entre la puissance réactive de consigne et celle mesurée est traduite en commande via la tension d'excitation par un correcteur de type PI.

IV.3.b Test par simulations

Ce paragraphe montre les résultats obtenus par simulations grâce aux modèles présentés ci-dessus. Ainsi un scénario est établi pour tester le suivi des consignes en puissances ainsi que la réjection de perturbations. La consigne de puissance active donnée dans un premier temps à 30kW change à $t=8s$ pour une valeur de 35kW. La référence en puissance réactive fixée à 10kVAR passe à $t=14s$ à 15kVAR. Les simulations sont réalisées sous le logiciel Eurostag, sur le réseau SIEL BT de type rural présenté en annexe. La PDE modélisée est connectée au nœud 11.

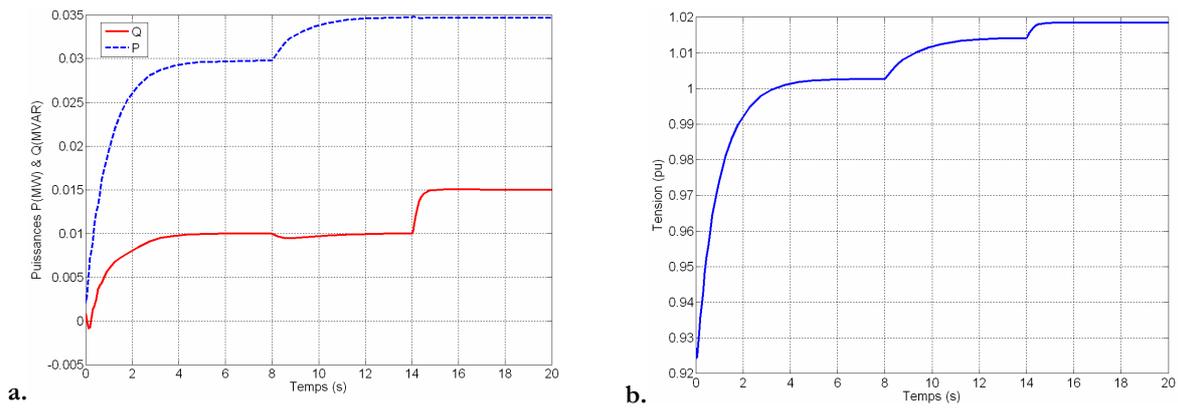


Figure II - 18 : a- Puissances mesurées au nœud de connexion b- Tension mesurée au nœud de connexion

Les courbes Figure II - 18 illustrent trois grandeurs à observer à savoir la tension ainsi que les puissances active et réactive au nœud de connexion. Le bon suivi des consignes de puissances définies dans le scénario y est visible. Ainsi la dynamique de production de puissance active dépendante du moyen de production de l'ordre de quelques secondes est plus lente que celle nécessaire à la puissance réactive pour atteindre sa consigne $Q_{référence}$ (Figure II - 17) puisque celle-ci ne dépend que de la génératrice synchrone.

IV.4 Modèle de contrôle de production en puissance active et tension (P/V)

IV.4.a Présentation du modèle

Ce contrôle revient à réaliser une régulation classique de tension (de type AVR) pour le contrôle de machines synchrones.

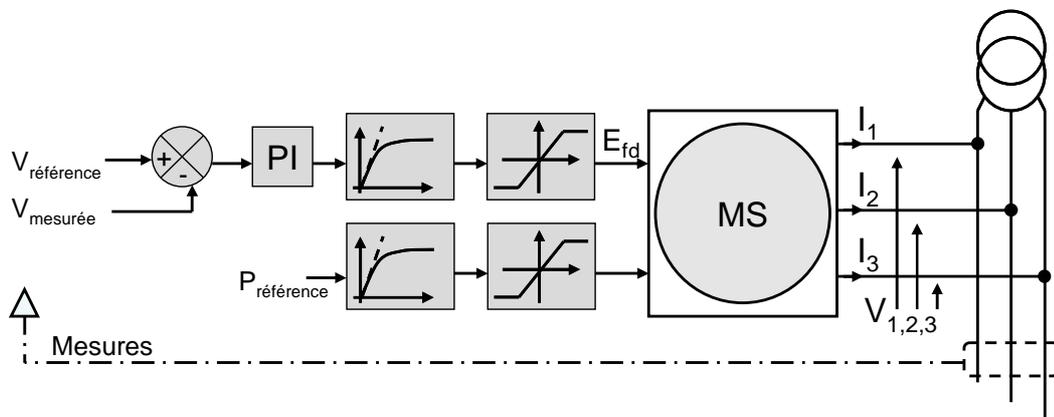


Figure II - 19 : Modèle de production contrôlée en puissance active et en tension

Ainsi, la modélisation du système de production s'effectue grâce aux limitations et aux dynamiques exposées précédemment. Le contrôle de la tension se fait via la tension d'excitation de la machine. D'après la formule (II - 8), surexciter ou sous exciter la génératrice a pour effet de respectivement augmenter ou abaisser la tension au nœud de connexion de la PDE.

IV.4.b Test par simulations

Le régulateur de tension est testé dans les mêmes conditions que le régulateur de puissance. Ici les changements de consignes s'opèrent au temps $t=15s$ où la production de puissance active passe de 30kW à 35kW et au temps $t=21s$ où la tension précédemment réglée à une valeur de 1pu change pour une valeur de 1,01pu.

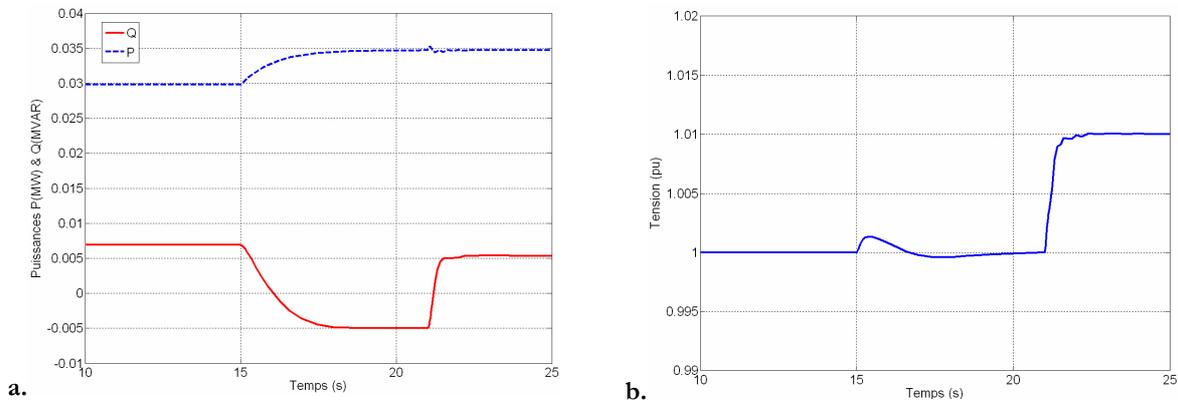


Figure II - 20 : a- Puissances mesurées au nœud de connexion b- Tension mesurée au nœud de connexion

Les régulations illustrées sont efficaces, les consignes sont atteintes et les perturbations bien rejetées. De la même façon que pour le modèle P/Q précédent, le changement de consigne à $t=15s$ entraîne une évolution de la tension et donc de la puissance réactive dont le niveau varie pour garder la tension à la valeur de consigne de 1pu. La deuxième variation de puissance réactive à $t=21s$ correspond au changement de consigne en tension. Ainsi, la puissance réactive évolue en fonction de la dynamique de la machine synchrone pour atteindre la nouvelle consigne de tension de 1,01pu.

V Conclusions

Une définition claire de la problématique de modélisation nous a permis de situer le degré de complexité de la modélisation à réaliser. Cette réflexion nous a donc conduit à réaliser des modèles efficaces et cohérents pour le contrôle de tension ou de puissances de productions connectées au réseau.

Ces résultats ont également permis la réalisation de travaux proches de notre problématique, en effet les résultats publiés par [TRAN-2003], [TRAN-2004] traitent du fonctionnement de réseaux de distribution ilotés rendu possible par l'intégration de PDE, modélisées grâce aux travaux exposés dans ce chapitre.

La création de ces modèles de régulation est une première étape vers le régulateur de tension intelligent pour PDE. Nous nous sommes appuyé sur cette base pour commencer la réflexion menant à la création de ce régulateur. Ayant à disposition d'une part une régulation de puissance et d'autre part une régulation de tension, il va être possible d'hybrider les contrôles créés pour inventer un contrôle capable d'asservir intelligemment les puissances de consignes d'une PDE et de passer, en fonction de certaines contraintes détectées, à une régulation de tension. Ceci est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Développement des régulateurs intelligents de
tension pour des générations d'énergie dispersées

I Introduction

La tension sur les réseaux électriques est sujette à des évolutions dépendantes des heures de fonctionnement de la journée, des enclenchements et des déclenchements de charges et donc de l'équilibre entre la production et la consommation. Or, sur un réseau de distribution, la tension ne peut pas fluctuer librement, celle-ci doit rester comprise dans une fenêtre définie par les limites normalisées. Il a été illustré dans le premier chapitre que la production de puissance par une PDE sur ce type de réseau induit une surtension localisée pouvant générer un non respect des valeurs normalisées définies contractuellement avec le distributeur voire, si l'impact de cette PDE s'avère trop néfaste, le déclenchement de celle-ci par action d'une protection de découplage.

La multiplication de ce type de production sur les réseaux de distribution constitue donc une problématique pour le réglage de tension. Ainsi il est important de penser des contrôles efficaces, capables de conserver la tension et d'éviter un phénomène de surtension trop important au point de raccordement d'une production. Ces contrôles locaux doivent être également capables de réaliser une action de coordination pour une action globale sur la tension du réseau. Ces PDE initialement présentées comme une cause de problèmes, vont être contrôlées de manière à participer aux réglages et au bon fonctionnement de celui-ci.

Le développement de tels régulateurs fait l'objet du chapitre suivant. Ainsi, les étapes qui nous ont amené à réaliser ces régulateurs «intelligents», capables de contrôler la tension localement tout en ayant une réflexion sur la conduite globale de celle-ci sur le réseau, vont être développées.

II Développement du régulateur adaptatif de tension

II.1 Problématique du contrôle local de tension

Il a été mis en avant, dans les chapitres précédents, l'intérêt de développer des contrôles efficaces de PDE pour pallier les problèmes induits par leur connexion au réseau. En effet, dans le cadre d'une insertion massive de petites productions il est possible, et dans certain cas nécessaire, de faire participer ces mêmes productions au réglage de tension.

Pour cela, il a été exposé deux types de contrôles existants, le premier régulant les puissances injectées au point de connexion de la PDE, le second régulant la puissance active ainsi que la tension via un contrôle en puissance réactive.

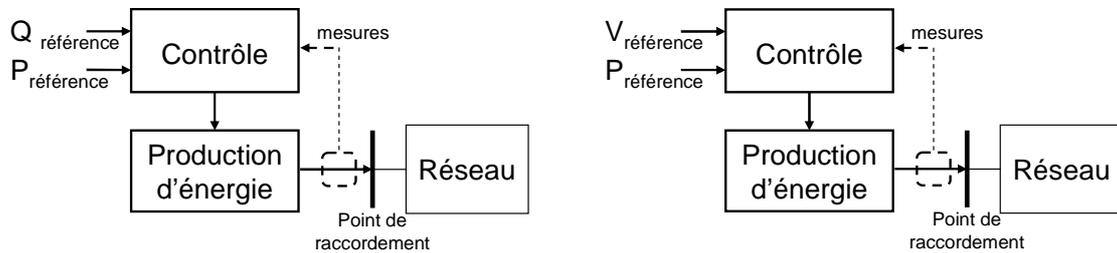


Figure III - 1 : Système de régulation de PDE à disposition

Ainsi, les PDE disposées sur une partie du réseau peuvent participer au réglage de tension, cependant certaines questions se posent:

- Qui décide de changer les valeurs de consigne de ces PDE?
- De combien? (La quantité nécessaire pour ramener la tension dans les limites admissibles)
- Quand et combien de temps ? (Le moment et la durée de changement)
- Où ? (Quelles PDE ?)

Telles sont les problématiques d'un contrôle de tension sur le réseau de distribution à l'aide de PDE. Le contrôle existant du réseau de transport (cf. Chapitre.I, §I.2.2) réalise sa fonction de réglage en coordonnant les productions, celui-ci calcule les consignes de puissances de chaque groupe de manière optimale en fonction d'informations mesurées. Un tel système de contrôle peut être pensé pour le cas de la distribution, cependant celui-ci peut s'avérer difficile à mettre en place de par la multitude et la nature sporadique des productions. De plus, une quantité significative de PDE de petite puissance n'est en général ni observable, ni dispatchable. Ainsi, les stratégies de contrôle de type centralisé, utilisant des communications entre les PDE et le gestionnaire du réseau sont difficilement réalisables à cause de contraintes techniques et financières. En effet, cela augmenterait sensiblement le coût de raccordement dû à l'intégration supplémentaire des équipements de mesure et de communication.

Notre approche du contrôle de tension sera donc locale, c'est-à-dire n'utilisant aucune communication pour une coordination entre PDE. Ainsi, nous nous sommes focalisés, dans un premier temps, sur le problème de surtension vu de la PDE, c'est-à-dire au nœud de connexion

de la production. En effet, si il est possible de contrôler la PDE efficacement, il peut être possible d'effacer le problème de tension engendré par celle-ci.

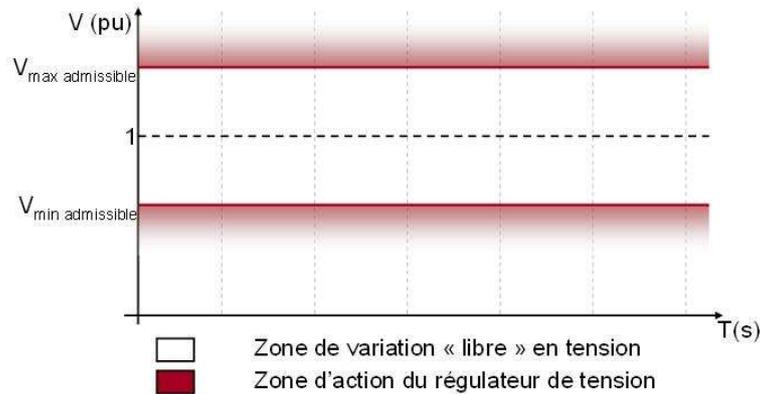


Figure III - 2 : définition des zones d'action

La Figure III - 2 présente le principe de fonctionnement de la première approche du contrôle. Sur les réseaux de distribution des limites contractuelles sont fixées ($\pm 5\%$ en HTA $-10\% + 6\%$ en BT), le gestionnaire s'engage à maintenir, en moyenne, la tension du réseau dans cette fenêtre. Pour cela, la stratégie de régulation adoptée est de produire des puissances de consigne tant que la tension mesurée au nœud de connexion de la PDE ne sort pas de la fenêtre contractuelle et, de réguler la tension pour la conserver au niveau des limites admissibles dans le cas contraire. Ainsi, les contrôles développés en puissance et en tension vont nous servir de base pour réaliser ce type de régulation. Ces contrôles vont être hybridés pour réaliser un régulateur en puissances de type P/Q capable de basculer le contrôle en tension de type P/V en fonction de contraintes sur les niveaux de tension.

II.2 Régulateur adaptatif de tension

Le régulateur adaptatif est réalisé pour effacer les surtensions locales. Ainsi, un contrôle capable de basculer automatiquement d'un mode de régulation P/Q, utilisé lorsque le plan de tension se trouve entre les limites autorisées (fenêtre d'admissibilité), à un mode de régulation P/V utilisé lorsque la tension doit être corrigée, doit être réalisé.

Le principe va être de détecter les niveaux de tension et, lorsque cela s'avère nécessaire, d'agir sur la puissance réactive fournie pour ajuster la tension. Un premier modèle de correcteur adaptatif va être développé, en intégrant la boucle de tension du modèle P/V dans le modèle P/Q. [KIPR-2003], [EDF-2001].

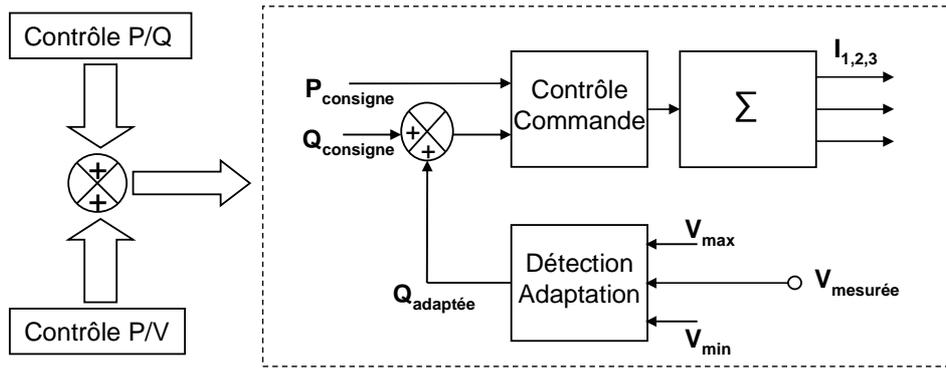


Figure III - 3 : Hybridation des modèles P/V et P/Q amenant le contrôle adaptatif

II.2.a Principe de fonctionnement du correcteur adaptatif

Le régulateur à réaliser se trouve dans la fonction « Détection Adaptation » de la Figure III - 3. Ce contrôle est défini comme contrôle « amont » dans le chapitre précédent, c'est-à-dire celui qui définit le comportement de la PDE. Ainsi, lorsqu'une régulation de tension est nécessaire le système de régulation agit sur la valeur de puissance réactive de consigne à produire ou absorber par la PDE. [VOVO-2005]

Le fonctionnement du système est celui du modèle de régulation en puissance (P/Q, PF/VAR) auquel une boucle de correction de consigne de puissance réactive est ajoutée. Cette boucle de réaction est très similaire à la boucle de régulation de tension du modèle P/V, à la différence près que l'objectif n'est plus une consigne fixe mais une fenêtre de tension à ne pas dépasser. Ainsi, les problèmes de régulation et de détection de tensions critiques vont être scindés en deux, avec d'un côté un correcteur régulant les tensions hautes et de l'autre un correcteur régulant les tensions basses.

Grâce à cette vision du problème, il est désormais possible de réaliser deux boucles de contrôle indépendantes, sur le même schéma qu'une boucle de tension classique. Prenons le cas du correcteur de tensions hautes Figure III - 4.

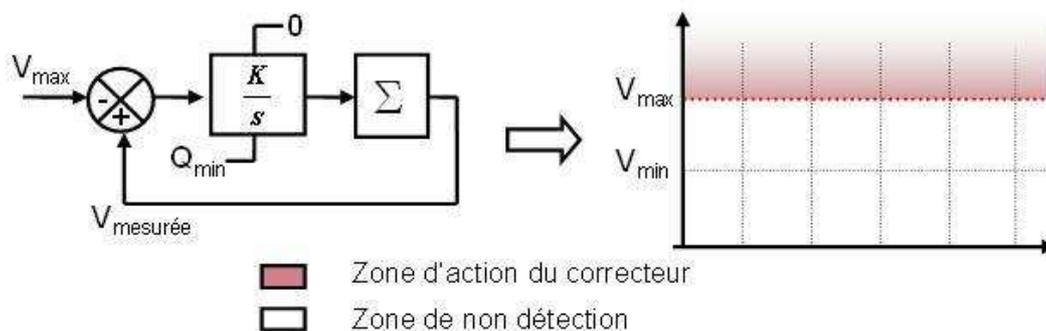


Figure III - 4 : Boucle de régulation en charge du contrôle des tensions hautes

Les correcteurs illustrés Figure III - 4 et Figure III - 5 traduisent une erreur de tension en quantité de puissance réactive à produire ou à absorber. Cependant, ce correcteur est limité de telle façon qu'il ne peut que fournir une consigne de puissance réactive négative. Par ce principe, ce correcteur n'agit que lorsque la tension dépasse la limite haute V_{max} . Ainsi, la fonction détection et adaptation est réalisée pour les cas de surtensions.

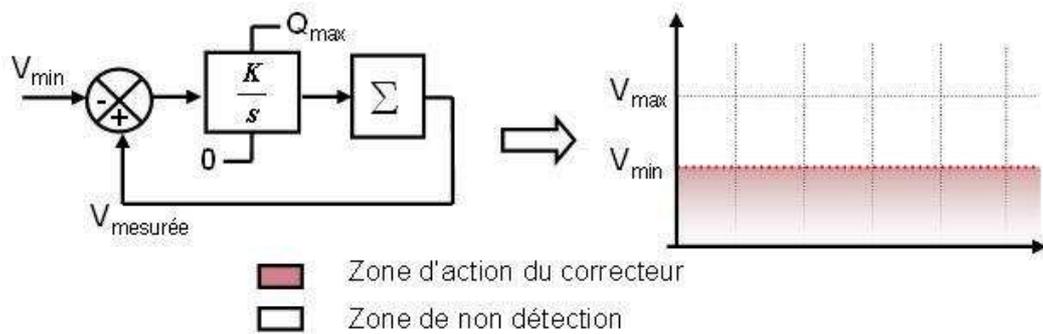


Figure III - 5 : Boucle de régulation en charge du contrôle des tensions basses

De la même façon, un correcteur et allié à une limitation régule les tensions basses. Les valeurs autorisées en sortie de ce régulateur sont des valeurs de puissance réactive positive. L'action conjointe de ces deux branches de régulation réalise la fonction désirée de basculement de régulation de puissances à une régulation en tension (Figure III - 3).

Le système dans sa globalité a deux boucles imbriquées, la boucle de détermination de la consigne en puissance réactive du bloc « détection adaptation », ainsi qu'à l'intérieur de celle-ci la boucle de régulation de puissance réactive du bloc « contrôle commande » de la Figure III - 3. Cette dernière a déjà été illustrée dans le chapitre II lors de la présentation des modèles de régulations P/Q. Pour éviter de rendre tout ce système instable la boucle de régulation de puissance doit être plus rapide que la boucle de détermination de puissance réactive. Ainsi, sachant que la dynamique de la première boucle est dimensionnée pour être celle de l'onduleur, la dynamique de la boucle de détermination de la puissance réactive sera deux fois plus lente. [HAUT-1997]

II.2.b Test du régulateur adaptatif de tension

Le régulateur adaptatif étant développé, ce système doit être capable de s'adapter aux contraintes du réseau et de réaliser une fonction de contrôle de tension locale. Les performances et les limites d'un tel contrôle doivent donc être testées. Ainsi, dans ce paragraphe, deux contrôles vont être comparés, un premier en tangente phi, puis le contrôle adaptatif sur le même scénario. Ce scénario est réalisé sur le réseau SIEL, réseau 14 nœuds présenté en annexe III ainsi que sur la

Figure III - 6. Pour une bonne illustration des performances ainsi que des limites de tels régulateurs un taux d'insertion de 75% est simulé. En effet, un tel taux de pénétration va engendrer des surtensions locales aux points de connexion des productions dont certaines vont dépasser les limites admissibles de tension. Le scénario utilisé permettra tout au long de ce chapitre d'illustrer le cheminement du contrôle adaptatif vers le régulateur intelligent final dit « auto adaptatif ».

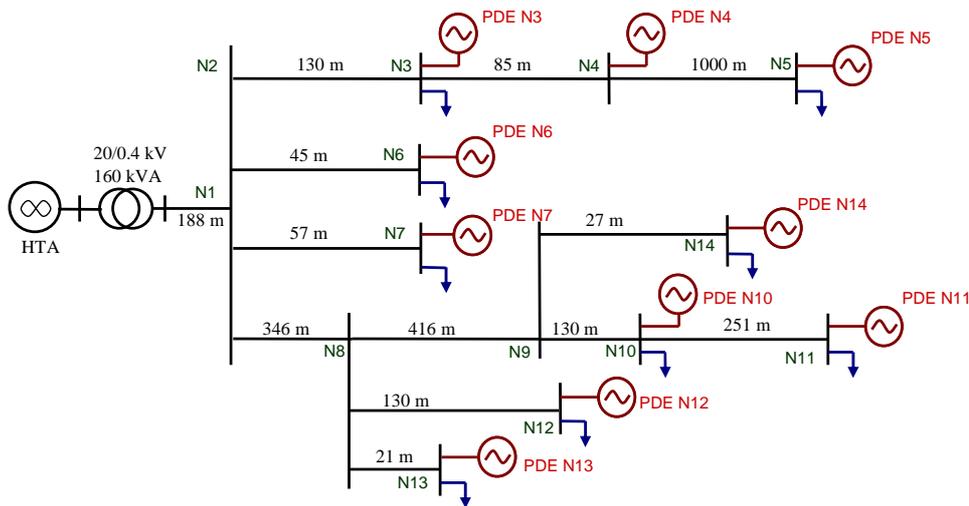


Figure III - 6 : Réseau SIEL BT avec 10 PDE connectées

La Figure III - 6 présente la configuration du réseau envisagée dans le scénario suivant :

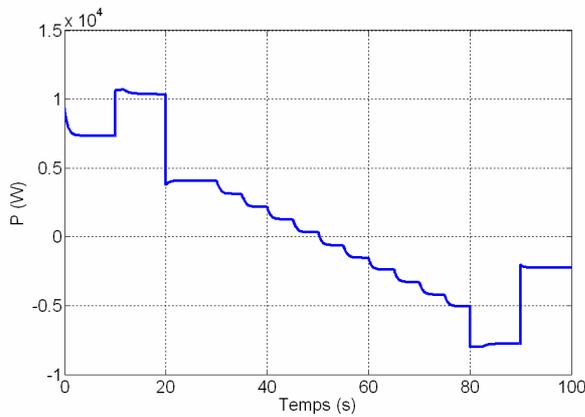


Figure III - 7 : Transit dans le poste source pour le scénario défini

- Changement de charge :
 - $t=10s : \Delta S_{charge} = 40\%$;
 - $t=20s : \Delta S_{charge} = -55\%$;
 - $t=80s : \Delta S_{charge} = -50\%$;
 - $t=90s : \Delta S_{charge} = 200\%$;
- Changement de consigne de production des PDE successif toutes les 5s de $t=30s$ à $t=75s$. Les PDE passent d'une production de 2kW à 12kW.

Ces événements nous amènent lors du déroulement du scénario d'un cas où une forte charge ainsi qu'une faible production sont présentes sur le réseau, à un cas avec une forte production ainsi qu'une faible charge.

II.2.b.1 Test pour des PDE contrôlées en tangente phi

Dans un premier temps les PDE sont contrôlées en tangente phi (P/Q), le modèle de contrôle en puissances est donc utilisé. Aucun contrôle sur la tension n'est réalisé, ainsi la consigne production de puissance réactive de chaque PDE est nulle. Seule la production de puissance active est considérée, en laissant la tension fluctuer librement.

Pour plus de lisibilité, les courbes seront illustrées et groupées en fonction des contraintes visibles en tensions. La Figure III - 8.a illustre les évolutions superposées des tensions des PDE 5 et 11 situées en bout de ligne, et la Figure III - 8.b l'évolution des PDE 10 et 14. De plus sur ces deux courbes est ajoutée la tension au nœud N2 de manière à voir l'évolution de la tension à l'origine de chaque départ.

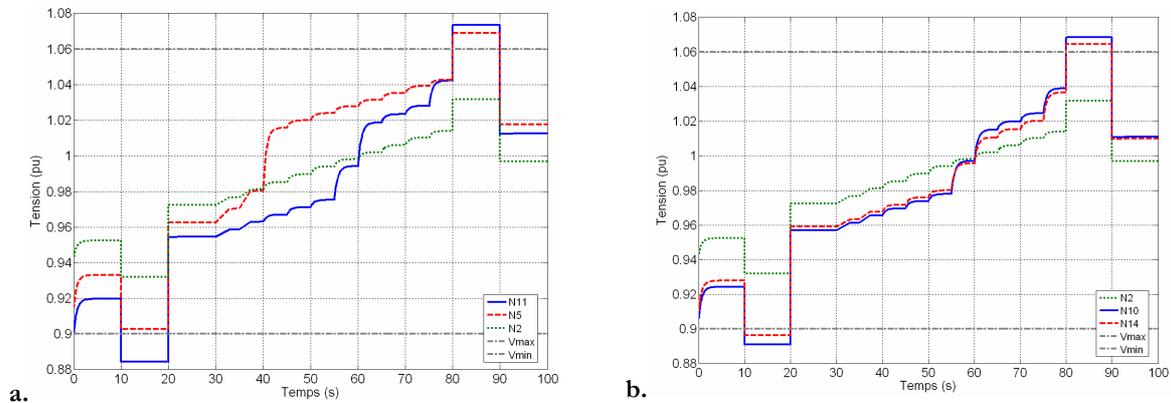


Figure III - 8.a : Evolution de la tension des PDE N11 et N5, 8.b : Evolution de la tension des PDE N10 et N14

Dans ce scénario, deux cas critiques d'exploitation sont illustrés, le premier avec un faible taux d'insertion (forte charge et une faible production), le second avec un fort taux d'insertion (faible charge mais une forte production). Ceci nous amène à constater des sous tensions aux temps $t=10$ à $20s$ pour les PDE N11, N10 et N14, ainsi que des surtensions aux temps $t=80$ à $90s$ pour les PDE N11, N10, N14 et N5. Les tensions vues par les autres unités de productions ne sont pas critiques et restent dans des valeurs admissibles ; aussi celles-ci ne sont pas représentées ici.

Ce scénario met donc en évidence le dépassement des limites de tension dû à la production de puissance active sur un réseau de distribution, BT dans ce cas. Ainsi il va être possible d'intervenir grâce aux groupes de productions, sur la tension en absorbant ou fournissant de la puissance réactive selon les contraintes mesurées au point de connexion de chaque PDE. Le contrôle adaptatif créé va donc être testé sur ce même cas.

II.2.b.2 Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur adaptatif

Le scénario précédent est réutilisé pour tester le contrôle adaptatif, les consignes de tensions sont fixées aux limites admissibles maximale de 1.06 pu et minimale 0.9 pu des réseaux BT. Ainsi, si la tension dépasse ces valeurs, la production de puissance réactive des PDE va être modifiée pour maintenir la tension dans la fenêtre définie.

Trois courbes illustrent les réactions des machines, les deux premières représentent les évolutions des tensions des PDE précédemment identifiées comme étant sous contraintes, puis une troisième courbe illustre la fourniture en puissance réactive de ces machines.

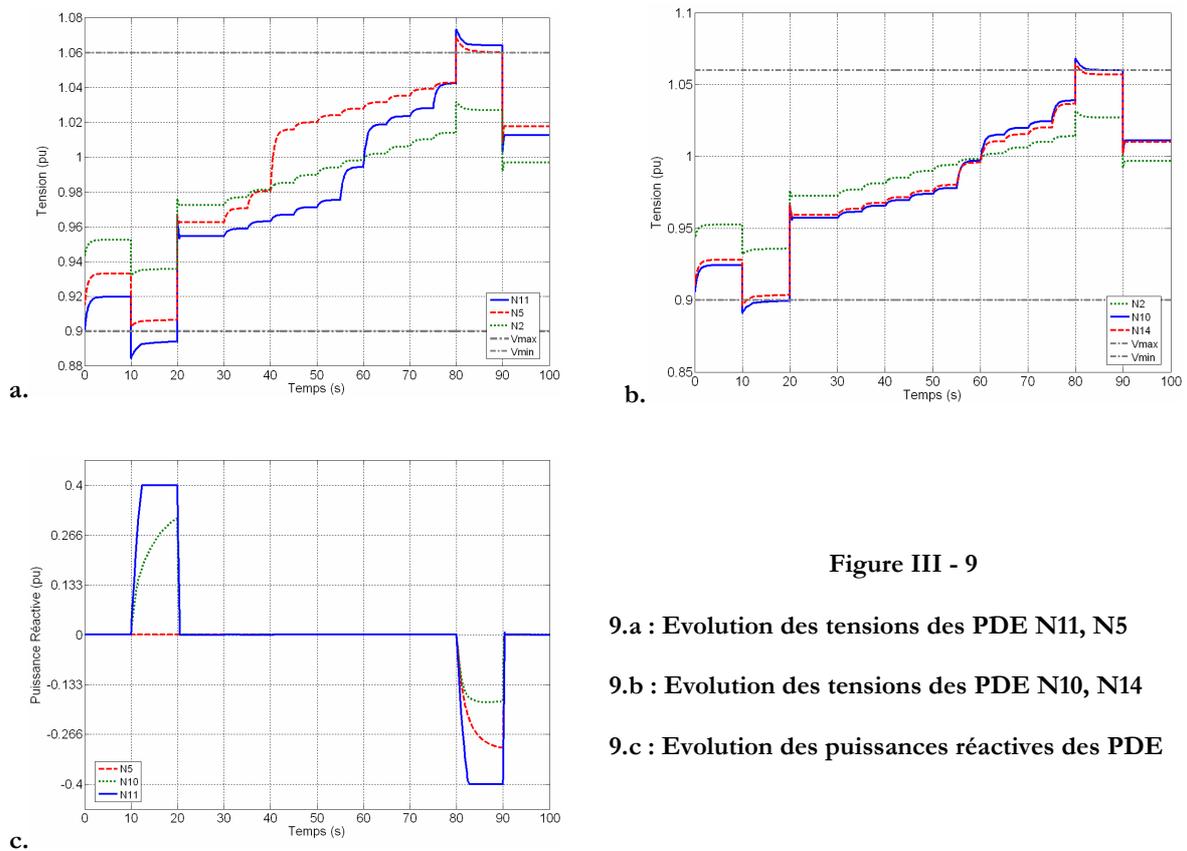


Figure III - 9

9.a : Evolution des tensions des PDE N11, N5

9.b : Evolution des tensions des PDE N10, N14

9.c : Evolution des puissances réactives des PDE

Les résultats obtenus montrent que ce type de régulation est efficace pour les PDE N5, N10 et N14. En effet, les tensions critiques des simulations précédentes sont évitées par une action sur leur production de puissance réactive. Cependant ceci n'est pas suffisant pour le cas de la PDE N11. Les Figure III - 9.a et 9.c montrent que ce groupe, en bout de ligne, ne peut pas contrôler efficacement la tension en son nœud de connexion. Celui-ci n'a pas une capacité de production de puissance réactive assez grande. Cette PDE étant en limitation, elle ne peut plus agir sur la tension.

Il est donc nécessaire de profiter de l'aide des autres PDE, en effet, si les productions en aval des groupes en bout de ligne participaient au contrôle, l'effort à fournir par ceux-ci serait

moins important. C'est dans cette optique que va être ajoutée une fenêtre de tensions limites plus étroites que la fenêtre d'admissibilité.

II.2.c Mise en place des modes de régulation du correcteur adaptatif

II.2.c.1 Principe de fonctionnement

Les simulations précédentes ont mis en avant le manque de coordination des PDE. En effet, les unités en bout de ligne voient une contrainte en tension beaucoup plus importante que ceux proches du poste de transformation. Ainsi, le poste source fixant une tension proche de la tension nominale, les productions voisines ne détectent pas de contrainte et ne participent pas au contrôle de tension. Il est nécessaire de répartir l'action de réglage pour une meilleure efficacité.

C'est dans cet objectif que le régulateur adaptatif va évoluer. Le principe est simple, pour faire participer toutes les PDE aux réglages, une fenêtre de tension « désirée » va être ajoutée au principe de contrôle. Au delà de cette fenêtre de tension, plus étroite que la fenêtre de tension admissible précédente, la production passe en régulation de tension. Il va donc être possible de faire réagir les PDE avant d'atteindre les tensions critiques.

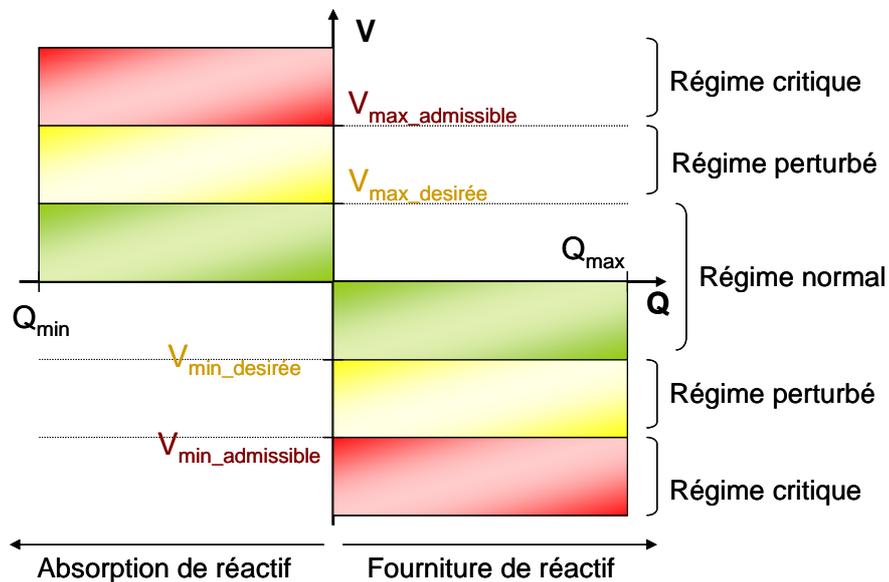


Figure III - 10 : Régimes de fonctionnements du régulateur adaptatif

Trois modes de fonctionnement du régulateur sont définis Figure III - 10. Ceux-ci correspondent à trois régimes de fonctionnement possibles :

- Le régime normal: dans ce mode de fonctionnement, la tension est située dans une fenêtre de tensions "désirées" définie ($V_{\min \text{ désirée}} \leq V \leq V_{\max \text{ désirée}}$). Dans le régime normal, les PDE sont contrôlées en puissances active et réactive (mode PF/VAR pour les machines synchrones et mode P/Q pour les sources DC utilisant un onduleur).

- Le régime perturbé: dans ce mode de fonctionnement, la tension sort des limites désirées ($V > V_{\max \text{ désirée}}$ ou $V < V_{\min \text{ désirée}}$). Le but du régulateur adaptatif est de maintenir, dans les limites du système, la tension entre ces bornes fixées. Ainsi en régime perturbé, les PDE passent en mode de régulation de tension (mode AVR pour les machines synchrones et mode P/V pour les sources DC utilisant un onduleur). Ici, seule la puissance réactive est utilisée pour contrôler la tension au point de connexion de la PDE, qui absorbe ou fournit de la puissance réactive pour respectivement diminuer ou augmenter la tension. Ainsi, l'unité de production va contrôler la tension aux limites désirées minimales ou maximales selon que la tension est trop basse ou trop élevée. Il peut y avoir des cas où la PDE entre en limitation, c'est-à-dire qu'elle ne peut plus ni fournir ni absorber plus de puissance réactive. Dans ce cas, la PDE ne peut plus assurer le contrôle de tension aux limites désirées, la tension peut évoluer jusqu'à atteindre les limites admissibles en tension, amenant la PDE à passer en régime critique.

- Le régime critique: dans ce mode de fonctionnement, la tension sort des limites d'admissibilité ($V > V_{\max \text{ admissible}}$ ou $V < V_{\min \text{ admissible}}$) et, comme expliqué précédemment, la PDE ne peut plus agir par compensation de puissance réactive ($Q = Q_{\min}$ ou $Q = Q_{\max}$). Dans ce cas critique pour le réseau, la PDE est en limitation et l'action par le biais de la puissance réactive n'est plus possible. Une action sur la puissance active devient nécessaire. Ainsi en régime critique une partie de la puissance active produite va être utilisée, en tant que dernier recours, pour contrôler la tension. Les PDE passent en mode de régulation de puissance active. La PDE diminue (ou augmente) sa production de puissance active afin de ramener la tension à la valeur $V_{\max \text{ admissible}}$ (ou $V_{\min \text{ admissible}}$). Dans ce cas, les valeurs limites de puissance réactive changent du fait que la puissance active change.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{III - 1}$$

L'action de réduction de production est équivalente à une action de reprise de charge pour diminuer la tension.

Grâce aux régulations de puissance active et réactive, une solution de sauvegarde de la tension est toujours trouvée dans n'importe quel régime de fonctionnement. Cependant l'action sur la puissance active reste une action de secours puisque celle-ci est vendue par le producteur

qui n'a donc aucun intérêt à faire du réglage de tension par ce biais, ou alors grâce à une compensation financière appropriée.

Les illustrations de fonctionnement de ce régulateur seront faites pour des consignes fixées et identiques pour chaque PDE.

II.2.c.2 Test des modes de régulations intégrés au contrôle adaptatif des PDE

Ce contrôle est testé toujours sur le même scénario et les consignes désirées sont définies de manière identique pour toutes les unités de production. Ainsi, $V_{\max_désirée}=1,03pu$ et $V_{\min_désirée}=0,95pu$; ces valeurs plus petites que les valeurs de tensions admissibles vont permettre aux PDE de participer à la régulation avant d'atteindre les valeurs critiques, et donc de forcer la participation de unités n'agissant pas sur leurs puissances réactives précédemment.

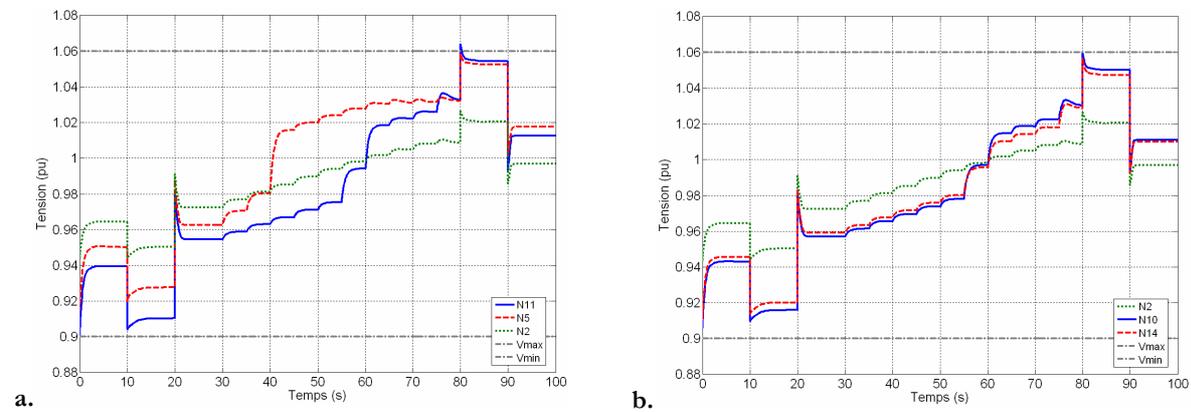


Figure III - 11.a : Evolution de la tension des PDE N11 et N5, 11.b : Evolution de la tension des PDE N10 et N14

Les courbes de tension Figure III - 11.a et 11.b permettent de constater que cette solution est efficace, dans ces conditions, pour garder la tension en tous points du réseau à l'intérieur de la plage de tensions admissibles. En effet, la PDE N11 conserve une tension inférieure à V_{\max} admissible pendant la durée du scénario. Cependant, cette solution offre une marge de manœuvre réduite. Les Figure III - 12 montrent que pendant la période de $t=10$ à $t=20s$, 8 PDE sur 10 produisent leur capacité maximale de puissance réactive. Les puissances réactives des PDE N6 et N7 ne sont pas montrées car leurs participations respectives sont nulles. Avec de telles consignes en tension désirées les PDE en bout de ligne vont atteindre leurs limites de production ou d'absorption de puissance réactive très rapidement. Une meilleure stratégie de contrôle serait de faire participer un peu plus les unités proches du poste source pour soulager ceux en bout de ligne en donnant à chaque PDE des consignes de tension désirées propres, fonction des tensions mesurées à leurs points de raccordement et des puissances réactives fournies.

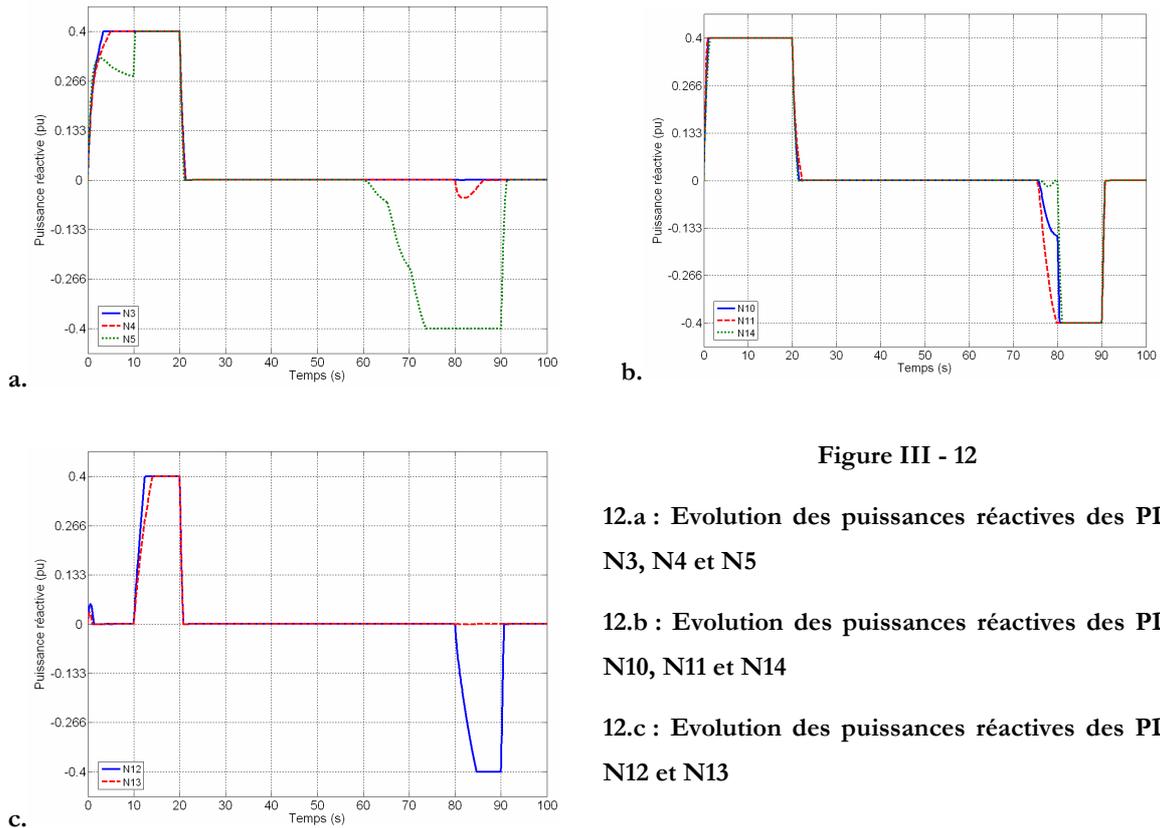


Figure III - 12

12.a : Evolution des puissances réactives des PDE N3, N4 et N5

12.b : Evolution des puissances réactives des PDE N10, N11 et N14

12.c : Evolution des puissances réactives des PDE N12 et N13

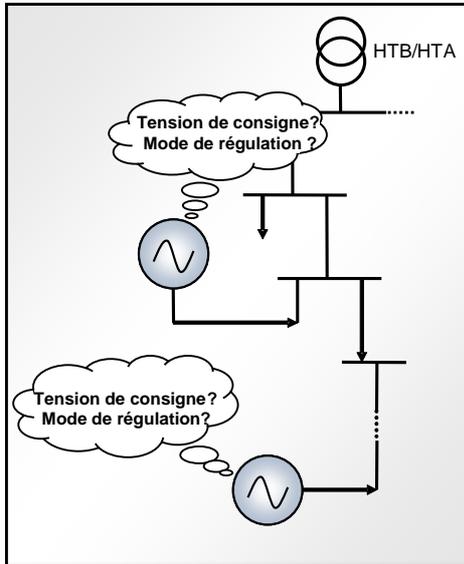
III Le régulateur auto adaptatif de tension

Les contrôles développés dans le paragraphe précédent sont efficaces et permettent une adaptation des modes de régulation en fonction de contraintes en tension mesurée localement. Cependant les limites de ceux-ci ont été mises en avant. En effet, le fait de fixer des consignes de tension désirées améliore le contrôle global de la tension sur le réseau, mais ceci n'est pas réalisé de manière optimale. La participation de chaque PDE est mal répartie et il est nécessaire de fournir une fenêtre de tension désirée différentes pour chaque PDE en fonction de sa position et donc des contraintes auxquelles elle est confrontée.

Du fait d'avoir des limites désirées réglables, plusieurs stratégies de contrôle sont offertes avec un tel régulateur. Ainsi, ces fenêtres de tensions désirées peuvent être soit fournies intelligemment de manière autonome par une supervision de contrôle embarquée, soit calculées et actualisées à une fréquence définie par le gestionnaire de réseau (GRD). En effet, après calculs, le GRD peut imposer des valeurs différentes pour chaque PDE pour une meilleure répartition des contraintes. Un calcul d'optimisation du plan de tension est nécessaire pour deux régimes extrêmes (régime de faible charge associée à la production maximale ; régime de forte charge

associée à la production minimale) pour déterminer ces valeurs. Ces valeurs peuvent être modifiées en cas nécessaire, par exemple pour un changement de configuration du réseau. Cependant, cette solution n'est pas dans l'optique de la création d'un contrôle de tension indépendant et sans communication.

Ainsi, nous nous sommes demandés : est ce que la production peut être capable d'évaluer



les contraintes et de calculer elle-même ses tensions de consignes de manière optimale ?

Nous sommes partis du régulateur adaptatif auquel va être ajouté une supervision « intelligente » [EKEL-1999] [EKEL-2001] et capable de calculer des consignes de tension désirées de manière autonome grâce à des mesures locales. Cette supervision intelligente est réalisée grâce à de la logique floue. Pour faciliter la compréhension, la première partie de ce paragraphe présente cette logique, puis, suivra le développement et le test du régulateur auto adaptatif.

Figure III - 13 : Stratégie de réglage de tension à l'aide du régulateur auto adaptatif

III.1 Introduction et principe de la logique floue

III.1.a Présentation de la logique floue

La logique floue a été introduite au début du XX siècle (1965) par le professeur Lotfi A.Zadeh. Depuis, les applications de ces techniques ne sont pas restées uniquement théoriques. En effet, cette logique est également intégrée dans des systèmes grand public comme des machines à laver ou encore des caméscopes [CHEV-1998] [RUBA-2004].

L'intérêt de la logique floue est premièrement dans la proximité d'un raisonnement humain. En effet, la prise de décision d'un opérateur est fonction de plusieurs variables décrites de manière qualitative et non grâce à des valeurs numériques précises. Deuxièmement, cette logique est intéressante car elle permet la prise de décision malgré l'absence d'une modélisation de système amont complexe comme le réseau électrique dans notre cas. En effet, le contrôle réalisé grâce à cette logique va pouvoir s'appliquer sur n'importe quel réseau (HTA, BT, etc.) et quelle que soit sa configuration [MOMO-1995] [TOMS-1993].

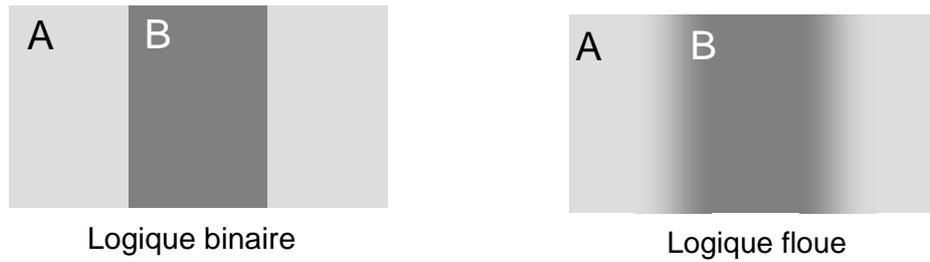


Figure III - 14 : Illustration de la différence de définition entre la logique floue et la logique binaire

La Figure III - 14 [CHEV-1998] illustre le fait que cette logique permet d'obtenir des décisions moins catégoriques que celles de la logique booléenne, où la contradiction est impossible et une réponse est vraie ou fausse [ABDE-2001].

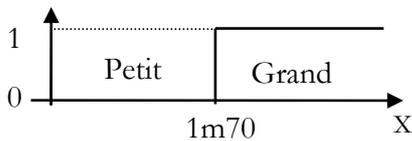


Figure III - 15 : fonction d'appartenance binaire

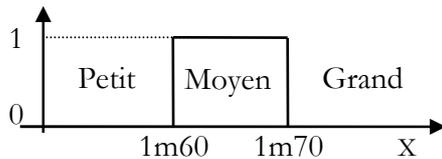


Figure III - 16 : ajout d'une fonction d'appartenance binaire « Moyen »

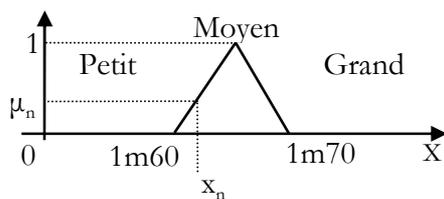


Figure III - 17 : introduction des degrés d'appartenance dans les ensembles flous

Dans le cas de la logique floue, une réponse est plus nuancée amenant une notion de plurivalence. Prenons un exemple, en logique binaire, en considérant une personne grande à partir de 1m70, il est possible de définir la fonction d'appartenance illustrée sur la Figure III - 15.

Dans cette logique un individu de 1m80 sera grand et un de 1m50 sera petit. Pour ce genre de cas, cette approche est adaptée. Cependant, un individu de 1m69 sera petit alors qu'un individu de 1m71 sera grand. Cet exemple montre bien le manque de souplesse de cette logique. Le premier pas vers une logique plus nuancée peut être réalisé en ajoutant des fonctions d'appartenances.

Sur la Figure III - 16, le raisonnement reste binaire, les réponses du système sont vraies

ou fausses mais, le fait d'ajouter plusieurs fonctions d'appartenance introduit bien la logique floue.

En logique floue le raisonnement est quasiment le même que dans l'exemple précédent. En effet, on va retrouver plusieurs fonctions d'appartenance pendant une notion de degrés

d'appartenance va être ajoutée. Si on remplace la fonction carrée par une fonction triangulaire, une appartenance relative est obtenue et traduite par des degrés. Dans ce cas, la valeur x_n de la variable X (Figure III - 17) appartient à la fonction « Moyen » avec un degré μ_n . Ainsi, la solution n'est plus catégorique mais composée de plusieurs réponses pondérées. Dans cette logique plusieurs fonctions floues sont créées, sur le domaine de définition d'une variable observée. Ainsi, à chaque valeur de X correspondent les degrés d'appartenance pour les fonctions concernées.

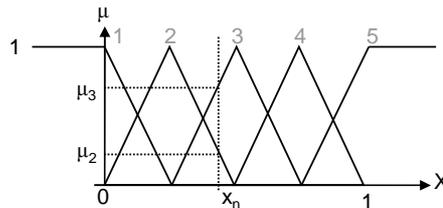


Figure III - 18 : degrés d'appartenance des ensembles flous pour une valeur x_n de X.

L'intérêt de la logique floue est donc dans la progressivité de la prise de décision, en prenant en compte un ou plusieurs paramètres d'entrée. Le cas d'exemple et celui développé pour le contrôle de tension utiliseront deux entrées.

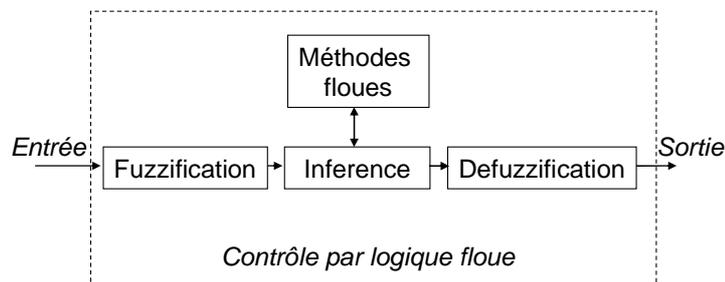


Figure III - 19 : Définition d'un superviseur flou

La mise en place d'un contrôle flou se réalise en trois étapes principales :

- La fuzzification
- L'inférence
- La défuzzification

III.1.b La fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire est nécessaire et consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées, celui-ci correspondra, en prenant un exemple concret pour notre problématique, à des limitations de production ou d'absorption de puissance réactive ou à des limites de tensions.

Grâce à cela, les entrées peuvent être exprimées en grandeur relative par rapport aux limites. Le domaine de variation initialement défini comme $[X_{\min}, X_{\max}]$ doit être ramené entre $[-1,1]$.

Ainsi, les entrées seront exprimées comme suit :

$$X_r = \left(\frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 2 \right) - 1 \quad \text{(III - 2)}$$

Avec X_r la variable d'entrée relative ramenée entre $[-1,1]$ et X_{\min} et X_{\max} définissant les borne de l'intervalle de variation maximum de l'entrée X . Les fonctions d'appartenance sont ensuite créées. En général, il s'agit de trapèzes ou de triangles, mais il peut s'agir aussi de fonction parabolique permettant une réponse plus linéaire. [PATE-2005]

Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables « linguistiques » ou variables floues. Ainsi, dans l'exemple suivant, celles-ci seront qualifiées de Petite (P), Moyenne (M) et Grande (G). Il va être possible, comme le montre la Figure III - 20, de trouver pour chaque valeur de X une définition floue, c'est à dire de savoir à quelle fonction la valeur numérique x_n appartient et avec quel degré.

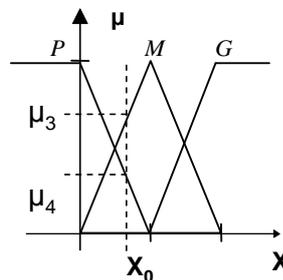


Figure III - 20 : Ensembles flous ou fonctions d'appartenances

La Figure III - 20 illustre une fuzzification réalisée à l'aide de 3 portes, dans notre application nous en utiliserons 7. Les degrés d'appartenance sont les sorties de cette l'étape.

III.1.c L'inférence

L'inférence est l'étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, c'est à l'utilisateur de définir les règles régissant le comportement du contrôle à développer. Par exemple, soit X et Y deux entrées et S la sortie de l'étape d'inférence. Ainsi, les règles de sortie précitées peuvent être dans un premier temps exprimée comme suit :

Si X est P ET Y est M ALORS S est SM

Comme pour les entrées, des lois d'appartenance vont être définies pour la sortie. Le nombre de portes de sortie peut être choisi par l'utilisateur. [ABDE-2001]

Grâce à ces définitions, il va être possible d'écrire une table d'inférence. C'est avec cette table que l'utilisateur va pouvoir définir les caractéristiques désirées du régulateur (Figure III - 21). Ainsi, il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel contrôle.

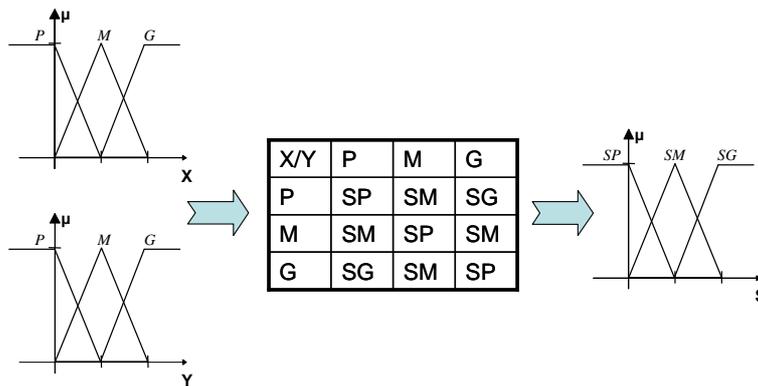


Figure III - 21 : Définition d'une table d'inférence

C'est ce tableau qui va calibrer la réaction du contrôle, cette table d'inférence est le noyau de la réflexion du superviseur flou. Celle-ci peut être vue comme une base de données définissant les valeurs de sortie en fonctions de valeurs d'entrée. Nous savons à présent que, pour chaque combinaison de valeurs d'entrée, il existe une valeur floue de sortie.

Cependant, il a été vu dans le paragraphe sur la fuzzification et plus particulièrement sur la Figure III - 20, qu'en règle générale une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues avec des degrés différents. Ainsi, d'après la Figure III - 21, la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir avec quels degrés d'appartenance.

Plusieurs méthodes existent pour répondre à cette question, la méthode d'inférence MAX-MIN, la méthode MAX-PROD et la méthode SOM-PROD [PATE.2005] (cf. annexe IV). Toutes ces méthodes fournissent des degrés d'appartenance pour les portes de sortie mobilisées à partir des degrés respectifs des entrées. Dans la conception de notre régulateur, la méthode d'inférence SOM-PROD a été utilisée, celle-ci permet une évolution de la réponse plus linéaire que les autres méthodes lors de variations des entrées, elle sera donc la seule à être développée dans ce chapitre.

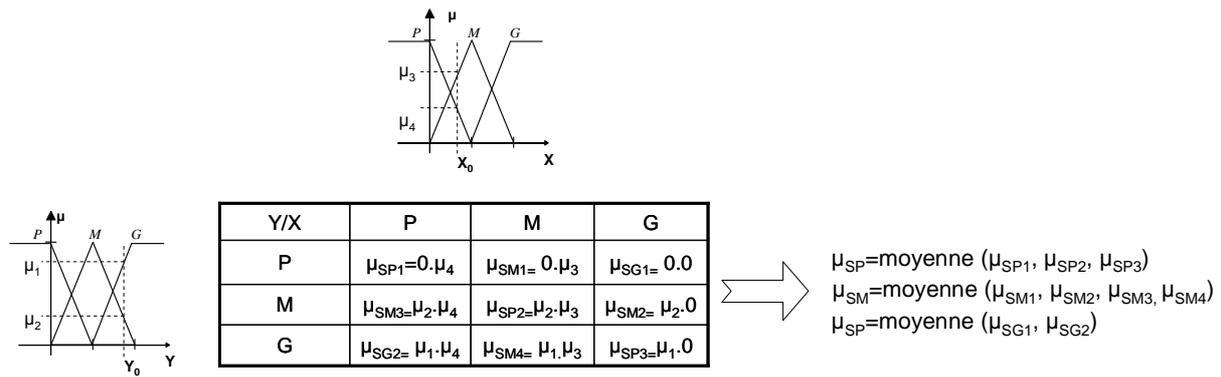
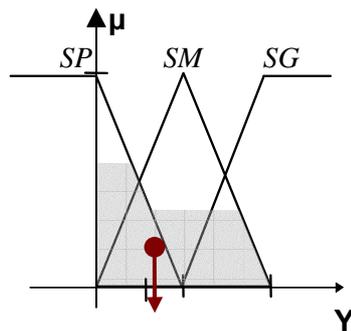


Figure III - 22 : Méthode d'inférence SOM-PROD

Le but est de trouver les degrés d'appartenance de chacune des lois floues de sorties. Le mécanisme de détermination de ces degrés est illustré Figure III - 22. On obtient donc la contribution de toutes les règles de sortie pour la décision finale. Il reste à calculer la valeur de sortie du superviseur.

III.1.d La défuzzification

La défuzzification est l'étape finale, comme son nom l'indique cette étape réalise l'opération inverse de la fuzzification. En effet, ici le but est de calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue. Comme précédemment plusieurs méthodes existent et permettent de trouver une valeur de sortie : la méthode du maximum, la méthode du barycentre des maxima et la méthode du centre de gravité. La méthode retenue est la méthode du centre de gravité ou « centroïde » (cf. annexe IV).



Le principe de cette méthode est très simple, la sortie du superviseur correspond à l'abscisse du centre de gravité de la participation de chaque ensemble flou de sortie, représentée en grisé sur la Figure III - 23

Figure III - 23 : Défuzzification, méthode du barycentre des maxima.

Ce type de logique va pouvoir être utilisé pour contrôler plusieurs paramètres du régulateur [KIM-1999]. Pendant la phase de développement cette logique nous a servi, par exemple, à la création d'un contrôleur flou déterminant la quantité de puissance réactive à injecter pour réguler la tension ou encore à la création d'un superviseur capable d'adapter les gains k_p et k_i de contrôleurs PI en fonction de l'état et de l'évolution des variables à corriger [RAMI-2-2005].

Toutes ces applications ne sont pas développées ici mais cela montre que la logique floue apporte des possibilités d'évolutivité et d'adaptabilité évidentes au régulateur que nous avons à développer.

Ainsi cette logique va être appliquée à la création d'un contrôleur capable de déterminer les consignes en tension les mieux appropriées pour une PDE en fonction de la tension et de la puissance réactive mesurées en son point de connexion.

III.2 Développement du régulateur à base de logique floue

Grâce à ce type de logique, il va être possible d'intégrer de « l'intelligence artificielle » dans le contrôle de chaque PDE. En effet, ce type de raisonnement convient ici parfaitement pour adapter à chaque niveau de tension et de puissance réactive mesuré, les consignes de tension désirée. Le régulateur est capable de changer ces valeurs de tension désirée, corrélativement au régime de fonctionnement, en respectant les limites en tension et de puissance réactive de chaque PDE. En effet, en fonction de l'état de la tension au nœud de connexion et de la quantité de puissance réactive produite ou absorbée, les consignes $V_{\min \text{ désirée}}$ et $V_{\max \text{ désirée}}$ vont évoluer. Le but de cette variation de limites désirées est de faire participer, sans communication, toutes les productions au maintien d'un plan de tension acceptable, y compris les PDE n'ayant pas de tension critique à leurs points de connexion. Plus la tension sera proche de 1 pu, plus la fenêtre de tension désirée sera étroite. Cette fenêtre évolue ensuite en fonction de la quantité de puissance réactive à injecter ou à absorber, par rapport aux limites propres de l'unité de production. Plus la quantité de puissance réactive injectée ou absorbée est importante, plus la fenêtre de tension va s'agrandir en respectant l'ordre des limites $V_{\min \text{ admissible}} \leq V_{\min \text{ désirée}} \leq V_{\max \text{ désirée}} \leq V_{\max \text{ admissible}}$.

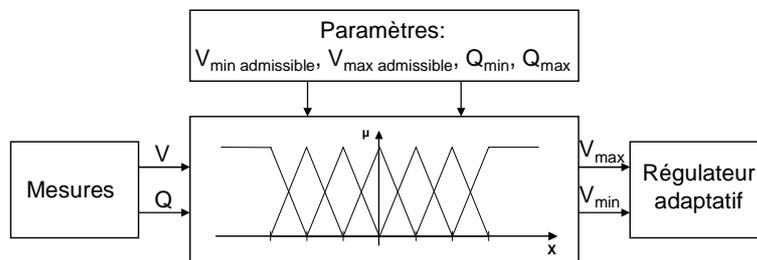


Figure III - 24 : vision « boîte noire » du superviseur flou

La Figure III - 24 illustre le principe de fonctionnement du superviseur flou, celui-ci intervient en amont du contrôle adaptatif précédemment illustré et doit, en fonction de mesures locales de tension et de puissance réactive, être capable de fournir des tensions de consignes de la manière la plus cohérente possible.

III.2.a L'algorithme du superviseur flou

III.2.a.1 Fuzzification des mesures de puissance réactive et de tension

Cette première étape nous permet d'exprimer les valeurs numériques des signaux d'entrées (V, Q) en valeurs floues, c'est-à-dire que ces paramètres ne seront plus définis numériquement mais « linguistiquement ». Pour ce faire, nous allons définir, pour chaque variable, sept fonctions d'appartenances triangulaires. Ces fonctions sont « négative grande » NG, « négative moyenne » NM, « négative petite » NP, « zéro » ZO, « positive petite » PP, « positive moyenne » PM, « positive grande » PG. Ainsi, pour une valeur numérique, il va être possible de définir quels sont les degrés d'appartenance des ensembles flous correspondants. La Figure III - 25 montre la définition floue de chaque variable.

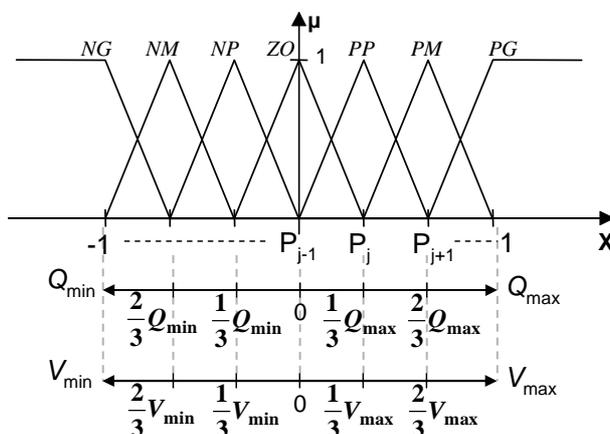


Figure III - 25 : Ensembles flous utilisés lors de l'étape de fuzzification

Toute variable doit être exprimée dans un intervalle de [-1,1]. Ainsi les mesures de tension et de puissance réactive seront exprimées par rapport à leurs maxima et minima. Celles-ci correspondent aux valeurs de tensions admissibles ainsi qu'aux limites de puissances réactives propres à la machine considérée.

$$\Delta V_{norm} = \max \left[\left(\frac{V - V_{obj}}{V_{max_admissible} - V_{obj}} \right); \left(\frac{V_{obj} - V}{V_{min_admissible} - V_{obj}} \right) \right] \quad (\text{III - 3})$$

$$Q_{norm} = \left(\frac{Q}{Q_{max}} \right) \quad (\text{III - 4})$$

Où ΔV_{norm} est l'écart relatif par rapport à une tension objective V_{obj} ,

Q_{norm} est la valeur relative de puissance réactive par rapport à la capacité de production maximale Q_{max} ,

V et Q sont les valeurs numériques des mesures effectuées,

V_{obj} est la valeur de tension autour de laquelle la tension est régulée. Lors de nos travaux nous avons fixé cette valeur à 1pu.

La formule (III - 3) sera utilisée pour calculer ΔV_{norm} plutôt que la formule (III - 2). En effet, celle-ci permet de transposer le contrôle en BT où la déviation maximum n'est pas symétrique par rapport 1pu avec un maximum de +6% et un minimum de -10%, en HTA cette déviation est symétrique et est de $\pm 5\%$.

Pour des fonctions triangulaires, représentées Figure III - 25, les degrés d'appartenance sont définis comme suit [ABDE-2001] :

$$\mu(X) = \frac{P_{j+1} - X}{P_{j+1} - P_j} \text{ pour } P_j < X < P_{j+1} \quad \text{(III - 5)}$$

$$\mu(X) = \frac{X - P_{j-1}}{P_j - P_{j-1}} \text{ pour } P_{j-1} < X < P_j \quad \text{(III - 6)}$$

$$\mu(X) = 1 \text{ pour } X > 1 \ \& \ X < -1 \quad \text{(III - 7)}$$

Avec X la valeur numérique de la variable mesurée,

P_j la valeur de l'abscisse pour laquelle l'ensemble flou considéré a un degrés d'appartenance (μ) de 1 (Figure III - 25).

P_{j-1} , et P_{j+1} les valeurs de X bornant le domaine de définition de l'ensemble flou considéré.

Après cette étape de fuzzification, les tensions et les puissances réactives sont exprimées par des degrés d'appartenance de fonctions floues. Autrement dit, elles peuvent être définies comme plus ou moins « négative petite » et/ou plus ou moins « négative moyenne ». L'étape d'inférence va permettre de fournir les consignes de tension désirée à partir de ces expressions.

III.2.a.2 Etape d'inférence ou élaboration du noyau de réflexion flou

Comme il a été explicité précédemment dans l'introduction à la logique floue, c'est dans cette étape qu'est déterminée la réaction du superviseur en fonction des données d'entrée. Ainsi il va être décidé, au « cas par cas », comment doit évoluer la fenêtre de tension désirée en fonction de l'état des entrées. Ainsi, la logique floue facilite cette réflexion, puisque les entrées sont qualifiées par des termes quantitatifs.

Le Tableau III - 1 illustre le résultat de la réflexion sur le comportement global, que doit adopter le superviseur, en fonction des contraintes définies. Ainsi, pour un ΔV et une puissance réactive nuls ou très petits (fonction d'appartenance « ZO » ou « PP »), comme cela peut être le cas pour des PDE proche du poste de transformation, la fenêtre de consignes de tensions doit être étroite pour permettre une participation au réglage de l'unité de production.

Si ΔV est ZO ET Q est ZO ALORS S est P

Au contraire, si l'écart en tension est défini comme « positif grand » et la puissance réactive produite comme « négative petite » cela veut dire que le système arrive en limitation, la fenêtre de tension désirée doit donc être ouverte au maximum pour soulager le plus possible la PDE.

Si ΔV est PG ET Q est NG ALORS S est G

En prenant comme base ces deux cas extrêmes, il va être possible de définir le comportement du superviseur entre ces configurations en considérant quatre tailles possibles pour la fenêtre en tension désirée.

$\Delta V \backslash Q$	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	P	P	P	M	M	MG	G
NM	P	P	P	M	M	M	MG
NP	P	P	P	P	P	M	M
ZO	M	M	P	P	P	M	M
PP	M	M	P	P	P	P	P
PM	MG	M	M	M	P	P	P
PG	G	MG	M	M	P	P	P

Tableau III - 1 : Table d'inférence du superviseur flou

Deux zones sont interdites dans ce tableau, celles-ci sont hachurées dans le Tableau III - 1. En effet, lorsque la tension est basse il ne faut pas absorber de puissance réactive et inversement. Les saturations dans les boucles de régulation du contrôle adaptatif, présentées Figure III - 4 et Figure III - 5, interdisent ces configurations. Par défaut, la fenêtre en tension sera définie comme petite dans ces zones.

L'étape d'inférence va permettre la définition d'un coefficient de supervision $C_{\text{superviseur}}$, image directe de la taille de la fenêtre de tension désirée. Ce coefficient va être défini par quatre fonctions d'appartenance. Ainsi, celui-ci pourra être « Petit » (P), « Moyen » (M), « Moyen Grand » (MG), « Grand » (G). Ces fonctions apparaissent dans le tableau précédent.

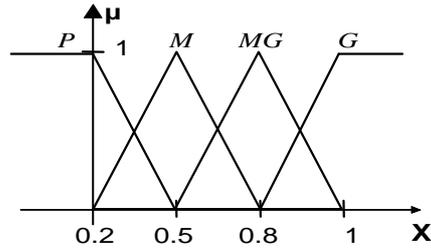


Figure III - 26 : Ensembles flous définissant la sortie du superviseur

Lors de l'étape de fuzzification, des variables d'entrée sont définies, le plus souvent par deux fonctions d'appartenance avec leurs degrés respectifs. Ainsi le coefficient de supervision n'est pas défini dans le Tableau III - 1 uniquement par un seul état, mais le plus souvent par quatre. Pour déterminer l'appartenance de chaque fonction floue concernée la méthode SOM-PROD est utilisée. [ABDE-2001]

Le fait de définir la valeur de sortie par plusieurs ensembles flous, avec des degrés différents, permet un changement d'état de $C_{\text{superviseur}}$ linéaire entre les états définis dans le Tableau III - 1 et non de manière discrète comme le permettrait une logique binaire.

Grâce à cette étape d'inférence, une définition « floue » de $C_{\text{superviseur}}$ est disponible, cette valeur doit à présent être traduite en valeur numérique, pour être compréhensible par le système de régulation en aval.

III.2.a.3 Etape de défuzzification

Dans le but de calculer la taille de la fenêtre de tension désirée, la valeur floue de $C_{\text{superviseur}}$ doit être traduite en valeur numérique. Comme il a été précisé dans l'introduction à la logique floue, la méthode du centre de gravité est celle utilisée (cf. annexe IV). La Figure III - 27 montre donc l'évolution tridimensionnelle de la valeur de ce coefficient en fonction des variations des mesures d'entrée.

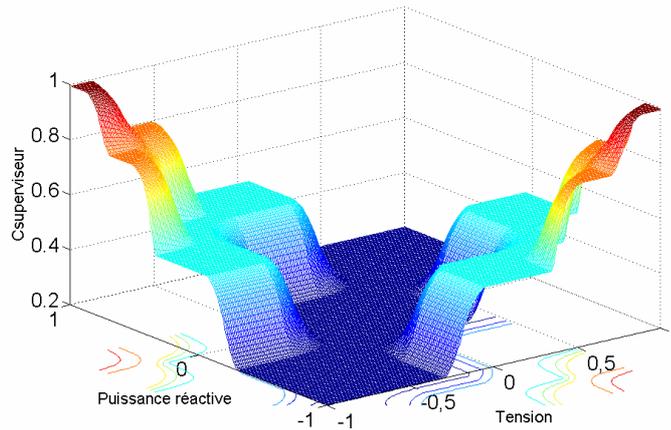


Figure III - 27 : Représentation tridimensionnelle de l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction des entrées du superviseur

Les valeurs des tensions $V_{désirées}$ sont définies grâce à ce coefficient ainsi qu'aux tensions $V_{admissibles}$.

$$\begin{cases} V_{max_désirée} = [(V_{max_admissible} - 1) \times C_{superviseur_flou}] + 1 \\ V_{min_désirée} = [(V_{min_admissible} - 1) \times C_{superviseur_flou}] + 1 \end{cases} \quad (III - 8)$$

La fenêtre de tension désirée est donc une image du coefficient $C_{superviseur}$ fourni. Cette fenêtre de tension est bien fonction des mesures effectuées, donc des contraintes en tension et en puissance réactive. Le noyau du superviseur est transposable sur des machines de tailles différentes ainsi que sur des réseau BT ou HTA.

	Tensions admissibles	Tensions calculées (désirées)
HTA	$V_{max_admissible} = 1.05 \text{ pu}$ $V_{min_admissible} = 0.95 \text{ pu}$	$1.01 \text{ pu} < V_{max_désirée} < 1.05 \text{ pu}$ $0.95 \text{ pu} < V_{min_désirée} < 0.99 \text{ pu}$
BT	$V_{max_admissible} = 1.06 \text{ pu}$ $V_{min_admissible} = 0.9 \text{ pu}$	$1.012 \text{ pu} < V_{max_désirée} < 1.06 \text{ pu}$ $0.9 \text{ pu} < V_{min_désirée} < 0.98 \text{ pu}$

Tableau III - 2 : Evolution possible des tensions désirées en sortie du régulateur auto adaptatif en fonction des niveaux de tension

Une nouvelle version du contrôle adaptatif intégrant cette fonctionnalité peut à présent être testée. Les consignes de tensions désirées sont fonction des contraintes mesurées au nœud de connexion. Le contrôle reste local mais le fait d'adapter les consignes devrait faire participer toutes les PDE au contrôle, et ce quelle que soit la configuration du réseau. Le logigramme Figure III - 28 résume les différentes étapes réalisées pour appliquer un tel contrôle.

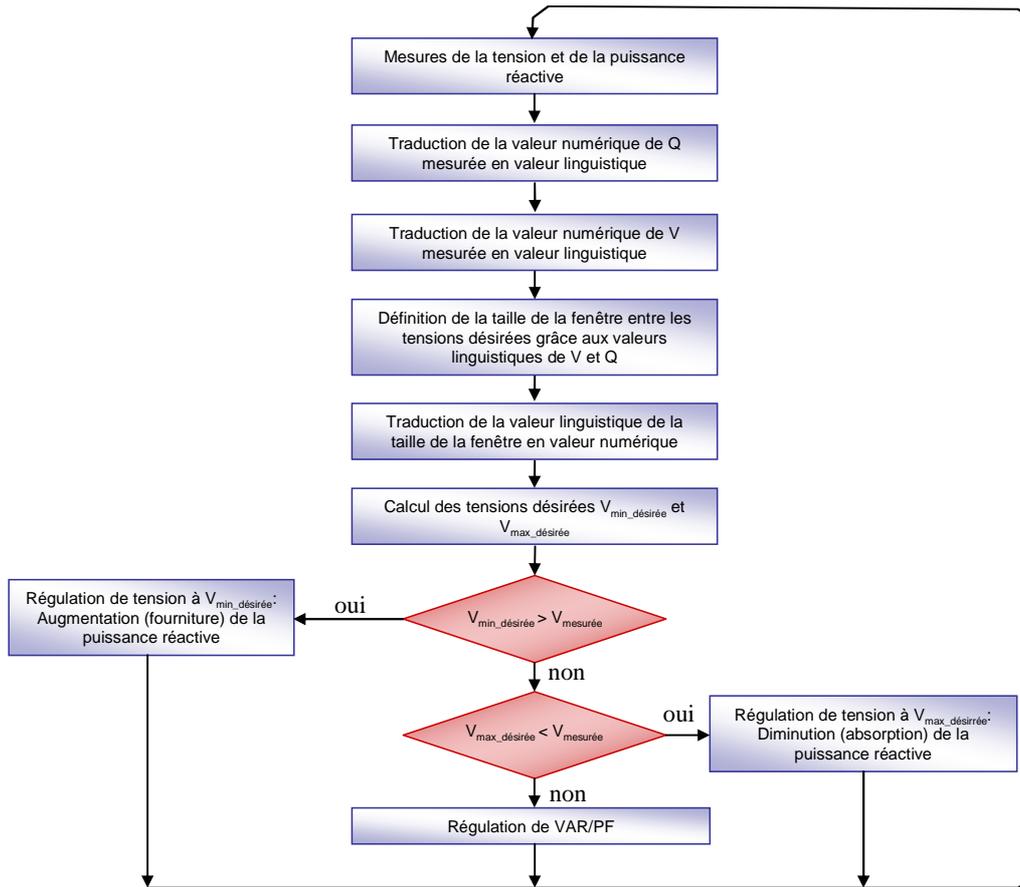


Figure III - 28 : Résumé du contrôle auto adaptatif étape par étape

III.2.b Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur auto adaptatif

Le contrôle auto adaptatif va à présent être comparé aux contrôles déjà testés au début de ce chapitre, à savoir, le contrôle P/Q et le contrôle adaptatif. Pour ce faire, nous allons utiliser le même scénario et le réseau illustré Figure III - 6, en remplaçant le contrôle adaptatif par le contrôle auto adaptatif. Celui-ci intègre la fonction de sélection de consignes de tensions désirées, en fonction de mesures faites au point de connexion. Les résultats ci-dessous ont été obtenus grâce à l'utilisation du mode « Batch » disponible dans le logiciel Eurostag. En effet, les logiciels Arene et Eurostag ne permettant pas l'importation de bloc de contrôle dans leur bibliothèque, il a été nécessaire d'utiliser conjointement les logiciels Matlab et Eurostag. Ainsi le réseau est simulé sous Eurostag et le contrôle auto adaptatif sous Matlab (cf. annexe I).

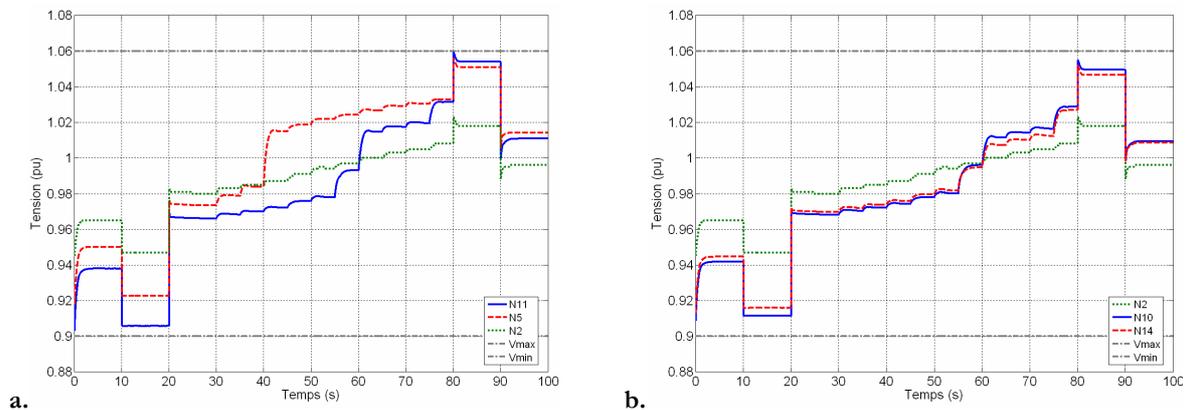


Figure III - 29.a : Evolution de la tension des PDE N11 et N5, 29.b : Evolution de la tension des PDE N10 et N14

Les résultats présentés Figure III - 29 montrent que grâce à ce type de contrôle, les tensions des groupes de productions identifiées comme critiques lors des simulations précédentes, sont bien maintenues dans la fenêtre d'admissibilité.

Ceci était déjà le cas pour un contrôle adaptatif avec les consignes fixées à $V_{\max \text{ désirée}} = 1,03 \text{ pu}$ et $V_{\min \text{ désirée}} = 0,95 \text{ pu}$. Les performances du contrôle auto adaptatif se voient grâce aux évolutions de puissance réactive fournie ou absorbée par les PDE sur la Figure III - 30. Le fait d'adapter les consignes intelligemment force toutes les productions à participer au contrôle. Ainsi les contraintes sont mieux réparties sur les PDE. En effet, à présent le plan de tension est toujours compris entre 1.06 et 0.9 pu. Le lecteur pourra trouver le détail des réactions en tension et puissance réactive, ainsi que des consignes, de chaque PDE dans l'annexe II.

La supervision de consignes est réalisée dynamiquement, elle est fonction de la tension et de la puissance réactive mesurées localement. Ainsi, ces consignes sont recalculées et adaptées intelligemment pour chaque variation du scénario.

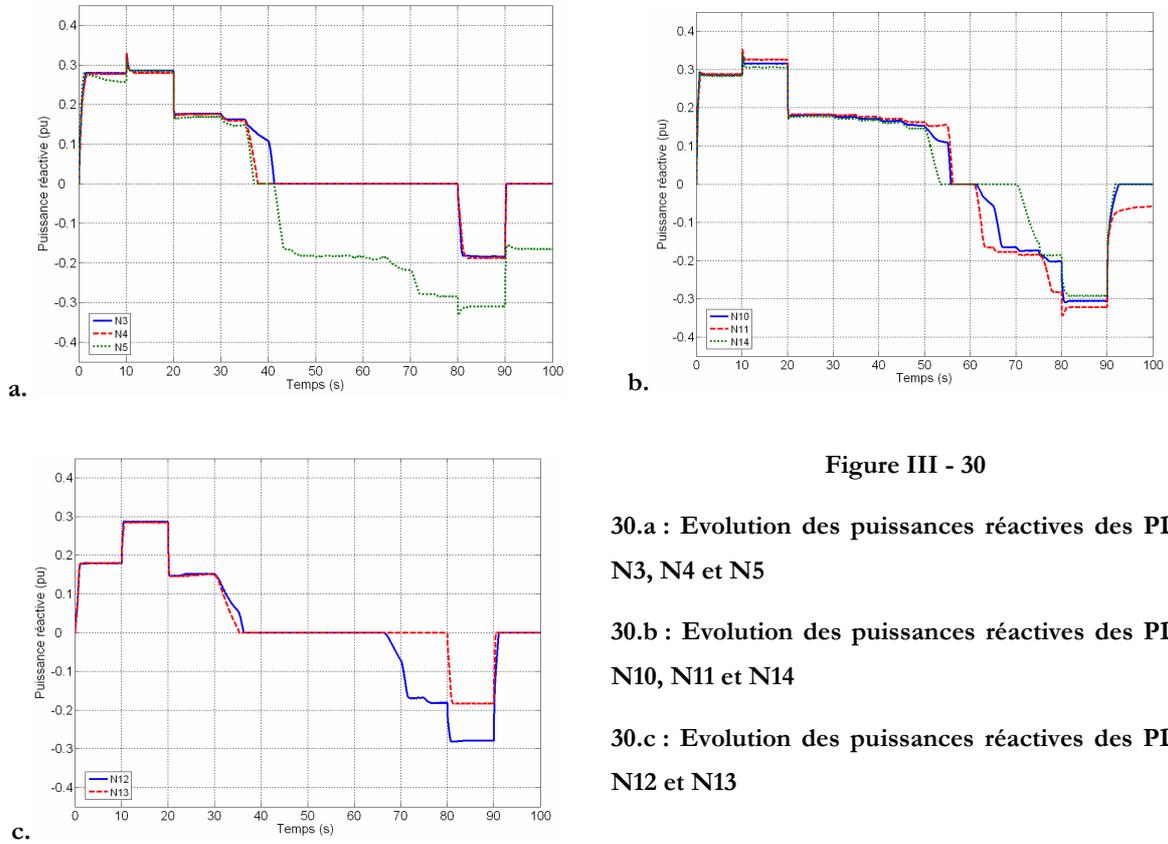


Figure III - 30

30.a : Evolution des puissances réactives des PDE N3, N4 et N5

30.b : Evolution des puissances réactives des PDE N10, N11 et N14

30.c : Evolution des puissances réactives des PDE N12 et N13

Les évolutions de puissances réactives des PDE illustrées sur la Figure III - 30 montrent que sur ce scénario le contrôle auto adaptatif permet une meilleure utilisation de la puissance réactive de chaque unité de production que ce que permet le contrôle adaptatif. En effet, aucune PDE n'est en limitation de production ou d'absorption de puissance réactive. Cette solution engendre un transit moins important de puissance réactive sur le réseau que la solution du contrôle adaptatif à consigne fixe de 1,03pu et 0,95pu (Figure III - 12) tout en conservant un contrôle du niveau de tension dans la plage autorisée.

Cette couche supplémentaire de supervision apporte donc une solution aux limitations du régulateur adaptatif. De plus, chaque PDE est autonome et ne nécessite aucune communication avec un dispatching local.

IV Conclusions

La comparaison successive de tous ces modèles de contrôles de tension de PDE montre bien les performances du régulateur auto adaptatif de tension et l'intérêt de son utilisation dans le cas de fort taux de pénétration. Sur ce scénario, les contraintes de surtension sont effacées et le régulateur force la participation de toutes les PDE de manière intelligente.

Le fait d'intégrer de l'intelligence dans le contrôle à l'aide de la logique floue permet d'atteindre les objectifs de conservation des niveaux de l'onde en tension sans disposer de système de transmission ainsi que de calcul de consignes indépendant. Les tensions désirées fournies par la supervision floue sont fonction de l'état électrique mesuré au point de connexion. Leurs évolutions dépendent de l'impact d'une production de puissance réactive sur la tension, ainsi que des conditions d'exploitations du réseau (état de charge, reconfiguration, etc.). Fonction de tous ces paramètres, les consignes de tension désirées dépendent donc de la position de la PDE sur réseau.

Cette solution permet à chaque production d'être indépendante, et de ne pas dépendre d'une entité définissant les consignes en tangente phi à appliquer à la production. De plus, le service de contrôle de tension réalisé par un producteur équipé d'un tel contrôle, pourrait être rémunéré par le gestionnaire de réseau de distribution, en charge du contrôle de l'onde en tension. La pertinence des résultats obtenus ainsi que l'originalité du contrôle ont permis le dépôt d'un brevet par le GIE IDEA au nom de Schneider Electric. [Brevet-2006]

Il a été montré l'efficacité d'un tel contrôle pour la BT, cependant ces résultats doivent être complétés par une étude sur un réseau HTA, en présence d'autres organes de réglage de tension ou encore de productions intermittentes. Le prochain chapitre expose le fonctionnement du régulateur auto adaptatif dans de telles conditions. De plus, l'intégration de ce contrôle sur un système de production réel sera étudiée.

Chapitre IV : Validation par simulation et sur un cas pratique
du régulateur auto adaptatif

I Introduction

Pour le problème de tension induit par la connexion de production d'énergie sur le réseau de distribution, nous avons imaginé puis développé un régulateur « intelligent » dit auto adaptatif. Le principe ainsi que la pertinence de celui-ci ont été développés dans le chapitre précédent. Cependant, les impacts de l'utilisation d'un tel contrôle, sur le fonctionnement du réseau de distribution en présence d'autres automates de réglages, doivent être étudiés. La majorité des demandes d'études de raccordement, pour des unités de productions, se font pour accéder aux réseaux HTA. De plus, il a été vu dans le premier chapitre que quasiment les trois quarts de ces demandes concernent la production par énergie éolienne.

La réalisation de test sur un cas réel de production contrôlé par le régulateur auto adaptatif permettrait de rendre plus concrète l'étude de celui-ci et de conclure quant à son applicabilité sur une PDE. Cependant la concrétisation de ce type de test est assez difficile à réaliser dans cette thématique. En effet, il est rare d'avoir un système de production réel ainsi qu'un réseau disponible pour la réalisation de tests. Ainsi, cette approche sera faite par le biais d'un simulateur temps réel ou encore d'un onduleur de tension.

Ce chapitre expose donc l'application de ce régulateur dans ces situations. Ainsi sa première partie expose les simulations réalisées sur réseau HTA en présence d'autres organes de réglages, la deuxième partie expose les travaux d'expérimentation.

II Performances du régulateur auto adaptatif de tension sur un réseau HTA

Nous commencerons ce chapitre par la mise en avant du fonctionnement du régulateur sur un réseau HTA, ainsi que son interaction avec d'autres organes de réglages. Ainsi, deux scénarii vont être illustrés.

Le but du premier est de voir si l'effacement des problèmes de tension grâce à ce régulateur est aussi efficace que sur un réseau BT. Un transformateur avec prises réglables en charge et une batterie de condensateurs seront présents sur le réseau HTA étudié. Il est donc important d'évaluer quelles peuvent être les influences de productions contrôlées grâce au régulateur auto adaptatif avec ces types d'automates.

Le deuxième scénario présente le raccordement d'une production de type éolienne ainsi que d'une production de type machine synchrone avec une consigne de puissance active constante. Le but est de visualiser si le régulateur est capable de gérer les productions intermittentes et quels sont les répercussions sur les autres productions.

II.1 Simulation sur un réseau HTA alimenté via un transformateur avec prises réglables en charge

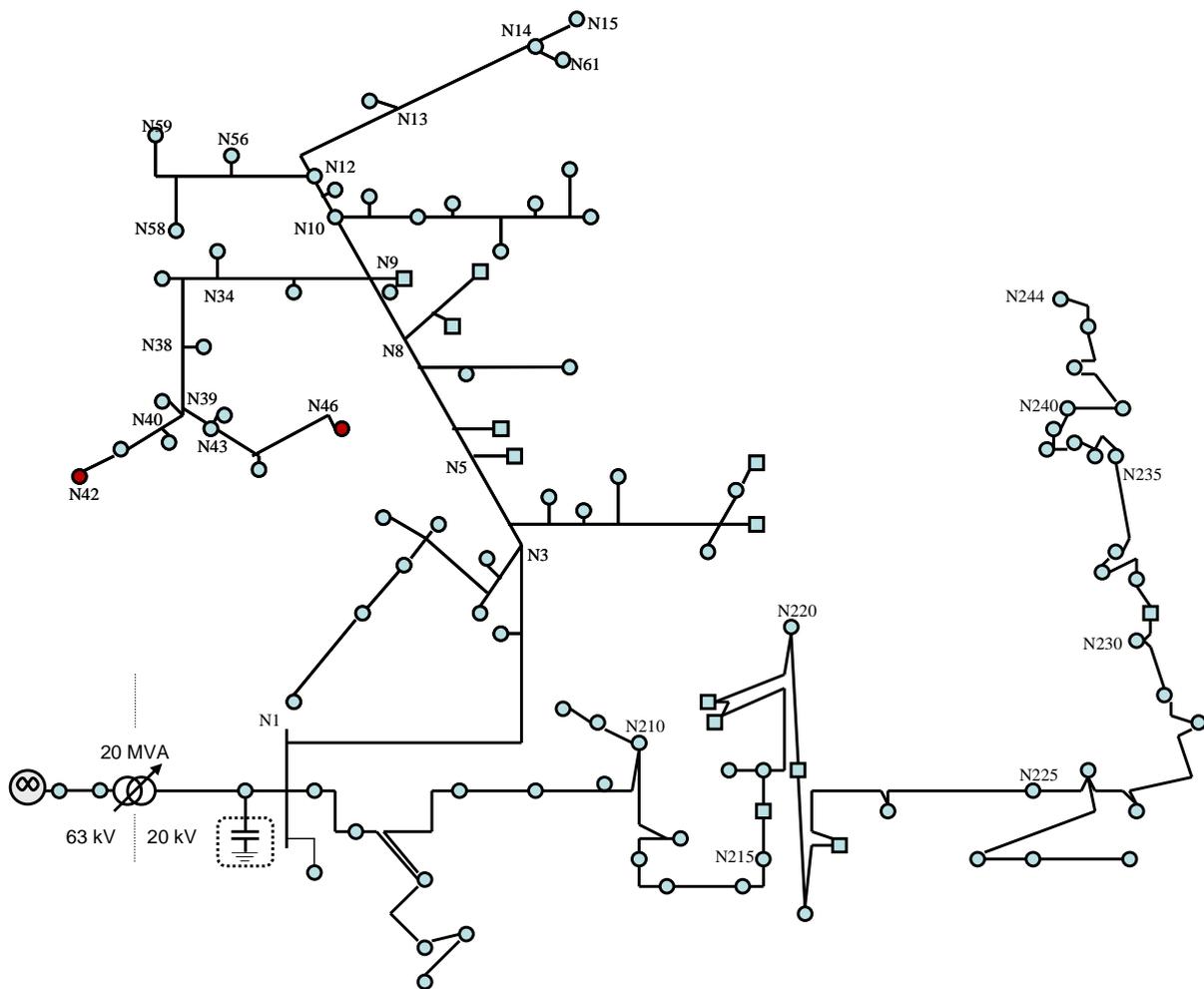


Figure IV - 1 :Réseau d'étude avec deux départs HTA

La Figure IV - 1 donne une représentation du réseau utilisé, ce réseau est alimenté par un transformateur réglable en charge de 20MVA, deux départs sont situés en aval de celui-ci. Un premier départ arborescent de type rural et un autre de type urbain avec une grande artère principale. Plus d'informations sur ces réseaux sont accessibles en annexe III.

Il a été illustré dans le premier chapitre que la mise en place de production d'énergie en aval d'un régulateur en charge peut s'avérer problématique. En effet, la production modifiée d'une

part le transit de puissances via le transformateur, et d'autre part si la production est mal répartie entre les départs, des problèmes de surtensions difficilement détectables par le régulateur peuvent apparaître. Ce déséquilibre de répartition de production entre départs va être illustré dans nos simulations. Le transformateur avec prises réglables en charge utilisé a 17 prises avec une capacité réglante de 1,5% par prise. Ses consignes de tensions sont de $\pm 1\%$ autour de 1pu, la première prise est changée au bout d'un temps $T_{\min}=60s$ et les changements de prises consécutifs sont fait après un temps $T_{p\min}=10s$.

De par le contrôle développé, les productions agissent sur la puissance réactive dans le but de contrôler la tension. Pour éviter des transits trop importants de puissance réactive via le poste source, un banc de condensateurs d'une puissance maximale de 5,76MVAR (3 gradins de 1,92MVAR) est connecté au secondaire du transformateur. Le lecteur pourra trouver la logique de commande d'un tel automate dans le paragraphe II.2.d du chapitre I.

De plus, deux productions de type machine synchrone de 5MVA sont placées aux nœuds N46 et N42.

II.1.a Contrôle en tangente phi des productions

Deux régulations sont comparées avec le même scénario. En effet, de la même façon que dans le chapitre III, nous illustrerons dans un premier temps le scénario avec des productions contrôlées en P/Q. Ce contrôle fournit une puissance réactive nulle, ce qui permet de voir fluctuer la tension librement en fonction des événements du scénario. Le second contrôle comparé sera le contrôle auto adaptatif.

Ainsi le scénario envisagé est le suivant :

- Démarrage des productions : $t=120s$ N42 ; $t=240s$ N46 ;
- Changement de charge : $t=360s$: $\Delta S_{\text{charge}}=-50\%$; $t=480s$: $\Delta S_{\text{charge}}=-20\%$;

Les changements de charge s'effectuent de manière uniforme sur tout le réseau. Ce scénario passe donc d'une configuration d'un fonctionnement avec une charge nominale et sans production, à une situation faiblement chargée et une production nominale des PDE.

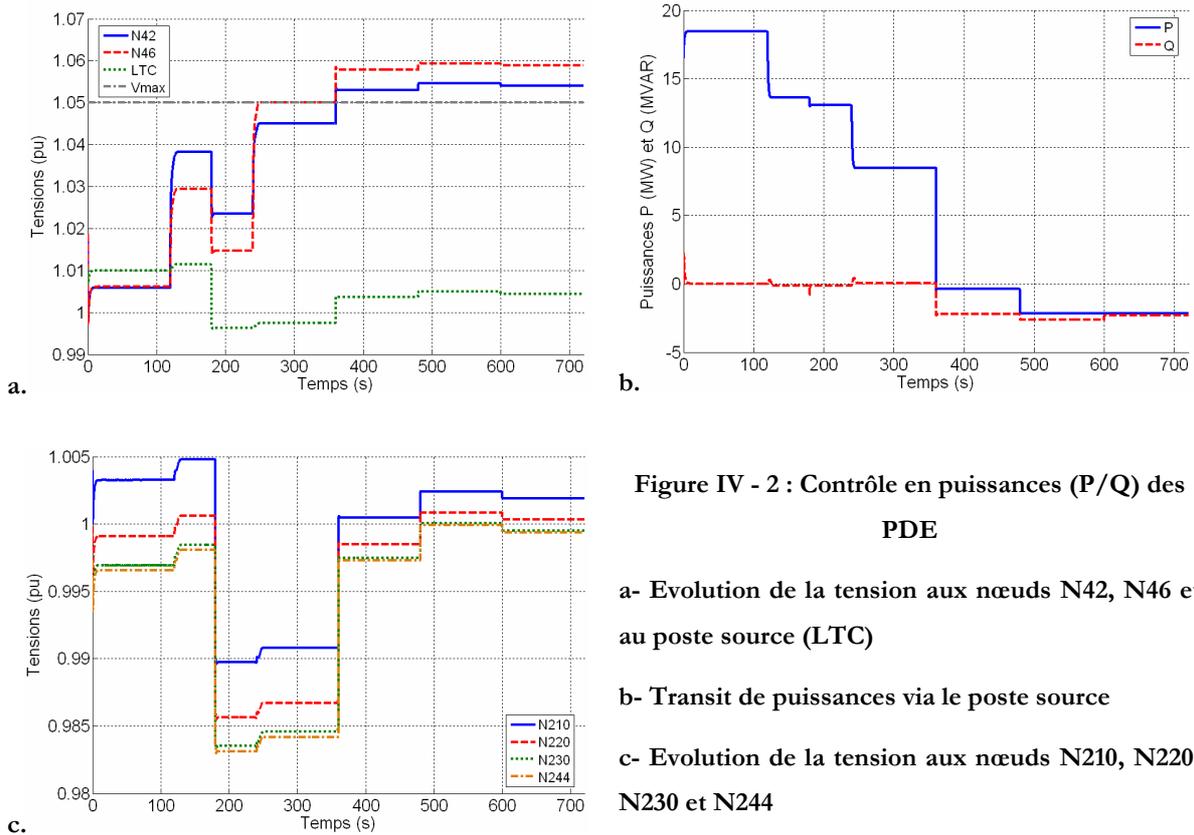


Figure IV - 2 : Contrôle en puissances (P/Q) des PDE

- a- Evolution de la tension aux nœuds N42, N46 et au poste source (LTC)
- b- Transit de puissances via le poste source
- c- Evolution de la tension aux nœuds N210, N220, N230 et N244

Il est notable sur la Figure IV - 2.a que le démarrage de la première PDE entraîne la tension, au secondaire du transformateur (courbe LTC), au-delà de sa consigne supérieure de 1.01pu. Ainsi, à $t=180s$ celui-ci baisse d'une prise. Ceci a pour effet de baisser la tension sur tout le réseau. Une seule prise est nécessaire pour conserver la tension dans la fenêtre de fonctionnement du transformateur.

Cependant, les démarrages successifs des productions contrôlées en P/Q et les diminutions de la charge entraînent les tensions des nœuds N42 et N46 hors des limites admissibles. Ces dépassements de limite ne sont pas pris en charge par le régulateur en charge puisque la tension au secondaire de celui-ci reste inférieure à 1,01pu.

La Figure IV - 2.b illustre les transits de puissances via le poste source. Avant le démarrage des unités de production, c'est-à-dire jusqu'à ce que t soit égale à 120s, le transit de puissance réactive est quasiment nul puisque cette puissance est fournie par le banc de condensateurs. Cependant, lors des diminutions de la charge, les besoins en puissance réactive sont moins conséquents, ainsi le banc de condensateurs produit un excédent de puissance réactive qui remonte vers le réseau HTB. Le changement de gradin de ces condensateurs s'effectue toute les 10 minutes, ainsi à $t=600s$ le transit de puissance réactive diminue cependant

celui-ci n'est pas annulé. La batterie de condensateurs devra changer son état de fonctionnement 8 fois pour annuler le transit.

Une action sur la puissance réactive est donc nécessaire pour conserver la tension dans les limites admissibles en tout nœud du départ de type rural.

II.1.b Productions contrôlées avec le régulateur auto adaptatif

Le même scénario que celui illustré précédemment est utilisé, cependant le contrôle des PDE change et est remplacé par le contrôle auto adaptatif de tension.

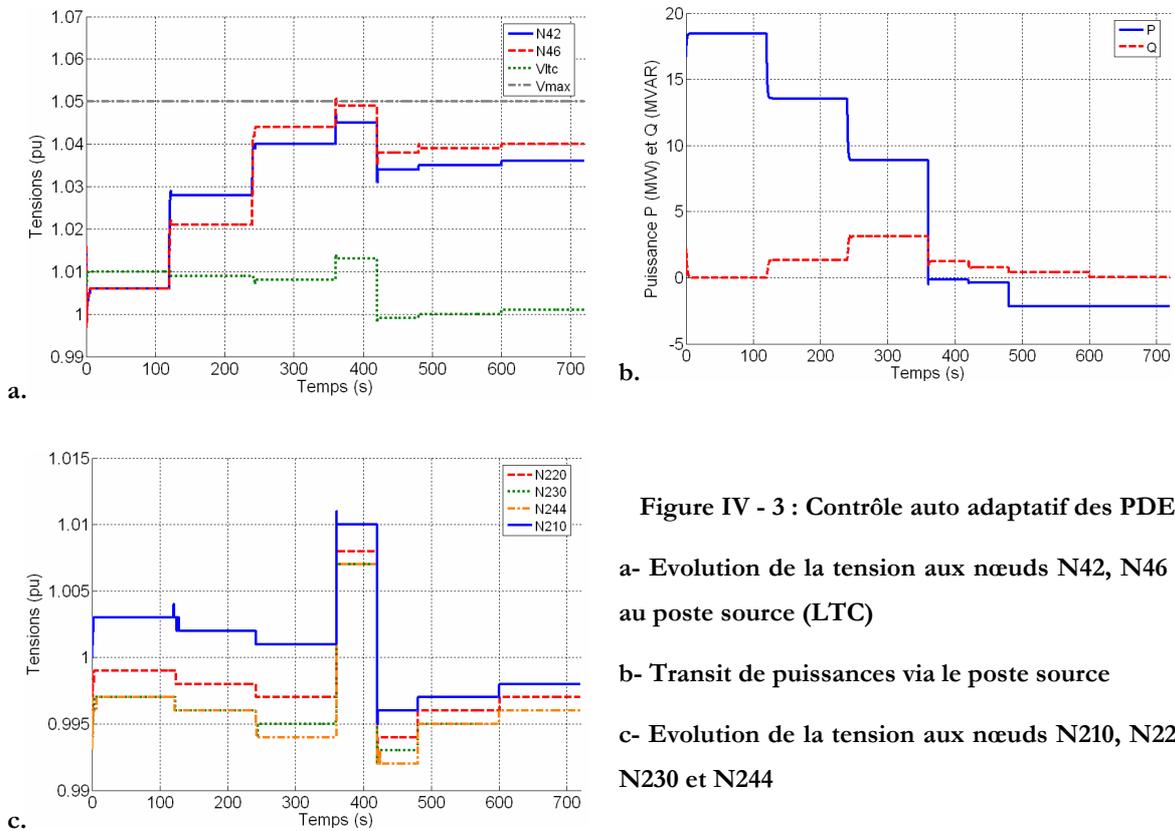


Figure IV - 3 : Contrôle auto adaptatif des PDE

a- Evolution de la tension aux nœuds N42, N46 et au poste source (LTC)

b- Transit de puissances via le poste source

c- Evolution de la tension aux nœuds N210, N220, N230 et N244

L'état initial des deux simulations réalisées avec ce scénario est le même. La fourniture de puissance réactive est assurée en majorité par le banc de condensateurs. Contrairement au contrôle précédent, la tension observée au secondaire du transformateur diminue à chaque démarrage de PDE. En effet, la production de chaque unité entraîne une hausse de la tension aux points de raccordement et donc une action sur la puissance réactive pour la limiter. Cette absorption de puissance réactive par les PDE, visible sur la Figure IV - 4.c, induit un transit de puissance dans le poste source et donc une chute de tension mesurée au secondaire de celui-ci.

Ainsi, le contrôle de tension par régulateur auto adaptatif prend le pas sur le transformateur réglable en charge qui ne change pas de prise après le démarrage de PDE.

Cependant, malgré le fonctionnement à prise fixe ($t < 420s$), les tensions aux nœuds de connexion des PDE sont conservées dans les limites admissibles, et ce également à la suite de la première diminution de la charge. Ce changement d'état de charge a pour conséquence une augmentation générale de la tension sur le réseau. La tension au secondaire du transformateur dépasse les consignes qui lui sont fixées et, au bout de 60s le changement de prise s'opère.

Suite à cet évènement intervenant à $t = 420s$, les automates présents sur le réseau se retrouvent dans le même état qu'à la fin de la simulation précédente où les PDE étaient contrôlées en tangente phi. Encore une fois, les tensions sont conservées dans la fenêtre d'admissibilité, ce qui n'était précédemment pas le cas.

Le contrôle auto adaptatif induit un transit de puissance via le poste source, ce transit est diminué suite au changement de charge. Ainsi, à $t = 600s$ le banc de condensateurs change un élément de la batterie, ce qui annule quasiment l'appel de puissances réactives en provenance du réseau HTB (Figure IV - 3.c).

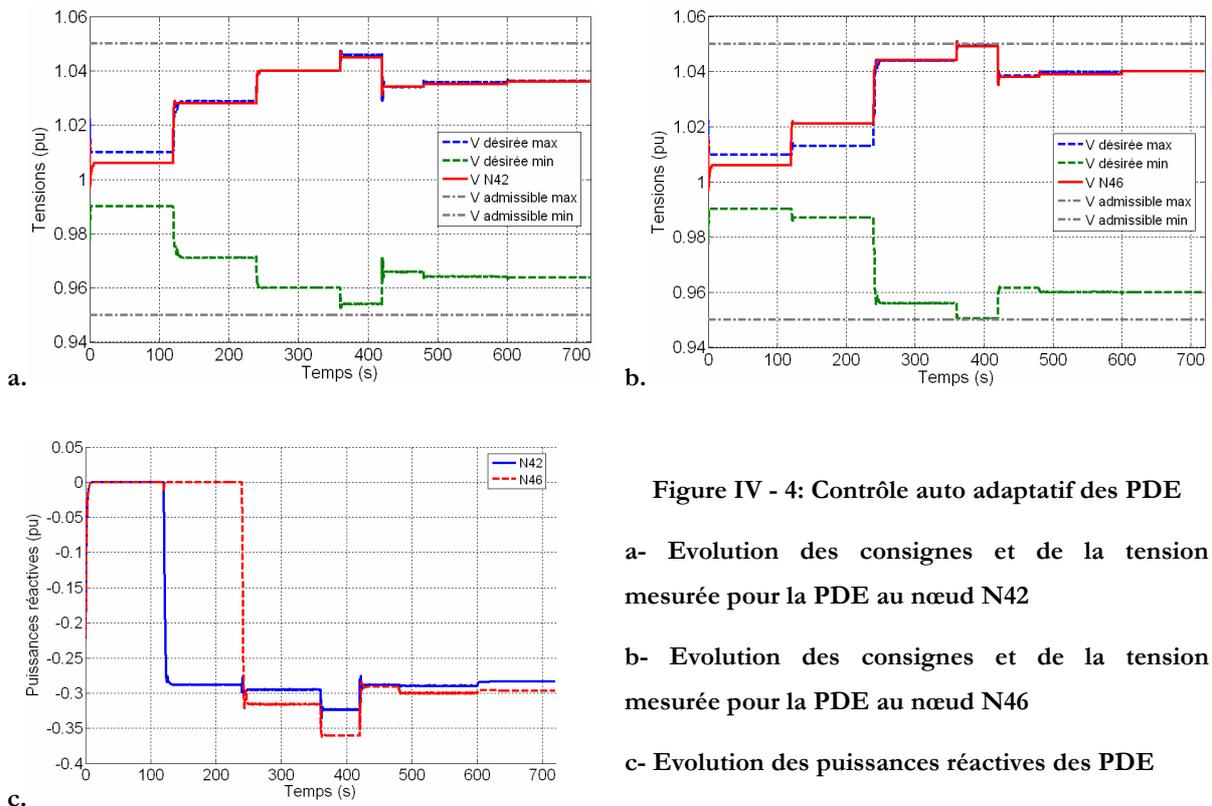


Figure IV - 4: Contrôle auto adaptatif des PDE

a- Evolution des consignes et de la tension mesurée pour la PDE au nœud N42

b- Evolution des consignes et de la tension mesurée pour la PDE au nœud N46

c- Evolution des puissances réactives des PDE

Les Figure IV - 4 illustrent les réactions de chaque production soumise aux évolutions du scénario. Il est notable Figure IV - 4.a et Figure IV - 4.b que le calcul des consignes de tensions évolue en fonction de l'état des tensions et de la puissance réactive directement absorbée par les

PDE. Ainsi, la production de puissance réactive s'adapte à chaque événement, et permet le maintien de la tension dans les limites admissibles.

Pour conclure sur ces simulations, il est visible que l'adaptation de consigne de tension est dynamique et efficace pour ce scénario.

De plus, il a été illustré que l'utilisation du contrôle auto adaptatif peut entraîner un transit de puissance réactive sur le réseau de distribution. Il est donc intéressant d'utiliser des bancs de condensateurs connectés en tête de départ permettant de corriger ces transits pouvant amener des pertes supplémentaires.

Enfin, le contrôle de tension par les PDE a une action plus rapide que celle du transformateur avec prises réglables en charge. Il est assez difficile de conclure sur l'intérêt de l'utilisation d'un régleur en charge conjointe avec celle du contrôle auto adaptatif. En effet, celui-ci dépend de paramètres comme le taux de pénétration, l'état de charge, la configuration du réseau ou encore l'emplacement des PDE. Cependant, deux cas de figure se dégagent. Le premier avec une insertion de PDE importante et réparti uniformément sur la zone de réseau considérée. Dans ce cas, l'utilisation d'un régleur peut s'avérer moins utile puisque les PDE, plus rapides, prendront en charge le réglage de la tension. Le deuxième cas, comme celui qui vient d'être illustré, est un cas où les puissances des PDE ne sont pas uniformément réparties sur le réseau. Le contrôle réalisant un réglage local ne pourra pas prendre en charge une hausse ou une diminution globale de la tension sur le réseau. Dans ce cas de figure, l'utilisation d'un régleur en charge peut devenir nécessaire.

II.2 Simulation d'une production de type intermittente contrôlée avec le régulateur auto adaptatif

Le contrôle intelligent créé a été défini comme dynamique et adaptatif. Le but de la simulation suivante est d'éprouver cette propriété en simulant une production éolienne intermittente, contrôlée grâce au régulateur et soumise à une évolution de charge journalière.

Ainsi, la production éolienne a une puissance nominale de 4,5MVA, celle-ci est interfacée avec le réseau via de l'électronique de puissance au nœud N46. Une deuxième production plus classique, réalisée avec un alternateur synchrone d'une puissance de 5MVA, est connectée au nœud N39. Le réseau utilisé est le départ rural précédemment illustré (cf. annexe III) alimenté par un transformateur avec prises réglables en charge de 20MVA.

Le fonctionnement d'une telle configuration est simulé pendant 24h, les Figure IV - 6.a et b illustrent le scénario de production et de charge. Toutes les charges présentes sur le réseau varient selon cette courbe. La production de l'éolienne est illustrée sur la Figure IV - 6.b, cette courbe de production est actualisée toute les 30 minutes.

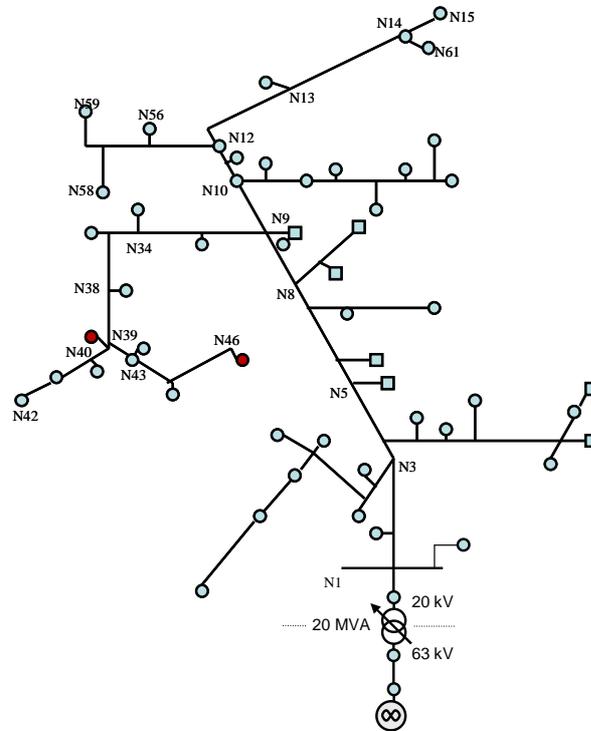
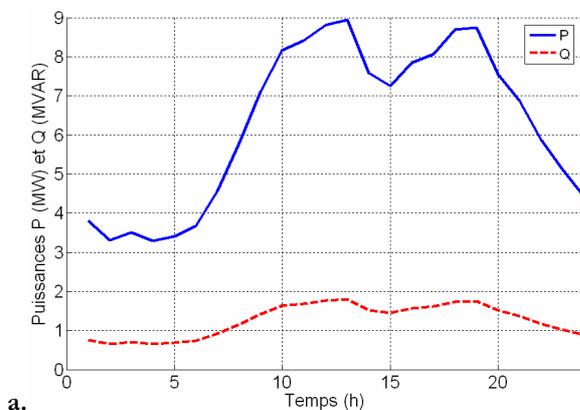
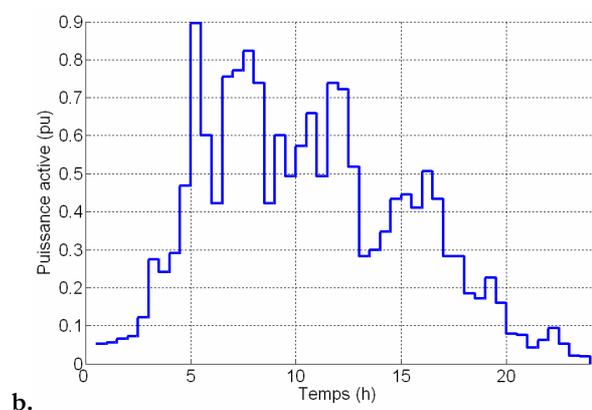


Figure IV - 5 : Réseau HTA de type rural

Pour ne pas atteindre des temps de simulations trop importants, des hypothèses sur l'échelle de temps du scénario ont été fixées. En effet, 1h sur les courbes correspond à 20s en simulation. Cette hypothèse a été nécessaire puisque, pour simuler ce scénario, le mode Batch entre Eurostag et Matlab a été encore une fois utilisé. Grâce à ce mode Batch, la simulation d'un scénario de 480s dure 4 heures, les simulations de 24h sont donc difficilement réalisables.



a.



b.

Figure IV - 6.a : Evolution des puissances de charge

b : Evolution de la production éolienne.

La Figure IV - 7 et la Figure IV - 8 montrent l'évolution des tensions et de la puissance réactive respectives de la production éolienne et de la machine synchrone. Ainsi, il est notable que pour chaque changement de production ou de consommation les consignes évoluent, évitant ainsi des élévations importantes de tensions. De plus, les évolutions de production de l'éolienne (Figure IV - 6.b) entraînent des changements de limitation de puissance réactive, comme cela a été vu dans le chapitre III (équation III - 1). Les calculs des tensions de consignes désirées étant fonction de cette limite en puissance réactive, celle-ci est prise en compte à chaque évolution de la production.

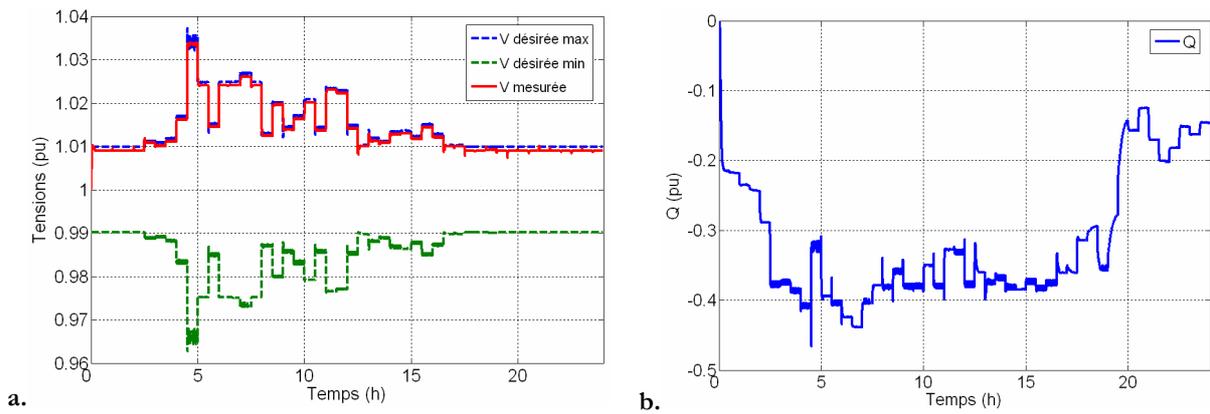


Figure IV - 7 : Evolution des tensions mesurées et de consignes (a) ainsi que de la puissance réactive de l'éolienne (b).

La machine synchrone produit une puissance active constante, cependant celle-ci adapte sa production de puissance réactive en fonction des contraintes induites par le caractère intermittent de la production de l'éolienne, ainsi que par les variations de charge.

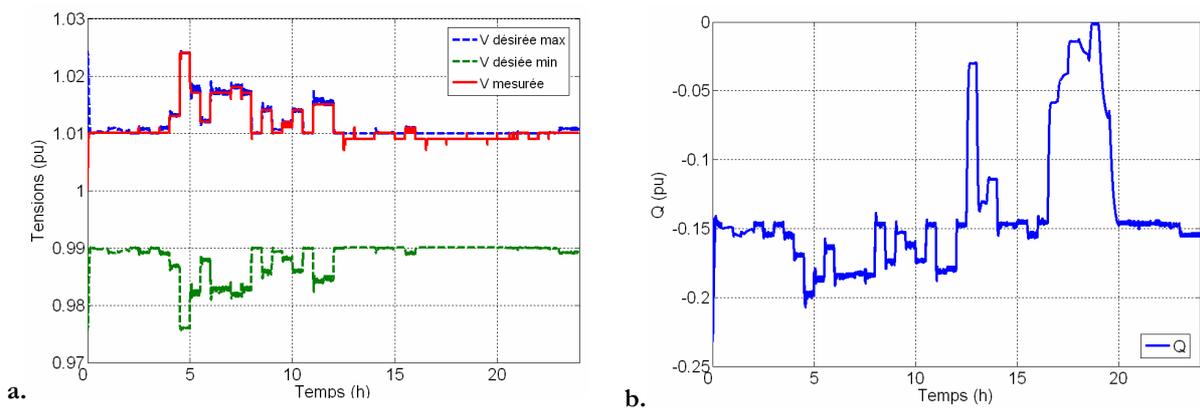


Figure IV - 8 : Evolution des tensions mesurées et de consignes (a) ainsi que de la puissance réactive de la PDE au N39 (b).

Le contrôle auto adaptatif est donc capable de prendre en compte les évolutions permanentes de la tension, ainsi que des limites de capacité de production ou d'absorption de

puissance réactive différentes. Le caractère adaptatif et dynamique du régulateur est donc vérifié sur ce scénario.

III Expérimentation en temps réel et sur un onduleur de tension.

III.1 Présentation

La simulation du régulateur à l'aide d'outil logiciel nous a permis de mettre en avant l'intérêt et le bon fonctionnement de celui-ci. Cependant un prototypage sur un système réel d'un tel contrôle permettrait d'aller vers plus de validation et permettrait de prouver sa faisabilité.

Le test d'algorithme de contrôle, ainsi que de système réel connecté au réseau de distribution, est une problématique de recherche du fait de la difficulté de la mise en place d'un scénario sur un réseau réel. Ainsi, des travaux antérieurs à cette thèse ont conçu un banc d'essais permettant de faire fonctionner un système réel et de le coupler avec un réseau électrique simulé en temps réel sur Arene. [GOMB-1-2005], [LAVE-2005], [OCNA-2005].

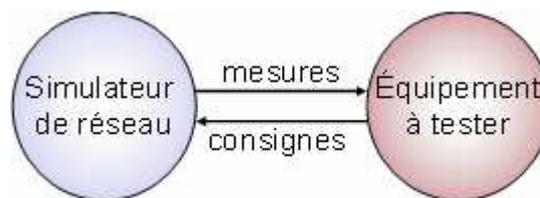


Figure IV - 9 : principe de fonctionnement de la simulation temps réel

Ainsi le test des contrôles réalisés ainsi que le comportement d'une production d'énergie connectée à un réseau de distribution fictif vont être fait.

- La production d'énergie pourra être simulée soit par le biais d'un contrôleur programmable, capable de calculer les courants à produire dans le but de retranscrire le comportement d'une PDE, soit par une source de tension continue interfacée au réseau grâce à un onduleur triphasé dont les caractéristiques seront développées dans les paragraphes suivants.
- Le réseau sera simulé en temps réel grâce à AreneURT (Unix Real Time) [DEVA-1998].

La globalité de tout le système nécessaire à la réalisation d'un tel test va être exposée, les résultats et comparaisons suivront cette présentation.

III.2 Simulation temps réel

III.2.a Présentation de l'architecture de test

Le banc expérimental présenté dans ce paragraphe permet de simuler en temps réel l'implantation d'une PDE avec son contrôle-commande, connectée directement sur un réseau de distribution.

Le système en charge de la simulation d'un réseau de distribution est AreneURT. Cette version temps réel, développée par EDF, a les mêmes fonctionnalités en terme de bibliothèque ou de modèles qu'Arene hors temps réel. Cependant la version temps réel est capable, à chaque pas de temps, d'acquérir des signaux d'entrées externes, de les traiter et de calculer un nouvel état du réseau simulé et enfin de restituer des mesures sélectionnées en destination de l'équipement à tester. La Figure IV - 10 expose le principe de fonctionnement et le matériel nécessaire pour le réaliser.

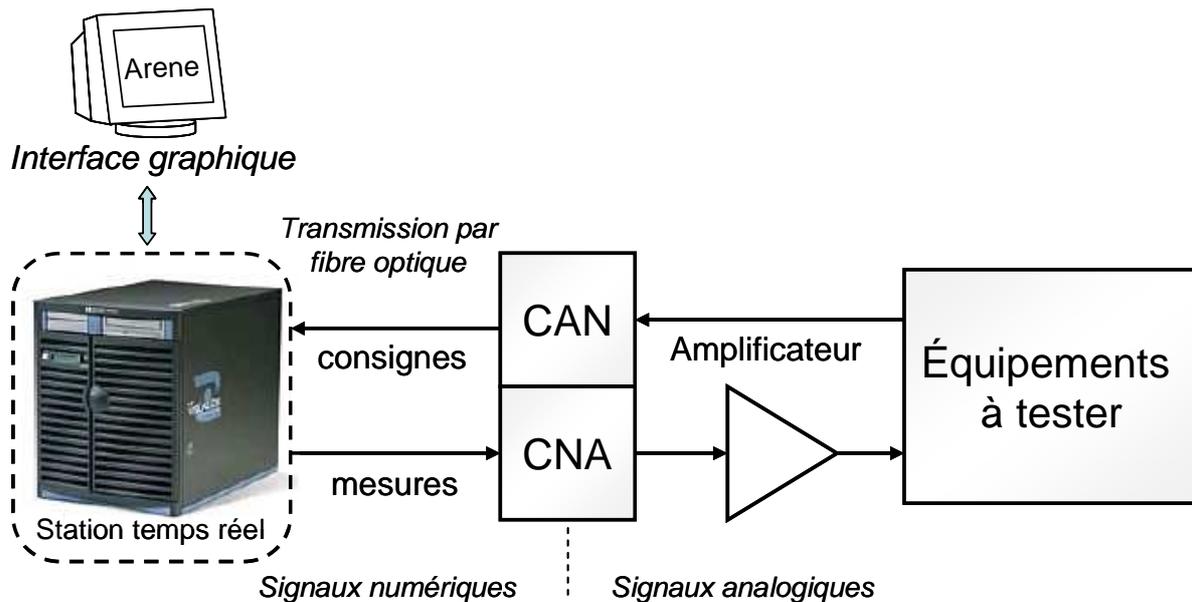


Figure IV - 10 : Fonctionnement du système Arene temps réel.

Lors de ces tests, le pas de temps doit être suffisamment grand pour que la station (Figure IV - 10), soit à même de réaliser ces opérations. Cependant, ce pas de temps est fixe et doit être assez petit (ou respecter la loi de Shannon dans le cas d'un équipement utilisant un échantillonnage) [GOMB-2-2005] pour que la simulation d'un réseau de distribution puisse être réaliste.

Au point de connexion de la PDE sur le réseau, les mesures nécessaires à la régulation sont effectuées. Ces données sont envoyées par fibres optiques aux convertisseurs CNA, CAN

(Interface d'entrées/sorties d'AreneURT) puis converties en signaux analogiques compris entre $\pm 10V$.

Dans la Figure IV - 10, l'équipement à tester est une PDE contrôlée. Ainsi cette production sera simulée grâce à un ordinateur dSPACE programmable. dSPACE, associé à la carte ds1102, est un système temps réel qui permet le prototypage de dispositif de commande. Basé sur un DSP (Digital Signal Processing), il génère automatiquement des codes pour des fonctions spécifiées graphiquement sous Matlab/Simulink : les fonctions sont converties en code C, compilées et écrites dans le dSPACE.

La simulation du réseau de distribution va s'effectuer sous AreneURT, qui à chaque pas de temps fournit les mesures nécessaires au dSPACE. Celui-ci les traite et calcule, en fonction du contrôle implanté, des consignes en courants. Ces courants sont ensuite injectés au point de connexion de la PDE, simulée grâce à un injecteur de courant. Ces courants calculés vont permettre de réguler des puissances ou une tension.

III.2.b Réalisation des expérimentations entre AreneURT et dSPACE

Avant de simuler le fonctionnement du régulateur auto adaptatif sur un onduleur réel, nous avons procédé par étape en testant les contrôles en puissances et en tension développés dans le chapitre II. Les modèles testés sont ceux réalisés pour les PDE interfacées avec un onduleur. Les courants de consignes calculés seront donc ceux fournis à AreneURT. Le but de ces tests est de voir si les résultats obtenus en simulation corroborent à ceux obtenus lors de l'expérimentation. Ainsi, les résultats seront validés de manière individuelle pour chaque contrôle.

III.2.b.1 Test du contrôle P/Q

Les modèles de régulations P/Q et P/V ont été testés à l'aide d'un réseau simplifié, illustré Figure IV - 11.

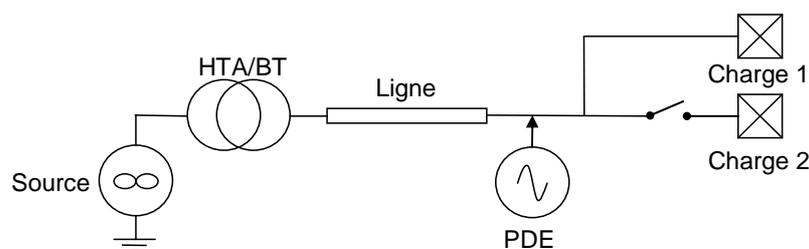


Figure IV - 11 : Réseau test pour les contrôles P/Q et P/V

Le réseau simulé est un réseau BT alimenté par un transformateur modélisé par une impédance. La PDE a une puissance de 90 kVA. Plus d'informations sur ce réseau se trouvent en annexe III.

La PDE fonctionne à 75 kW et 20 kVAR. Pour ces tests, nous avons fait l'hypothèse qu'un étage de stockage est présent sur le bus DC de la PDE simulée. Ainsi, les dynamiques considérées sont uniquement celles des régulations. Le scénario se déroule sur 1.2s et comporte 3 événements successifs :

- une variation de consigne en puissance active de 10% pendant l'intervalle de temps $t \in [0.2s, 0.4s]$.
- une variation de consigne en puissance réactive de 10% pendant l'intervalle de temps $t \in [0.5s, 0.7s]$.
- une variation de charge, la charge 2 est ajoutée pendant l'intervalle de temps $t \in [0.8s, 1s]$ (cf. annexe III).

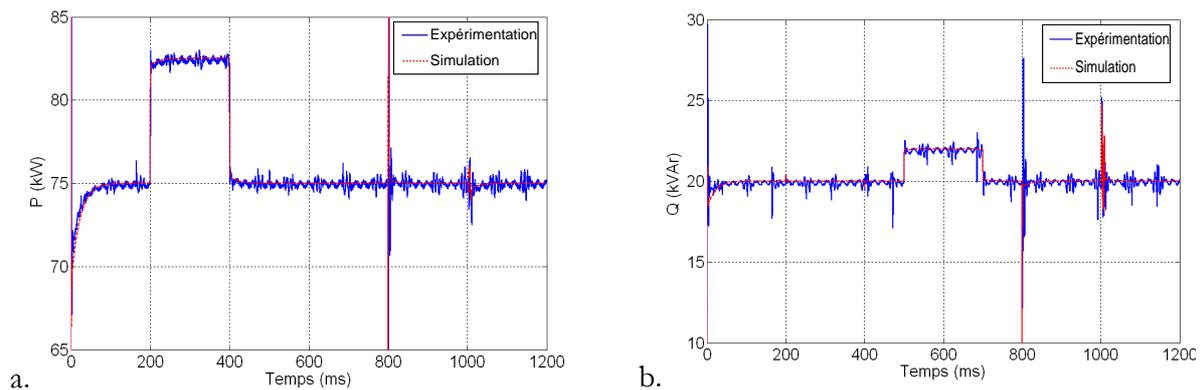


Figure IV - 12 : Superposition des réponses de puissances en test pratique et en simulation.

Les résultats obtenus grâce au banc de test sont comparés sur la Figure IV - 12 avec ceux simulés sous Arene. Dans les deux cas les changements des consignes de puissance sont bien suivis. Il est à noter également que les résultats obtenus grâce au banc expérimental se superposent parfaitement avec ceux obtenus en simulation.

III.2.b.2 Test du contrôle P/V

Pour tester ce contrôle le même réseau et la même PDE sont utilisés. Le changement de puissance réactive est remplacé par un changement de consigne en tension :

- une variation de consigne en puissance active de 10% pendant l'intervalle de temps $t \in [0.2s, 0.4s]$.

- une variation de consigne en tension de 3% pendant l'intervalle de temps $t \in [0.5s, 0.7s]$.
- une variation de charge, la charge 2 est ajoutée pendant l'intervalle de temps $t \in [0.8s, 1s]$ (cf. annexe III).

Les courbes Figure IV - 13 montrent la cohérence des deux contrôles comparés. En effet, tout deux régulent la puissance active aux valeurs de consignes imposées. De plus, la tension est fixée selon les exigences du scénario, l'adaptation de production de puissance réactive est sensiblement identique. Il est possible cependant de voir une légère différence lors des transitoires, notamment sur les courbes de puissance active.

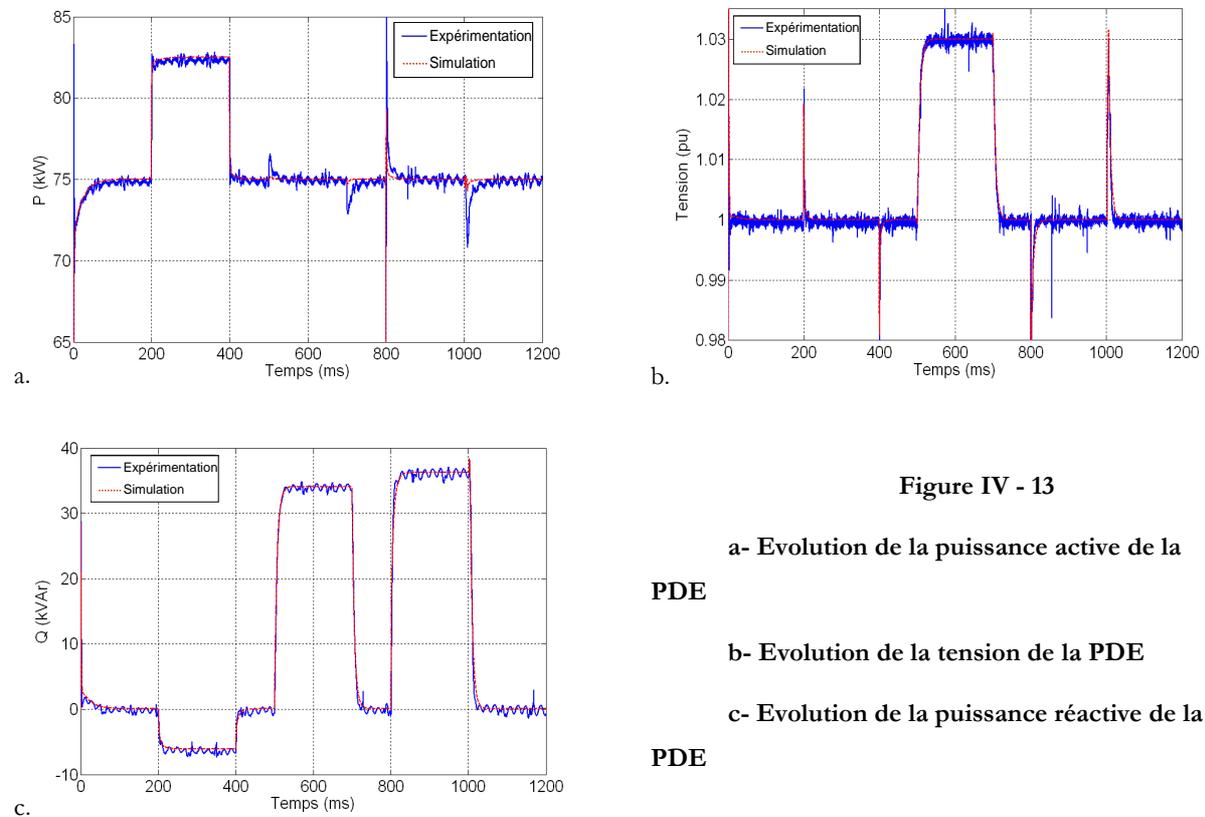


Figure IV - 13

- a- Evolution de la puissance active de la PDE
- b- Evolution de la tension de la PDE
- c- Evolution de la puissance réactive de la PDE

III.2.b.3 Test du contrôle adaptatif

De la même façon le contrôle adaptatif va être testé, le scénario est cependant légèrement changé. En effet, une charge est ajoutée de manière à pouvoir réaliser un déclenchement puis un enclenchement. La Figure IV - 14 illustre la nouvelle configuration du réseau test. La PDE est contrôlée avec le régulateur adaptatif à consignes fixes et égales à : $V_{\max}=1,02pu$ et $V_{\min}=0,95pu$.

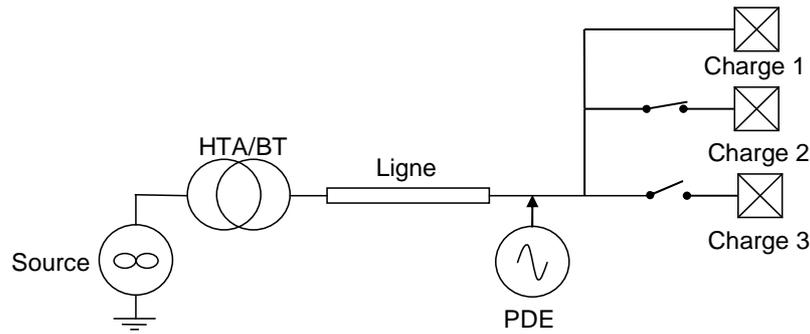


Figure IV - 14 : Réseau test pour le contrôle adaptatif

Ainsi le scénario de test comprend trois évènements :

- une variation de consigne en puissance active de 10% pendant l'intervalle de temps $t \in [0.2s, 0.4s]$.
- une variation de charge, la charge 2 est déconnectée pendant l'intervalle de temps $t \in [0.5s, 0.7s]$.
- une variation de charge, la charge 3 est ajoutée pendant l'intervalle de temps $t \in [0.8s, 1s]$ (cf. annexe III).

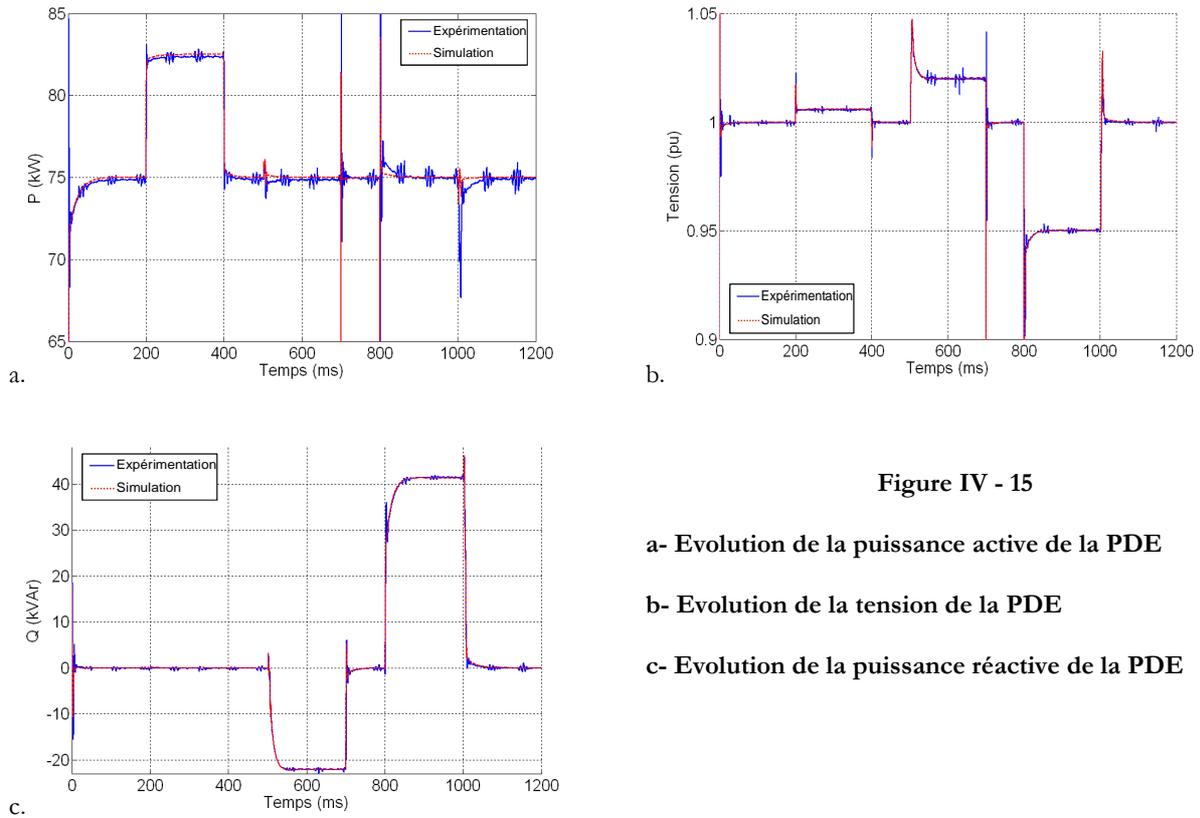


Figure IV - 15

a- Evolution de la puissance active de la PDE

b- Evolution de la tension de la PDE

c- Evolution de la puissance réactive de la PDE

Une fois encore, les résultats obtenus en simulations est grâce au simulateur temps réel sont très proches. Dans les deux cas, le contrôle passe dans le mode de régulation adéquat en fonction des contraintes de tension mesurée au point de raccordement.

Ces tests montrent la cohérence existante entre les résultats obtenus avec les contrôles réalisés en simulations et ceux obtenus avec le banc expérimental. Ces résultats ont été obtenus en comparant des simulations réalisées sous les environnements Arene et AreneURT.

Le contrôle auto adaptatif ne peut pas être simulé sous Arene, en effet, il n'est pas possible d'importer un bloc fonctionnel extérieur à cet environnement. Cependant, l'intégration de ce contrôle est possible dans le dSPACE. Ainsi, en nous appuyant sur la cohérence des résultats précédents et sur l'implantation possible du contrôle auto adaptatif dans le calculateur dSPACE, la mise en pratique de ce contrôle sur un groupe de production réel va être testée.

III.3 Contrôle d'un onduleur de tension par le régulateur auto adaptatif

Le comportement d'une PDE contrôlée grâce au contrôle adaptatif a pu être intégré dans un calculateur programmable et comparé avec des résultats obtenus en simulation. L'objectif à présent est non plus de simuler toute la production dans le calculateur, mais uniquement son contrôle. Ainsi, le contrôle auto adaptatif va être utilisé pour piloter la production de puissance active et réactive sur le réseau électrique via un onduleur de tension.

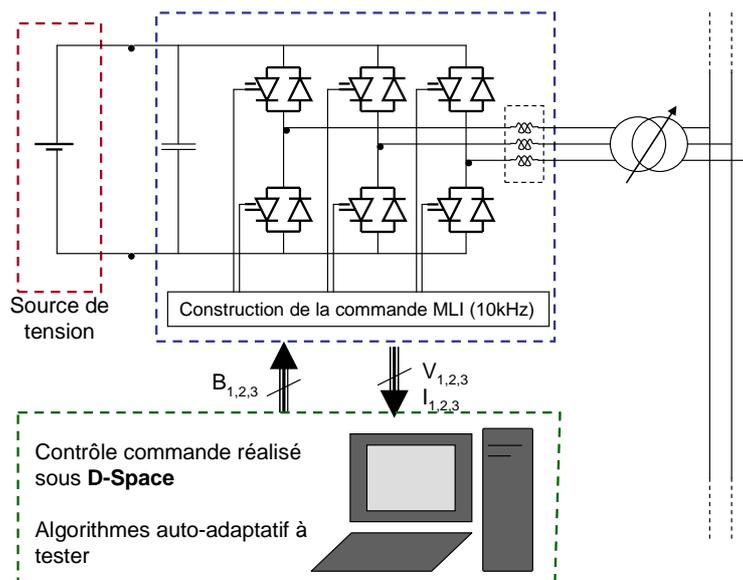


Figure IV - 16 : Système de production à contrôler

Dans cette optique, la source primaire d'énergie utilisée est une alimentation en tension continue de 500V (5kW). En effet, en utilisant une alimentation de tension continue en guise de source primaire, nous réalisons l'hypothèse que cette source, ainsi qu'un éventuel étage d'adaptation DC/DC, sont parfaitement commandés et sont capables de délivrer une tension régulée et continue.

L'onduleur de tension est triphasé et peut fournir une puissance de 5kVA. La partie que nous testons est un contrôle « amont », ou plus précisément, le contrôle du comportement de la PDE. Ainsi, nous nous sommes appuyés sur les travaux de [VALE-2004] pour réaliser le contrôle « rapproché » de l'onduleur (cf. chapitre II).

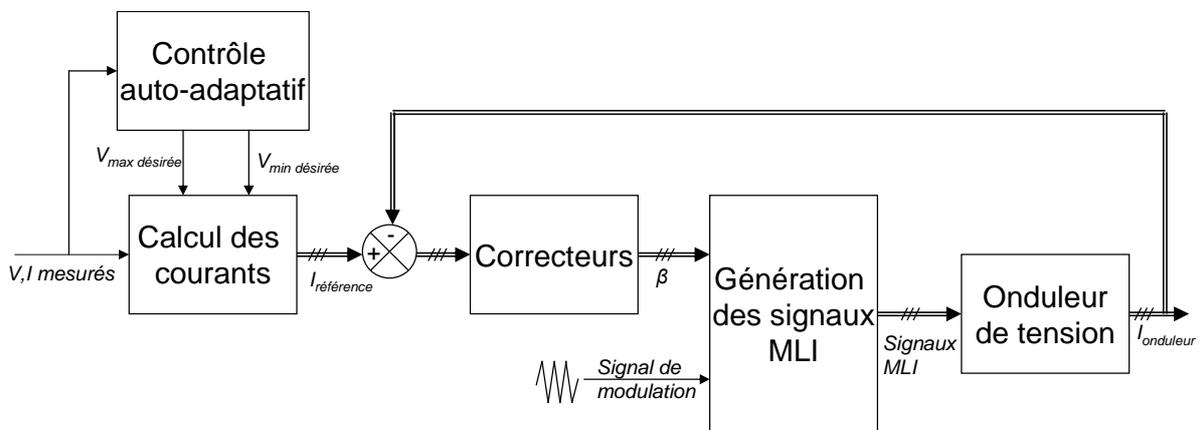


Figure IV - 17 : Boucles de commande de l'onduleur de tension

Grâce aux puissances de consigne et à la tension mesurée, il est possible de créer des courants triphasés de consigne. Ces courants triphasés de référence sont comparés aux courants mesurés en sortie de l'onduleur, cette différence est transformée via des correcteurs PI dans le référentiel de Park [ETXE-2003] en commande moyenne pour l'onduleur. Cette commande moyenne est utilisée comme onde de référence, pour être comparée à un signal de modulation triangulaire pour la création du signal de commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Ce schéma de contrôle est créé sous l'environnement Matlab/Simulink puis intégré dans dSPACE (carte ds1105). Tout ce système est illustré sur la photo Figure IV - 17.

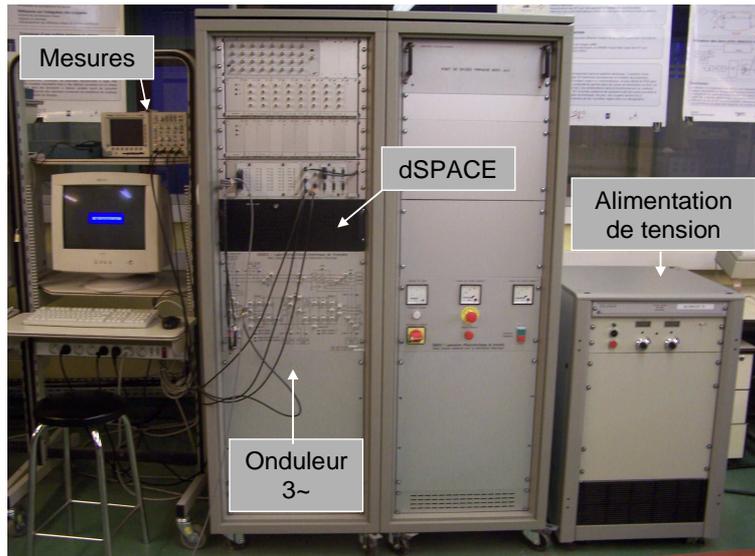


Figure IV - 18 : Banc expérimental, onduleur connecté au réseau

III.3.a Résultats expérimentaux

Sur la Figure IV - 16, l'onduleur de tension est connecté au réseau via un autotransformateur. La tension du réseau sera modifiée grâce à cet appareil, ceci nous permettra de simuler un scénario et de faire réagir le contrôle auto adaptatif. Ainsi, Les courbes suivantes illustrent la réaction du contrôle et la variation de puissance réactive injectée en fonction des tensions mesurées.

Les courbes Figure IV - 19 illustrent le démarrage de la production à $t=6s$ et une diminution de la tension au niveau du transformateur à $t=19s$. Ainsi, la PDE produit une puissance active de $3kW$ et a une limitation de puissance réactive de $\pm 2kVAR$.

Suite au démarrage de la production, la tension mesurée en sortie de l'onduleur augmente pour atteindre une valeur de $1.04 pu$. Les consignes de tensions désirées sont recalculées pour limiter cette hausse de tension. Ainsi, la production absorbe la quantité de puissance réactive nécessaire au contrôle de la tension.

La dynamique de l'adaptation de consigne et donc de la réaction en puissance réactive est imposée par la dynamique de production de puissance active et de son impact sur la tension. La dynamique de production ici est simulée par une constante de temps du premier ordre de $0.3s$.

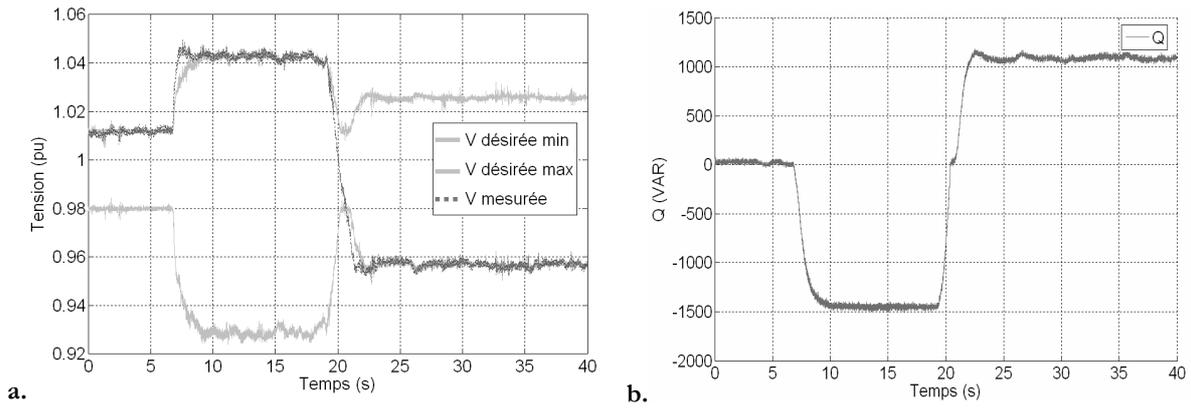


Figure IV - 19 : Evolution des tensions de consigne et de la tension mesurée (a) ainsi que de la puissance réactive de la PDE (b)

Le deuxième événement est réalisé par le changement du point de fonctionnement de l'autotransformateur. En effet, la tension est diminuée à $t=19s$ pour simuler le cas d'une forte charge. Dans ces conditions, la tension passe d'une valeur haute à une valeur inférieure à 1pu. L'adaptation de consigne est cohérente et suit l'évolution de la tension pendant le transitoire jusqu'à ce que la tension se stabilise à une valeur de 0,96pu. Ainsi, la PDE, qui absorbait précédemment de la puissance réactive pour contrôler la tension à la valeur de consigne haute, fournit à présent de la puissance réactive pour contrôler la tension à la valeur de consigne basse. L'adaptation du contrôle aux différents événements du réseau est effective.

Un deuxième test est réalisé pour illustrer, cette fois-ci, une augmentation de la tension trop importante et pour atteindre les limitations de production de la puissance réactive de la PDE.

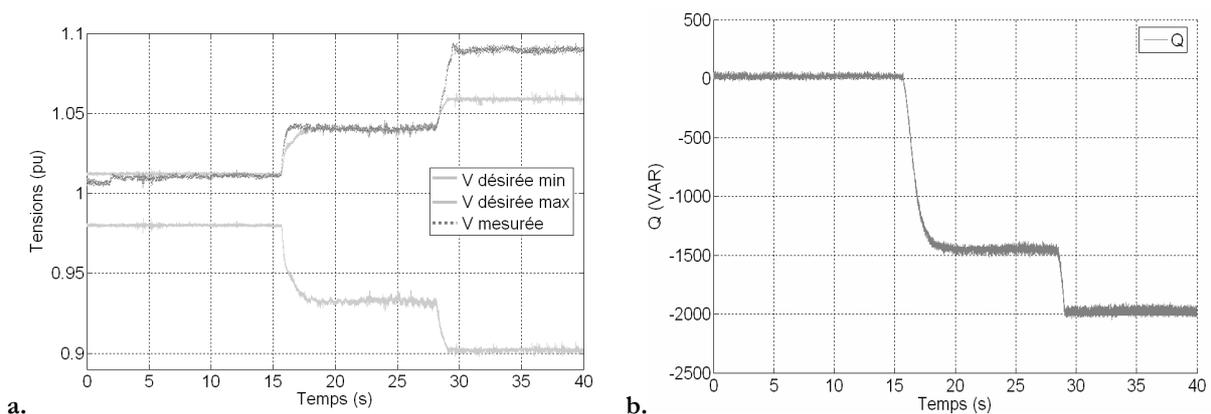


Figure IV - 20 : Evolution des tensions de consigne et de la tension mesurée (a) ainsi que de la puissance réactive de la PDE dans le cas d'une limitation (b)

Les courbes Figure IV - 20 illustrent le même démarrage de production que précédemment, puis un changement de point de fonctionnement du transformateur, mais cette

fois-ci pour une tension encore plus élevée. Il est visible que, suite à cet événement, assimilable à une perte de charge, la tension sort des valeurs admissibles. La production absorbe la quantité de puissance réactive maximale et la fenêtre de consignes désirées est ouverte au maximum. Ici $V_{\text{désirée max}} = V_{\text{admissible max}}$ et $V_{\text{désirée min}} = V_{\text{admissible min}}$. Ici, les limitations de la production ne permettent donc pas de conserver la tension à l'intérieur de la plage autorisée de +6%, -10%. La production fournit un effort maximal en absorbant -2kVAR de puissance réactive.

Ces simulations montrent la faisabilité d'un contrôle d'une PDE à l'aide du régulateur auto adaptatif. Cependant les scénarii réalisés pour illustrer la bonne marche du contrôle peuvent être améliorés dans des études perspectives. En effet, dans les scénarii présentés, la PDE simulée est connectée à un réseau électrique réel, dont les caractéristiques ne sont pas connues. Il serait donc intéressant de pouvoir connecter cette production à un simulateur de réseau temps réel pour pouvoir illustrer le fonctionnement du régulateur auto adaptatif en réalisant des variations de charges ou d'autres événements sur le réseau simulé en temps réel sous AreneURT.

Ceci est réalisable à l'aide d'un étage d'adaptation entre le simulateur de réseau d'un côté, capable de fournir des signaux de très faible puissance, et la PDE de l'autre, qui elle fournit une puissance de quelques kVA. On parle alors de simulation « hybride » [OCNA-2005] grâce à laquelle il est possible de simuler le fonctionnement de matériels réels, avec une puissance conséquente, connectés à un réseau simulé en temps réel. [GOMB-2-2005]

Un étage d'amplification des signaux en provenance du simulateur est nécessaire ainsi que des capteurs capables de fournir des signaux adaptés pour les consignes en courant pour AreneURT. La Figure IV - 21 schématise l'architecture du système à réaliser pour de telles simulations de fonctionnement, dans des conditions réelles.

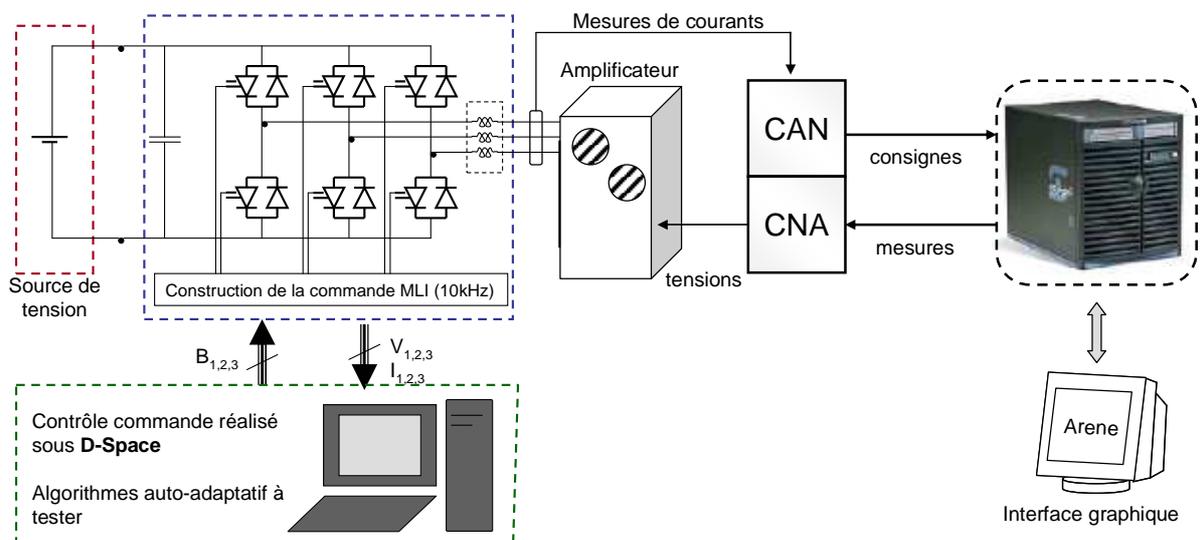


Figure IV - 21 : fonctionnement des simulations « hybrides »

Cependant, ce fonctionnement en simulation « hybride » n'a pas pu être finalisé pendant cette thèse. Ainsi, ces travaux peuvent être envisagés comme perspective aux études expérimentales de validation.

IV Conclusions

Les études réalisées sur des réseaux HTA nous ont permis d'illustrer l'adaptabilité du contrôle développé, aux évolutions de productions, de charge, de réglages voisins et de limitations internes. Ainsi l'objectif de création d'un contrôle local dynamique est atteint. Cependant il peut être intéressant et parfois nécessaire d'utiliser ce contrôle avec d'autres automates de réglages. En effet, le fait de contrôler la tension via la puissance réactive des PDE peut entraîner des transits de cette puissance via le poste source. Ainsi, l'utilisation de batterie de condensateurs est donc très adaptée pour limiter ce transit. Cette configuration permet donc un contrôle de tension efficace avec des pertes limitées. La pertinence de l'utilisation conjointe d'un régulateur en charge et du contrôle auto adaptatif dépend de la configuration considérée. En effet, celle-ci dépend de la répartition ainsi que de la capacité de réglage des PDE.

De plus, l'application de ce contrôle sur un onduleur de tension connecté au réseau électrique a été effectuée. Le comportement observé est concluant et l'application d'un tel contrôle est réalisable. Cependant des études sur un réseau simulé sous AreneURT, avec la réalisation de scénarii plus étoffés pourraient être réalisées grâce à la simulation hybride exposée.

Chapitre V : Comparaison de méthodes de régulation de
tension locale et coordonnée

I Introduction

Comme il a été exposé à la fin du premier chapitre de cette thèse, deux solutions peuvent être envisagées pour le contrôle de tension sur le réseau de distribution. Ces travaux proposent un contrôle de tension local, c'est-à-dire sans communication ni coordination extérieure. Cette solution paraît, à l'heure actuelle, plus facilement applicable. En effet, celle-ci ne nécessite pas de rendre observable le réseau de distribution, ni de mutualiser les productions. Cependant, cette voie est également étudiée au sein du GIE IDEA, dans le cadre d'étude concernant la mutualisation de productions dites décentralisées classiques ou à caractère intermittent, pour une compétitivité économique accrue. En effet, à cause du caractère intermittent ou de la petite taille des productions, les unités décentralisées nécessitent de s'allier pour pouvoir garantir une puissance minimale et avoir accès au marché de l'énergie. Cette mutualisation d'unité de production est définie par l'appellation « centrale virtuelle ». Ainsi, ces centrales virtuelles peuvent vendre de l'énergie, mais également une participation active aux services système du réseau de distribution. C'est dans cette optique qu'a été développé un contrôle de tension coordonné sur les réseaux de distribution réalisé par des PDE.

Le sujet de ce chapitre est donc de comparer deux approches différentes pour le contrôle de tension sur le réseau de distribution à l'aide de PDE. Dans un premier temps, le contrôle coordonné va être présenté, suivra la présentation des scénarii de comparaisons du réseau et de la modélisation des PDE. Enfin, les résultats et les conclusions seront développés.

II Le contrôle de tension coordonné sur le réseau de distribution

II.1 Principe du contrôle

Le contrôle de tension existant à l'heure actuelle, sur le réseau de transport français, a été présenté dans le paragraphe II.2 du premier chapitre. Le principe du Réglage Coordonné de Tension (RCT) sur le réseau de distribution s'inspire du contrôle coordonné de tension sur le réseau de transport, son principe va être exposé.

En effet, de la même façon que pour le réglage primaire de tension sur le réseau de transport, les PDE sont contrôlées en tension, ainsi celles-ci sont capables d'agir sur leur

production de puissance réactive pour fixer une consigne de tension désirée, au point de leur connexion. Ceci peut être réalisé grâce à un contrôle de tension (de type AVR) classique ou par un contrôle de type P/V.

Ce contrôle s'applique sur une zone géographique délimitée du réseau, celle-ci peut contenir plusieurs départs. Dans le cas d'étude de ce chapitre, cette région est définie par l'ensemble des départs HTA en aval d'un même poste source. Sur cette zone sont définis des « points pilotes ». Le contrôle de la tension de ces nœuds, représentatifs de la tension sur le réseau, va être le principal objectif du RCT. Ainsi, ces points pilotes sont choisis de manière à avoir une observabilité ainsi qu'une commandabilité optimale sur la zone de réseau considérée.

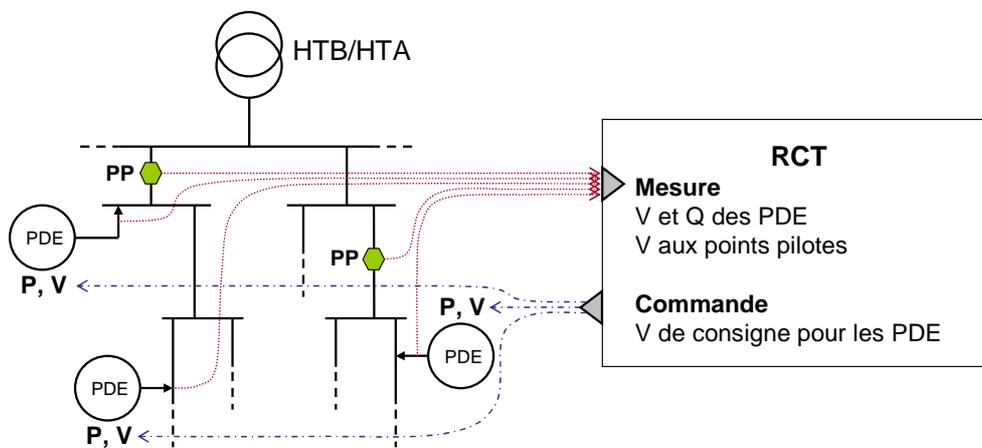


Figure V - 1 : Illustration du fonctionnement du RCT

Le RCT reçoit des informations de tension des points pilotes et des PDE, ainsi que de puissance réactive produite par ces unités. En fonction de ces mesures, un calcul d'optimisation donne les consignes en tension pour chaque PDE permettant de maintenir les tensions objectives des points pilotes. [RICH-1-2006]

II.2 Détermination des consignes de tension pour les unités de productions

Le rôle du RCT est de calculer des références de tension optimales pour les PDE, pour conserver la valeur de consigne de tension aux points pilotes. Ces consignes sont réactualisées toutes les 10s, ce qui permet de faire face aux évolutions (variations de charges, aléas, etc.) du réseau. Ceci est réalisé en minimisant la fonction multi-objectif suivante grâce à une méthode déterministe. [RICH-1-2006]

$$\begin{aligned}
 F_{OBJ}(V_i^{ref}) = & \Lambda_{V_p} \cdot n_{V_p} \cdot \sum_{j \in \alpha P} \lambda_j^{V_p} \left(\alpha(V_j^{ref} - V_j) - \sum_{k \in \alpha G} S_{V_j, V_k} \cdot \Delta V_k \right)^2 \\
 & + \Lambda_{Q_G} \cdot n_{Q_G} \cdot \sum_{j \in \alpha G} \lambda_j^{Q_G} \left(\alpha(Q_j^{MAX} \cdot q^{ref} - Q_j) - \sum_{k \in \alpha G} S_{Q_j, V_k} \cdot \Delta V_k \right)^2 \\
 & + \Lambda_{V_G} \cdot n_{V_G} \cdot \sum_{j \in \alpha G} \lambda_j^{V_G} \left(\alpha(V_j^{ref} - V_j) - \Delta V_j \right)^2
 \end{aligned} \tag{V-1}$$

Où :

α est le gain du "contrôleur";

S_{V_p, V_G} est la matrice de sensibilité reliant les variations de tension aux nœuds pilotes aux variations de tension aux nœuds générateurs;

S_{Q_G, V_G} est la matrice de sensibilité reliant les variations de puissance réactive aux nœuds générateurs aux variations de tension de tension aux nœuds générateurs;

n_{V_p} , n_{Q_G} et n_{V_G} les indices de normalisation;

et Λ_{V_p} , Λ_{V_G} , Λ_{Q_G} , $\lambda_j^{V_p}$, $\lambda_j^{Q_G}$ et $\lambda_j^{V_G}$ les coefficients de pondération.

V_j^{ref} , V_j et ΔV_j sont, pour chaque nœud j, la référence de tension, la mesure de tension et l'écart de tension entre cette mesure et la mesure du pas de calcul précédent.

Q_j et Q_j^{MAX} sont les puissances réactives mesurées et maximales pour les nœuds j, vérifiant la condition $|Q_j| \leq Q_j^{MAX}$.

$q^{ref} = \frac{\sum_{j \in \alpha G} Q_j}{\sum_{j \in \alpha G} Q_j^{MAX}}$ est la référence de puissance réactive uniforme sur toute la zone de réglage considéré.

Trois objectifs se distinguent clairement dans la fonction (V -1) à minimiser.

- La variation de la tension aux points pilotes.
- Le déséquilibre de la participation des PDE par rapport à cette déviation.
- La variation des tensions des PDE, pour stabiliser le réglage.

Ces objectifs sont pondérés par les paramètres λ . Ainsi, il est possible de donner des priorités aux objectifs du réglage.

Dans le cadre de notre comparaison entre les contrôles local (auto adaptatif) et coordonné, le poids le plus fort sera fonction des mesures en tension au nœud de raccordement des PDE et aux points pilotes. En effet, l'objectif premier de ce contrôle est de conserver la

tension en tout point du réseau entre les limites admissibles. Cependant, lorsque peu de contraintes sont détectables, ce contrôle peut également limiter la mobilisation des réserves de puissance réactive des PDE et favoriser la compensation locale de puissance réactive, pour ainsi, réduire les pertes.

Ces objectifs précités sont pondérables au sein d'une fonction objectif. Ainsi, le RCT est capable d'adapter les priorités des objectifs à réguler de la manière suivante :

Domaine de tension	Commentaire	λV_p	λQ_G	λV_G
Domaine I : compensation locale de l'énergie réactive	La tension n'approche les limites en aucun nœud; la gestion prioritaire du réactif par départ permet de minimiser l'appel de réactif au niveau du poste source.	0.1	0.8	0.1
Domaine II : zone tampon	La tension en certains nœuds est proche des limites; le réactif est géré globalement.	0.5	0.4	0.1
Domaine III : réglage de tension	La tension a dépassé les limites en au moins un nœud; le réglage prioritaire de la tension aux nœuds pilotes permet de ramener la tension dans les limites admissibles ou de limiter les déviations.	0.8	0.1	0.1

Tableau V - 1 : Loi d'adaptation des poids de la fonction objectif en fonction des tensions des PDE et des points pilotes

Des priorités de réglage différentes sont définies par domaines dans le Tableau V - 1. Ceux-ci sont illustrés Figure V - 2.

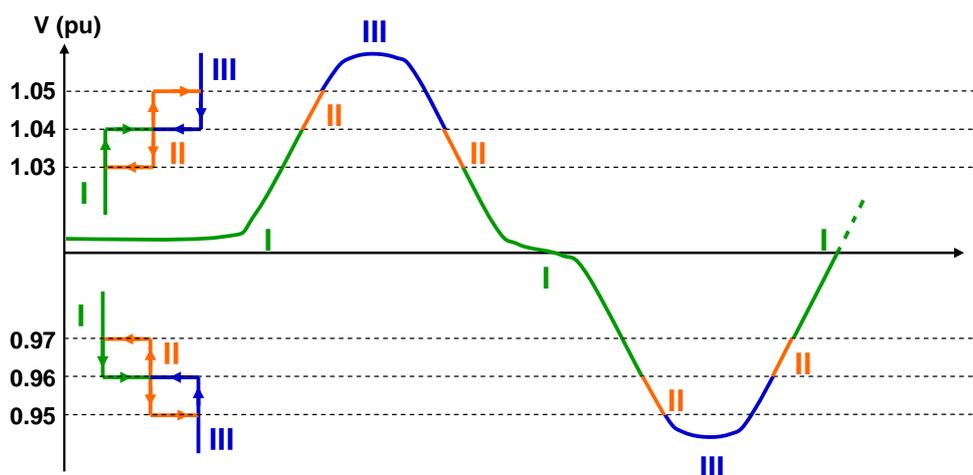


Figure V - 2 : Définition des transitions entre domaines

Ainsi, le passage d'un domaine de fonctionnement à un autre est réalisé dès qu'une des tensions mesurées aux points de raccordement des PDE ou aux points pilotes dépasse les limites fixées Figure V - 2. La loi d'activation ou de désactivation d'un point de fonctionnement est régie par une hystérésis, ceci pour éviter les phénomènes de battement entre deux zones.

III Cas d'étude pour la comparaison des contrôles en tension local et coordonné

Maintenant que le RCT est défini il va être possible de fixer le cadre d'étude pour la comparaison à réaliser. 5 PDE sont connectées sur un réseau HTA, présenté Figure V - 4. Cette configuration sera simulée sous plusieurs scénarii de charge. Pour chaque scénario toutes les PDE seront contrôlées dans un premier temps par le régulateur auto adaptatif (RAA) puis, dans un deuxième temps par le RCT sous les mêmes conditions.

De manière à rendre aisé le changement de contrôle, plusieurs hypothèses ont été réalisées sur les aspects de modélisation, aussi bien au niveau des PDE, qu'au niveau du réseau.

III.1 Modélisation des PDE et de leurs contrôles

Le but de cette étude est d'analyser les réactions des deux contrôles sous des contraintes identiques. Ainsi, l'étude est réalisée de manière dynamique, cependant nous n'attachons pas beaucoup d'importance à la modélisation de régime transitoire précis, les modèles de production seront donc des modèles simple et non des modèles physiques précis (Figure V - 3).

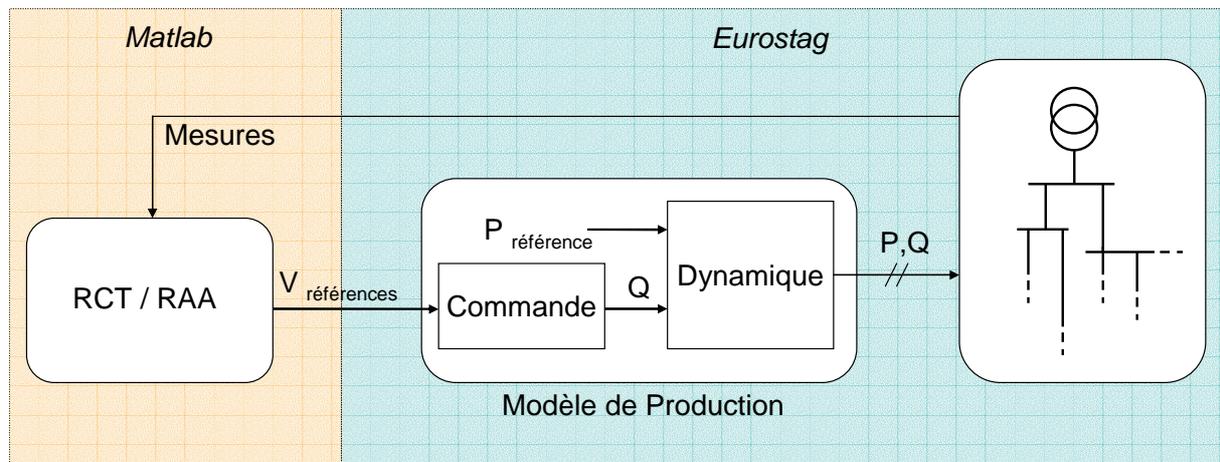


Figure V - 3 : Modèle de production et architecture de la simulation

Les productions seront modélisées par des injections de puissances contrôlées, dont les dynamiques sont modélisées par des fonctions de transfert du premier ordre. Ainsi, les puissances produites, auxquelles sont ajoutées leurs dynamiques respectives, sont injectées au réseau. Les contrôles RAA ou RCT sont en charge de calculer les consignes de tension de chaque production. Ces tensions sont ensuite régulées via la puissance réactive produite ou absorbée. Comme pour les simulations du chapitre III, le mode Batch du logiciel Eurostag est utilisé, les contrôles RCT et RAA seront gérés par le logiciel Matlab alors que les productions ainsi que le réseau le seront par le logiciel Eurostag. Pour la comparaison, le changement de contrôle va pouvoir se faire assez facilement, en modifiant l'algorithme de contrôle utilisé sous Matlab (Figure V - 3).

III.2 Caractéristique du réseau de distribution de l'étude

Le réseau de distribution utilisé est un réseau HTA de 190 nœuds, décomposé en 5 zones correspondant à 5 départs indépendants. Celui-ci est alimenté via un poste source de 36 MVA avec prises réglables en charge. Le poste source est connecté à un tronçon de réseau de répartitions lui-même connecté au réseau de transport standard 39 nœuds [IEEE New England]. La Figure V - 4 illustre ce réseau dont le détail des caractéristiques est fourni en annexe III. Ainsi, 5 PDE de 3MVA sont connectées sur ce réseau.

La Figure V - 4 illustre les 5 zones du réseau, la distribution des charges sur celui-ci ainsi que l'emplacement des PDE.

Trois types de charges sont présentes sur ce réseau.

- Type résidentiel : 43 % de la charge totale,
- Type industriel : 27 % de la charge totale,
- Type tertiaire : 30 % de la charge totale.

Zone n°	1	2	3	4	5	
Répartition des charges par type	résidentiel 100%	résidentiel 100%	tertiaire 60%	industriel 100%	tertiaire 50%	
			industriel 30%			résidentiel 50%
			résidentiel 10%			

Tableau V - 2 : Répartition de la charge

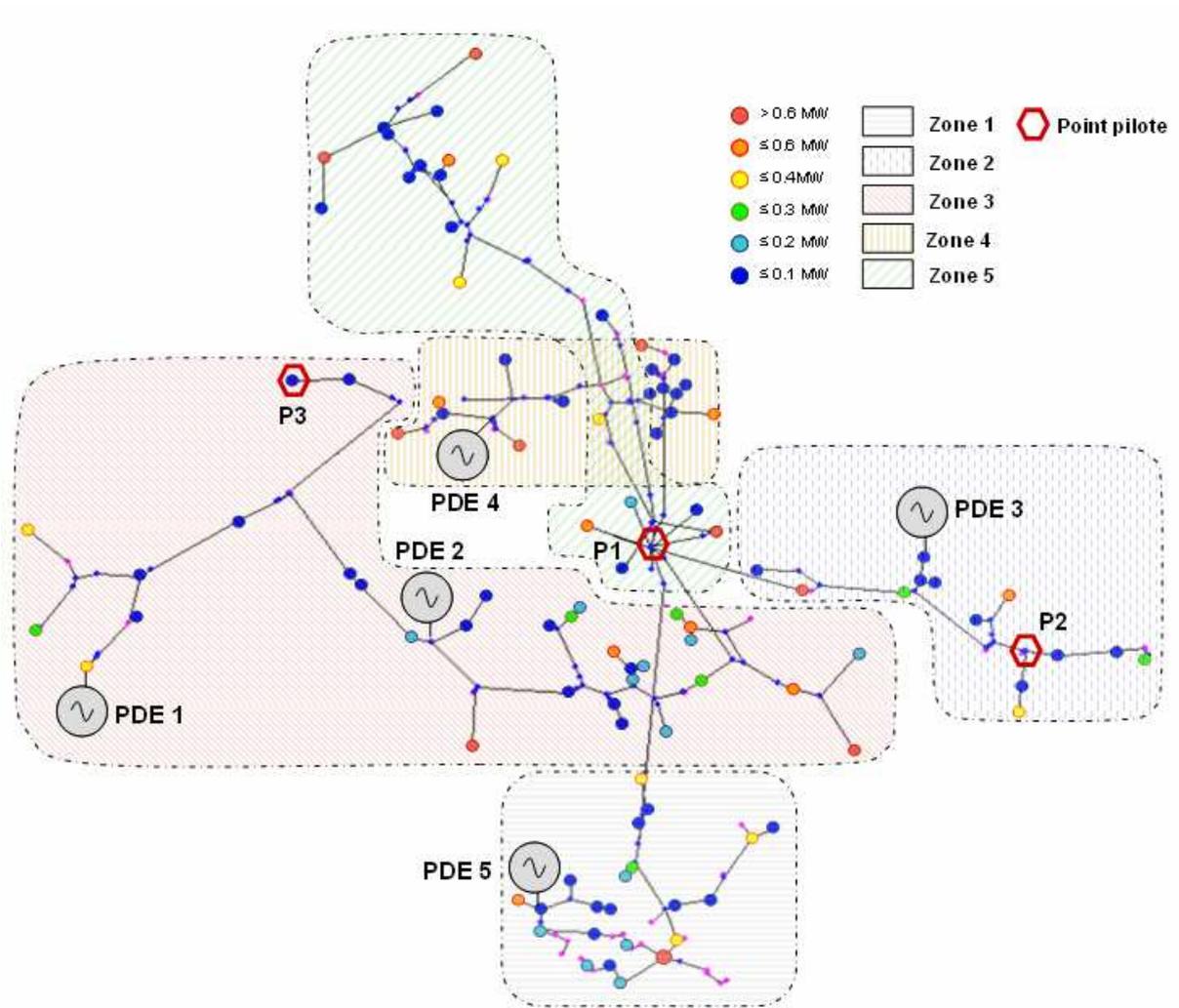


Figure V - 4 : Réseau de distribution HTA 190 nœuds

Le Tableau V - 2 expose la répartition de ce type de charge par zone. Les simulations sont réalisées selon les évolutions des charges Figure V - 5. Ces courbes vont permettre d'obtenir plusieurs configurations puisqu'elles passent d'un état faiblement chargé à un état fortement chargé.

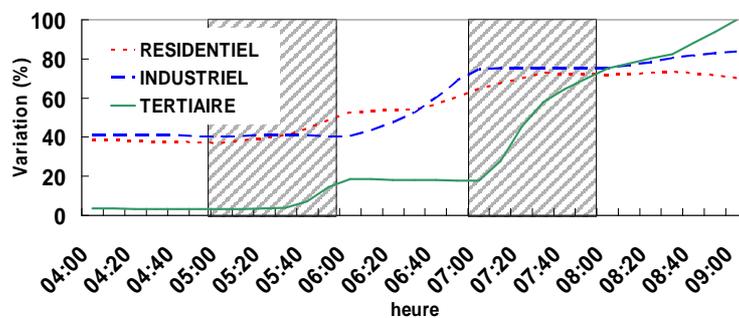


Figure V - 5 : Courbe de charge pour chaque type

La variation de la charge durant les simulations ne sera donc pas homogène. Celle-ci dépend des secteurs des zones définies dans Tableau V - 2. La simulation de cette courbe de plusieurs heures est cependant difficilement réalisable à l'aide du mode Batch puisque, dans le cas du réglage local, une telle simulation prendrait plusieurs heures. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse qu'une seconde de simulation équivaut à 10 secondes réelles. De plus, la courbe de charge Figure V - 5 a été séparée en trois périodes distinctes :

- $t \in [4h, 5h]$ où l'état de charge est faible,
- $t \in [6h, 7h]$ où l'état de charge est moyen,
- $t \in [8h, 9h]$ où la charge est forte.

Ainsi, ces trois scénarii d'une heure durent en simulation 360s.

Pour chaque production, la valeur limite de puissance réactive est calculée en fonction du point de fonctionnement de puissance active par rapport à la puissance apparente nominale de la PDE (Equation (1) du chapitre III).

IV Comparaison des contrôles de tension local et coordonné

Dans ce paragraphe vont être illustrés les résultats obtenus pour la comparaison des méthodes de contrôle. Trois contrôles vont être comparés.

Le premier est un contrôle en puissance. Chaque PDE est équipé d'un contrôle en P/Q avec une consigne de puissance réactive nulle. Ce cas illustre le comportement du réseau et notamment de la tension face à un tel scénario, sans action sur la puissance réactive de la part des PDE. Le deuxième contrôle est le RAA développé dans le chapitre III. Ce contrôle n'utilise aucune communication et son action est locale. Le dernier contrôle est le RCT présenté dans les paragraphes précédents, celui-ci sera défini comme le contrôle « coordonné ».

IV.1 Simulations et comparaisons pour des cas de faible et moyenne charge

Les premières simulations présentées sont les scénarii à faible ainsi qu'à moyenne charge. Le cas de forte charge sera illustré par la suite. Les Figure V - 6 et 7 illustrent le plan de tension

en tout nœud du réseau pour chaque contrôle, pour un instant représentatif des scénarii. La tension sur chaque départ est repérée ainsi que l'emplacement des PDE.

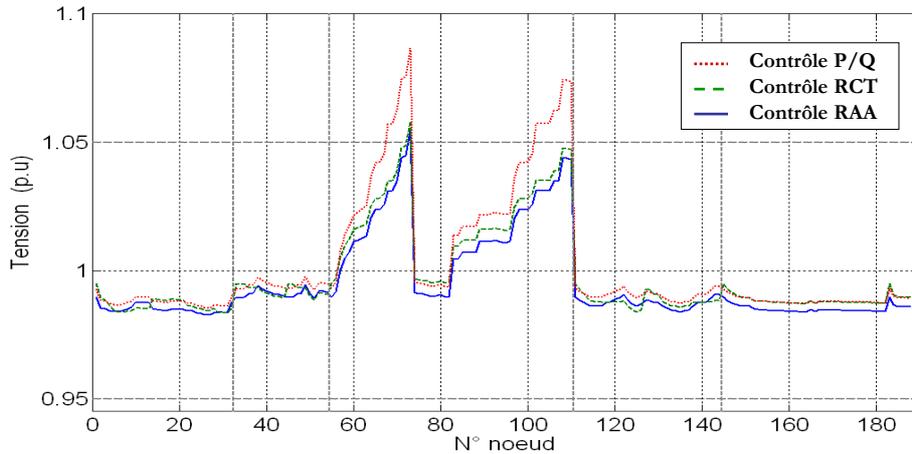


Figure V - 6 : Profil de tension sur le réseau d'étude pour chaque départ à t=185s, à charge faible.

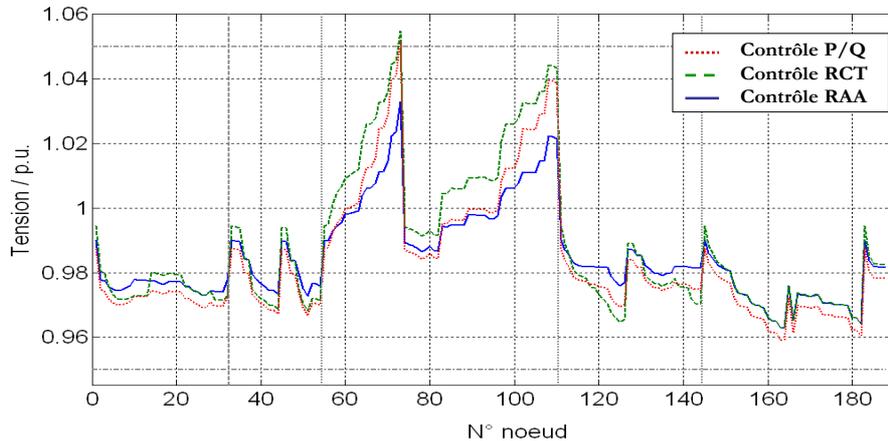


Figure V - 7 : Profil de tension sur le réseau d'étude pour chaque départ à t=185s, à charge moyenne.

La Figure V - 6 et la Figure V - 7 illustrent que, pour les deux configurations de charge illustrées, la contrainte de tension la plus forte se trouve sur le départ accueillant le plus de production, zone 3. En effet, deux PDE y sont connectées, dont une en bout de ligne. Les résultats obtenus avec le contrôle P/Q montrent que les limites admissibles sont largement dépassées si aucune action sur la puissance réactive n'est effectuée.

Dans ce scénario, les tensions critiques pour les contrôles RCT et RAA sont conservées dans la fenêtre d'admissibilité au niveau des PDE sur les Figure V - 12, V - 13, Figure V - 14 et V - 15, pour ces deux cas de charge. La surtension la plus importante, due à la PDE 1 en bout de ligne du départ zone 3 (nœud 73 sur les Figure V - 6 et Figure V - 7), est effacée par les deux contrôles RCT et RAA. Cependant, il est notable qu'en ce nœud la tension sur le réseau HTA dépasse la limite de 1,05 pu pour les deux contrôles. Cette surtension, visible au niveau HTA,

n'est pas mesurée au niveau de la PDE 1 (cf. Figure V - 12 et Figure V - 13). En effet, la forte absorption de puissance réactive de cette unité induit une chute de tension positive au travers du transformateur assurant la connexion entre la PDE et le réseau HTA. Ainsi la tension mesurée coté PDE est inférieure à celle mesurée coté réseau HTA et coté PDE la tension reste en dessous de la tension admissible maximale de 1,05pu.

En règle générale, le plan de tension pour chacun de ces contrôles est proche. Les différences les plus évidentes sont visibles sur le départ avec une forte insertion, donc avec une contrainte plus importante.

Les régulateurs auto adaptatifs fournissent des consignes pour conserver la tension au plus proche de 1 pu. En effet, plus la tension s'approche des valeurs critiques, plus la participation de la production sera conséquente. Au vue des profils de tension, le réglage coordonné conserve une tension haute sur la zone 3 dans le but de respecter au mieux la consigne du point pilote 3 (Figure V - 11).

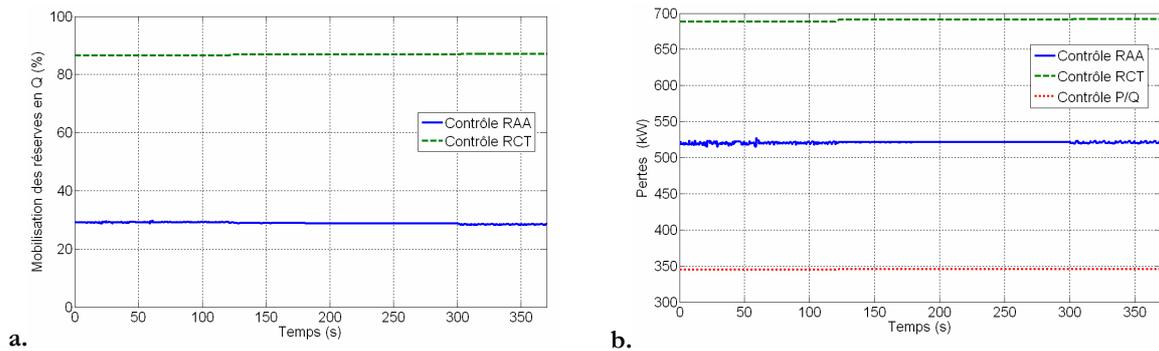


Figure V - 8 : Participation totale en puissance réactive (a) et pertes mesurées sur le réseau (b) pour les contrôles comparés dans le cas d'une faible charge.

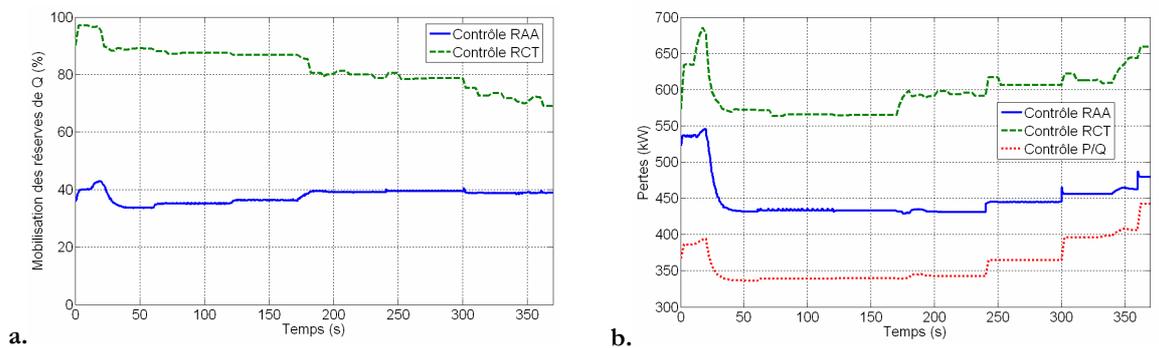


Figure V - 9 : Participation totale en puissance réactive (a) et pertes mesurées sur le réseau (b) pour les contrôles comparés dans le cas d'une charge moyenne.

Le principe du contrôle local est de réguler la tension au point de raccordement à une consigne de tension, définie en fonction de contraintes visibles par la production. Ces consignes

sont recalculées en fonction des évolutions du scénario. Ainsi la participation de chaque PDE est adaptée en « temps réel ». Le contrôle coordonné doit conserver d'une part la tension des productions dans la fenêtre admissible, mais également la tension des points pilotes. Les consignes de ces points sont fixes, ainsi une mobilisation plus importante des PDE est nécessaire pour contrôler la tension en un point électriquement éloigné du moyen de réglage. La mobilisation de puissance réactive, pour la régulation de la tension, de chaque contrôle est visible sur les Figure V - 8.a et Figure V - 9.a. La mobilisation de la puissance réactive est plus importante, dans le cas du contrôle coordonné, pour maintien de la tension aux nœuds pilotes, ceci induisant plus de pertes sur le réseau.

Les pertes tracées dans les Figure V - 8.b et Figure V - 9.b sont calculées en additionnant, à tout instant du scénario, les pertes de chaque tronçon de ligne du réseau HTA. L'action sur la puissance réactive pour réguler la tension induit une circulation de courant réactif supplémentaire et donc des pertes en conséquence. Ainsi, le contrôle coordonné est capable de mobiliser plus de réserve en réactif mais cela peut engendrer plus de pertes. Pour les simulations exposées dans ce chapitre, le RCT est configuré pour fonctionner dans la zone III de la Figure V - 2, d'après les valeurs de tension atteinte au nœud de connexion de la PDE 1. Pour le réglage coordonné l'accent est donc mis, dans la fonction objectif, sur le contrôle de la tension et non sur la minimisation des pertes (cf. Tableau V - 1). Le contrôle P/Q est celui qui induit le moins de pertes, cependant celui-ci n'est pas envisageable puisqu'il ne permet pas de conserver des valeurs de tensions admissibles.

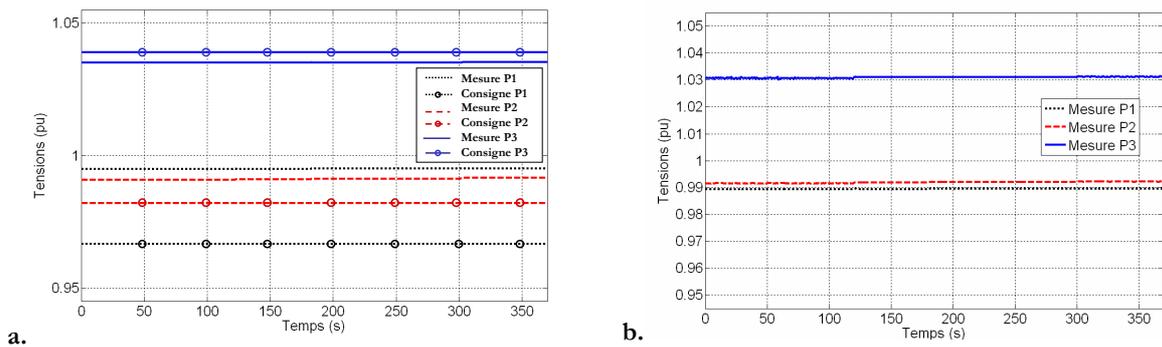


Figure V - 10 : Consignes et tensions mesurées aux points pilotes pour le cas d'une faible charge pour le RCT (a) et pour le RAA (b)

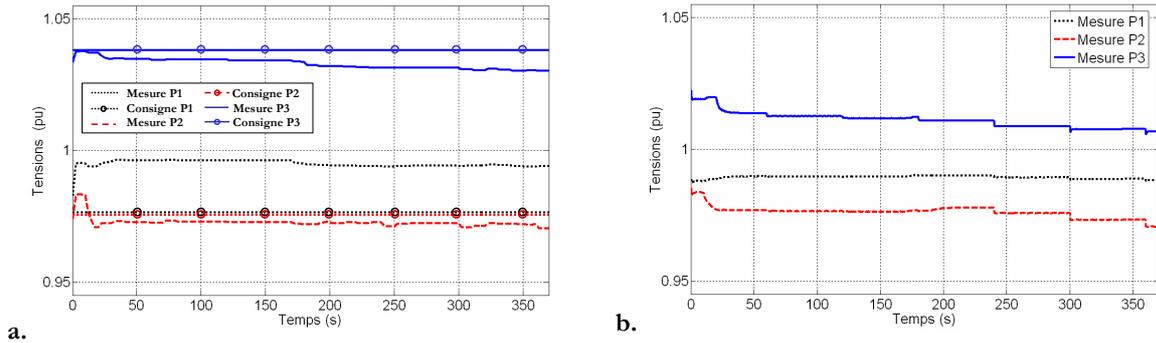


Figure V - 11 : Consignes et tensions mesurées aux points pilotes pour le cas d'une charge moyenne pour le RCT (a) et pour le RAA (b)

Les Figure V - 10 et Figure V - 11 montrent l'évolution de la tension aux points pilotes et la tension en ces mêmes nœuds pour l'approche locale. Il est visible, pour le cas de faible charge, que ces niveaux de tensions sont relativement identiques. Les consignes appliquées à ces points ne sont pas strictement suivies pour le RCT. En effet, les multiples objectifs du contrôle coordonné, font que la tension des points pilotes est proche des consignes mais, pour le respect des autres objectifs, le meilleur compromis est appliqué.

Il est notable que les différences entre les méthodes s'accroissent dans le cas de moyenne charge. En effet, dans le cas du réglage coordonné, la tension au point pilote P3 est maintenue au plus près de la valeur de consigne fixée à 1.038pu. Ceci entraîne une forte production de réactif des PDE 1 et 2 présentes sur le départ. Dans le cas d'un contrôle local, cette tension n'est pas régulée et peut évoluer librement. Ainsi, la participation de la PDE 2 est beaucoup moins importante. D'après ces résultats que la pertinence des consignes des points pilotes est un élément essentiel au bon fonctionnement du contrôle coordonné. Les objectifs de la détermination de la localisation et des consignes des points pilotes, ainsi que des réglages en charge de les appliquer, doivent être compatibles et cohérents.

Les comparaisons des évolutions des tensions et des puissances réactives pour ces deux PDE sont fournies Figure V - 12 et Figure V - 13.

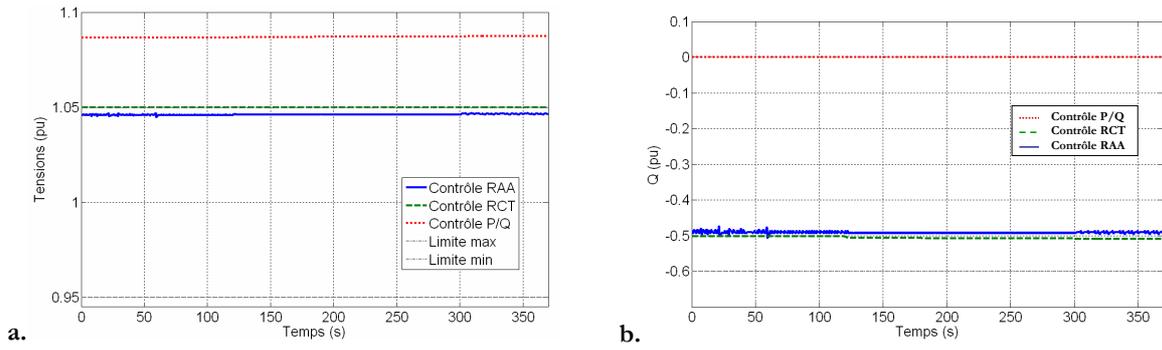


Figure V - 12 : Evolutions des tensions (a) et de la puissance réactive (b) pour la PDE1 dans le cas d'une faible charge

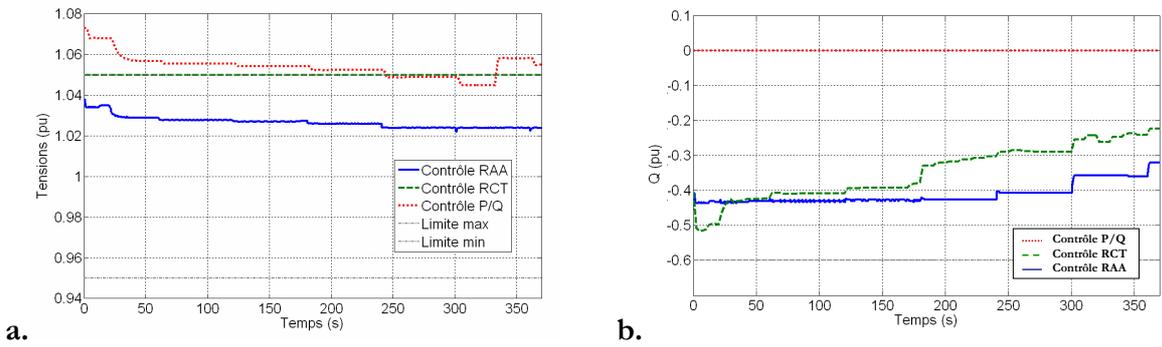


Figure V - 13 : Evolutions des tensions (a) et de la puissance réactive (b) pour la PDE1 dans le cas d'une charge moyenne

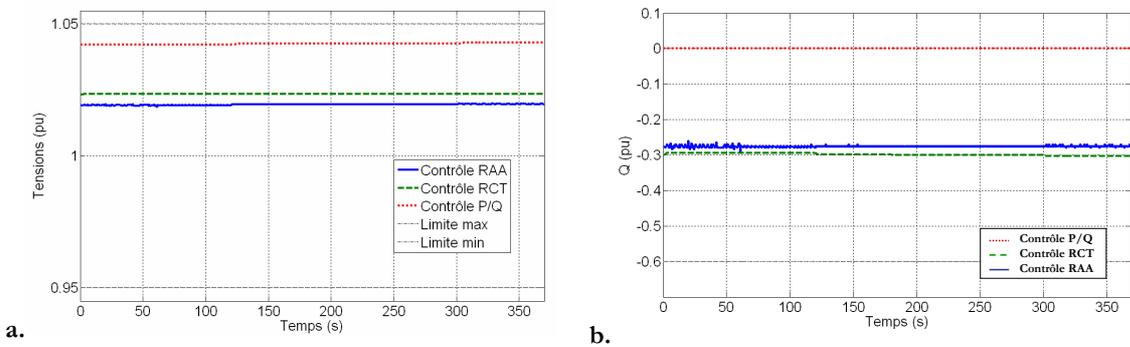


Figure V - 14 : Evolutions des tensions (a) et de la puissance réactive (b) pour la PDE2 dans le cas d'une faible charge

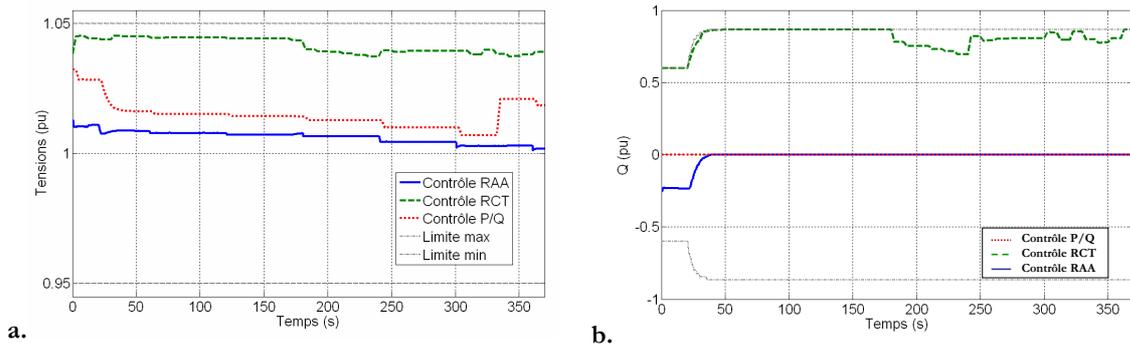


Figure V - 15 : Evolutions des tensions (a) et de la puissance réactive (b) pour la PDE2 dans le cas d'une charge moyenne

IV.2 Simulations et comparaisons pour des cas d'une forte charge

Le dernier scénario envisage une forte charge présente sur le réseau. Cette configuration permet, malgré la production de puissance des PDE, de ne pas atteindre de valeurs critiques en tension. Encore une fois, on peut constater que le contrôle local limite l'écart de tension par rapport à 1 pu.

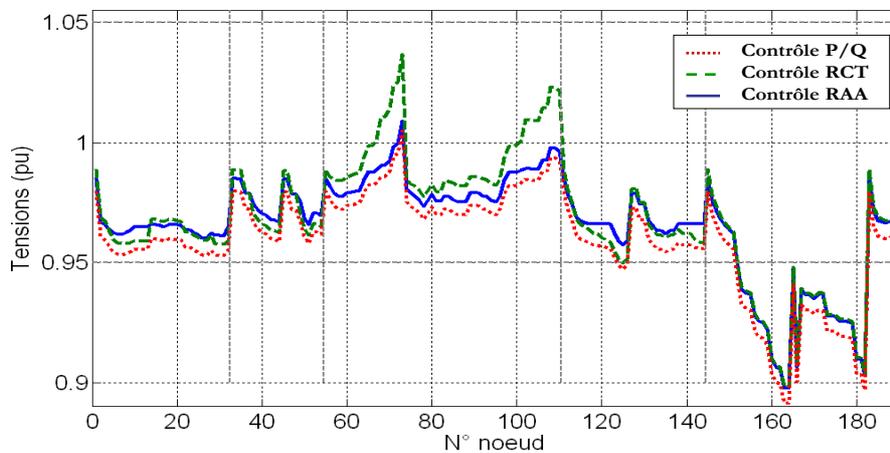


Figure V - 16 : Profile de tension sur le réseau d'étude pour chaque départ à $t=185s$.

Ce scénario met en évidence le fait que quelque soit le mode régulation, les limites en tension ne sont pas respectées pour le départ sans PDE (zone 5 sur la Figure V - 4). En effet, aucun moyen de contrôle n'est présent sur celui-ci. Le contrôle local ne détecte pas ces tensions critiques puisqu'il n'y a pas de forte contrainte sur les autres départs. De plus, pour le contrôle coordonné aucun point pilote ne se trouve sur ce départ. De la même façon, les tensions basses

de la zone 5 sont donc difficilement détectables. Ainsi, pour les deux approches, les tensions sont sensiblement identiques sur ce départ.

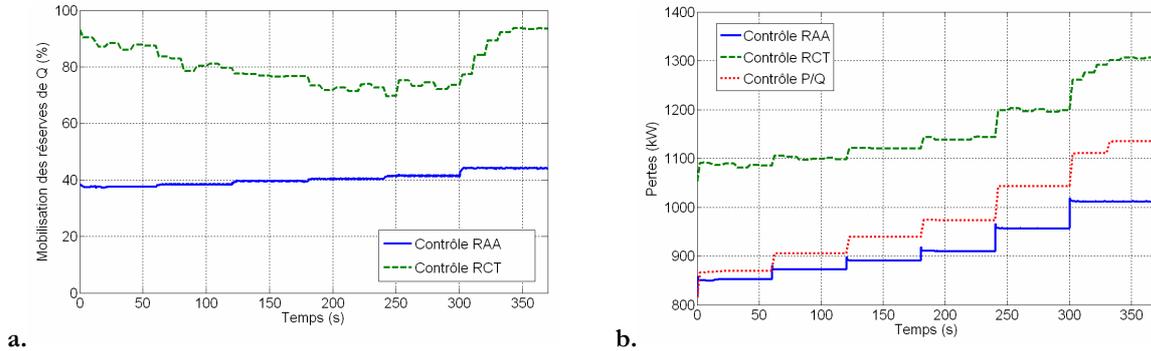


Figure V - 17 : Participation (a) et pertes mesurées sur le réseau (b) pour les contrôles comparés dans le cas d'une forte charge.

De la même façon que précédemment, la mobilisation de puissance réactive due au maintien des consignes des points pilotes, est plus importantes pour le réglage coordonné que pour le réglage local.

La forte charge induit un appel de puissance réactive plus important via le poste source. Or, la production de puissance réactive en aval de celui-ci par les PDE diminue ce transit. Ainsi, dans le cas du RAA ceci est profitable est entraîne des pertes inférieures au cas où les PDE sont régulées en P/Q. Ceci est également le cas pour un réglage coordonné, cependant celui-ci sollicite une production de puissance réactive plus importante et entraîne donc plus de pertes, notamment pour le maintien de la tension au point pilote P3.

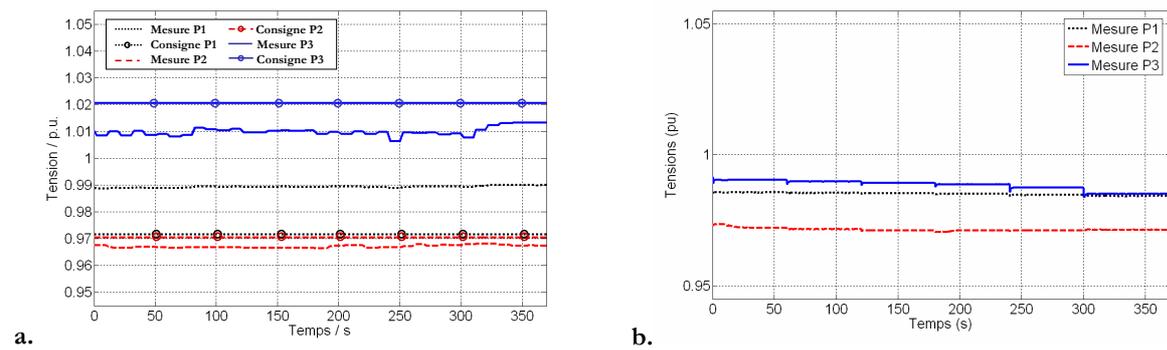


Figure V - 18 : Participation et pertes mesurées sur le réseau pour les contrôles comparés dans le cas d'une forte charge pour le RCT (a) et pour le RAA (b)

Ce scénario de forte charge confirme les conclusions des comparaisons précédentes concernant les pertes induites par les différents contrôles. Le RAA n'ayant pas à contrôler de tension sur des points électriquement éloignés de la production mobilise moins de puissance réactive pour le contrôle de la tension et engendre donc moins de pertes.

V Conclusions

En conclusion, les méthodes comparées sont efficaces du point de vue du contrôle de la tension. En effet, grâce à ces méthodes, il est possible de conserver la tension dans les limites admissibles, sur les départs où il existe au moins un moyen de réglage. Cependant les objectifs de ces contrôles ainsi que les moyens mis à leurs dispositions n'étant pas exactement les mêmes, quelques différences sont notables. Le Tableau V - 3 présente une synthèse de cette analyse en énumérant les avantages et les inconvénients de chaque approche.

Les différences observées sur les simulations sont principalement dues à l'application des tensions de référence aux points pilotes. Ceci demande une participation plus importante des productions. Dans le cas d'un contrôle coordonné, la participation des PDE est calculée et déterminée en fonction de contraintes de tension mesurées en différents points du réseau. Dans le cas du réglage local, la participation de chaque PDE n'est pas calculée de manière optimale et dépend de contraintes mesurées au point de raccordement.

	Contrôle local	Contrôle coordonné
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capable de maintenir la tension dans les limites admissibles. ▪ Pas de communication. ▪ Autonome est directement fonctionnel (pas d'OPF). ▪ Moins de pertes générées ▪ Plus de réserves de puissances réactives disponibles, car pas de point pilote à réguler. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capable de maintenir la tension dans les limites admissibles. ▪ Tension plus observable sur le réseau (points de mesures supplémentaires). ▪ Participation calculée et optimisée des PDE.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun contrôle possible sur le départ sans PDE. ▪ Pas de calcul sur la puissance réactive en vu d'une réduction de pertes. ▪ Participation approximative des productions au contrôle global. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun contrôle possible sur le départ sans PDE. ▪ Efficacité dépendante de calculs optimisés de consignes de points pilotes. ▪ La difficulté de contrôle des tensions au PP peut induire une grande mobilisation des réserves de réactif et des pertes inutiles.

Tableau V - 3 : synthèse des avantages et des inconvénients de chaque méthode

Cependant, d'après les résultats obtenus, que le fait d'envisager le contrôle de tension par une approche locale est plus efficace en terme de pertes sur les scénarii présentés. En effet, la

régulation de tension aux points pilotes force un transit de puissance réactive qui induit des pertes. De plus, les plus grandes surtensions sont obtenues aux points de raccordement des productions, ce sont donc des problèmes locaux et, si les productions sont capables de maintenir la tension en leur point de connexion, il n'y aura plus de surtensions sur la globalité du réseau.

L'utilisation de batteries de condensateur installées au niveau du poste source peut être cependant bénéfique pour les deux méthodes. En effet, le contrôle de l'onde de tension via la puissance réactive induit, le plus souvent, des pertes supplémentaires que ce type d'automate peut être en mesure d'atténuer.

Conclusions

Les travaux menés pendant cette thèse ont aboutis à la proposition d'une solution d'un contrôle intelligent et local, pour le problème de tension sur les réseaux de distribution, lié à la connexion de productions sur celui-ci. Ainsi, ces études ont permis l'identification des PDE et de leurs impacts entrant dans la problématique du contrôle de tension sur les réseaux de distribution. De plus, la modélisation de celles-ci a permis le développement et la mise en situation des contrôles intelligents de tension proposés.

Il a été vu que le réseau de distribution, de par sa structure et les réglages existants, n'est pas dimensionné pour l'accueil de PDE à grande échelle. L'insertion d'un trop fort taux de pénétration induit des problèmes de surtensions qui, en fonction des états de charge du réseau, peuvent entraîner un non respect des valeurs de tensions maximum admissibles. Ainsi, plutôt que d'ajouter des moyens de réglages supplémentaires, le contrôle de tension est réalisé par les PDE. Cependant le réseau de distribution étant à l'heure actuelle, dans sa majorité, non observable et la quantité de PDE connectées au réseau allant croissant, le régulateur réalisé est capable de garantir un contrôle global de la tension sans communication ni coordination extérieur.

Ainsi, un travail de modélisation et de réflexion sur le type de phénomène à mettre en évidence a été fait. Deux types de productions ont été pris en compte lors de ces travaux, à savoir les PDE interfacées au réseau via un onduleur et les productions intégrant un alternateur synchrone. Pour chaque modèle de PDE des contrôles en puissances et en tension ont été développés. Ensuite, un contrôle de tension intelligent, intégrant ces deux modes de régulation de puissances et de tension a été élaboré pour conserver la tension, au point de connexion de la production, dans une fenêtre de tensions limites de consignes. La PDE bascule d'un contrôle en puissance à un contrôle en tension si le niveau de tension devient critique.

Finalement, les simulations menées ont montré que ce type de régulation peut parfois s'avérer insuffisant dans le cas où plus d'une PDE sont connectées. En effet, les contraintes en tension peuvent être mal réparties et certaines PDE peuvent se trouver en limite d'action, alors que d'autres, n'ayant pas de niveau de tension critique visible, ne participent pas ou pas assez au contrôle. Le régulateur auto adaptatif a donc été créé. Ce contrôle est capable de faire participer toutes les PDE présentes sur le réseau de manière intelligente en calculant une fenêtre de consigne de tensions au delà de laquelle la production, équipée de ce contrôle, bascule d'un contrôle de puissance à un contrôle de tension. Ainsi, une coordination, sans communication, entre PDE est effectuée et la participation propre à chaque PDE est fonction des contraintes locales visibles par celles-ci.

Le calcul de cette fenêtre de tensions de consignes est dynamique. Les PDE sont capables de changer leur mode de fonctionnement ainsi que leur participation au réglage de tension en fonction des évolutions de la charge, de la production, des interventions d'autres organes de réglages sur le réseau, etc.

Il est notable, dans les cas illustrés dans ces travaux de thèse, que l'utilisation d'un tel régulateur permet la conservation de la tension du réseau dans les limites admissibles de tension, sans communication entre production et sans calcul d'optimisation. De plus, l'utilisation conjointe de celui avec d'autres organes de réglage est bénéfique et même souhaitable pour le cas d'un banc de condensateur.

Le fait d'envisager le contrôle de tension comme un problème local permet, d'après les scénarii étudiés, de limiter les transits de puissance réactive et, d'induire moins de pertes sur le réseau.

La pertinence des travaux a conduit à breveter le contrôle ainsi développé. De plus les applications pratiques réalisées ont montré qu'il est possible d'implanter ce contrôle sur un système de production réel.

Perspectives

Les travaux concernant la mise en pratique du contrôle auto adaptatif sur un système de production réel peuvent être continués et améliorés. En effet, une suite logique à ces travaux serait de réaliser les simulations hybrides avec l'onduleur utilisé dans le chapitre IV, connecté au simulateur de réseau AreneURT. Ainsi, les scénarii réalisables seraient beaucoup plus proches de ceux étudiés en simulation et une comparaison permettrait de conclure sur la pertinence des résultats.

Cette approche locale de la régulation de tension a été comparée avec un contrôle de tension coordonné, comme il peut exister pour les réseaux de transport. Cependant, une suite à ces travaux est en cours. En effet, il peut être intéressant de définir les limites de chaque contrôle en comparant le taux de pénétration atteignable grâce à ceux-ci, ou encore les conditions à partir desquelles une approche coordonnée est nécessaire. Ces études seront complétées par la suite, par un métissage des contrôles où les deux approches devront cohabiter sur un même réseau de distribution. Ceci pourrait aider à conclure sur les situations les mieux adaptées pour chaque contrôle.

Le régulateur développé est prévu pour un fonctionnement raccordé au réseau et a pour charge de mobiliser une certaine quantité des réserves de réactif de chaque production, via le calcul de consigne de tension. Cette approche, ayant pour seul objectif la sauvegarde de la tension, peut être également pensée pour conserver la fréquence. En effet, dans le cas où le taux de pénétration des PDE est suffisamment important et que la puissance installée en aval d'un poste source est proche de la puissance consommée, un fonctionnement îloté peut être fait grâce à un contrôle adapté. Dans le cas de la perte de l'alimentation par le réseau HTB, les PDE peuvent prendre en charge l'alimentation et le fonctionnement autonome de la zone de réseau isolée. Ainsi, le même principe de contrôle peut être fait pour la fréquence. Des consignes de fréquence peuvent être définies pour conserver ce paramètre dans une fenêtre de $\pm 1\%$ autour de la valeur nominale de 50Hz, en agissant sur la puissance active. Ce contrôle comprendrait deux parties indépendantes. Une première en charge de la régulation de tension via la puissance réactive et une deuxième en charge de la fréquence via la production de puissance active.

Bibliographie

- [ABDE-2001] R.Ben Abdennour, P.Borne, M.Ksouri, F.M'sahli, « Identification et commande numérique des procédés industriels », Editions TECHNIP, 2001.
- [AREN-2002] “A new generation of digital real time power system simulators” Documentation technique, Mars 2002, <http://rdsoft.edf.fr>.
- [Arrêté-2003] Arrêté du 22 avril 2003 modifiant l'arrêté du 17 mars 2003 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'une installation de production d'énergie électrique.
- [Arrêté-1986] Arrêté du 29 mai 1986 relatif aux tensions normales de première catégorie des réseaux de distributions d'énergie électrique.
- [AZMY-2003] A.M.Azmy, I.Erich, “Dynamic simulation of hybrid fuel cell/microturbine integrated into large power systems”, Power Tech 2003, Bologna.
- [BACH-1994] S.Bacha, M.Brunello, A.Hassan, “A general large signal model for DC-DC symmetric switching converters” ; Electric Machines and Power Systems, pp 493-510, Vol 22, Nø 4, Juillet 1994.
- [BARS-2001] S.Barsali, G.Celli, M.Ceraolo, R.Giglioli, P.Pellacchi, F.Pilo, “Operating and planning issues of distribution grids containing diffuse generation” CIRED Juin 2001, Amsterdam.
- [BERS-2006] B.Bersenef, « Evaluation de nouvelles méthodes de réglage de tension dans les réseaux de distribution », Rapport de Master de recherche de l'INPG, Juin 2006.
- [Brevet-2006] T.Tran-Quoc, G.Rami, A.Almeida, N.Hadjsaid, J.C.Kieny, J.C.Sabonadiere, « Méthode et dispositif de régulation pour un dispositif de production décentralisée d'énergie, et installation comportant au moins deux dispositifs de production dotes dudit dispositif de régulation » Brevet d'invention de Schneider Electric, 2006.
- [BUHL-1994] H.Bühler, « Réglage par logique floue », Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.
- [CAIR-2004] R.Caire, « Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, Avril 2004.
- [CALD-2003] R.Caldon, F.Rossetto, R.Turri, “Analysis of dynamic performance of dispersed generation connected through inverter to distribution networks”, CIRED 17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona, 12-15 May 2003.

- [CALD-2005] R.Caldon, S.Spelta, V.Prandoni, R.Turri « Co-ordinated voltage regulation in distribution networks with embedded generation », CIRED, June 2005.
- [CANA-2000] J.F.Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans le réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, Décembre 2000.
- [CHEV-1998] F.Chevrie, F.Guély, « La logique floue » cahier technique de Schneider Electric N°191
- [CRAP-1-2003], B.Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermes sciences, 2003.
- [CRAP-2-2003], B.Crappe, « Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques », Hermes sciences, 2003.
- [DEVA-1998] O.Devaux, L.Levacher, O.Huet, “An advanced and powerful real-time digital transient network analyser”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, pp. 421-426, April 1998.
- [Directive-2001] Directive 2001/77/CE du parlement européen et du conseil relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité du 27 septembre 2001.
- [DISP-2003] C.Materazzi-Wagner, “Long Term Perspectives for DG in Europe”, European project dispower, Deliverable 2003_0024.
- [EDF-2001] Brevet d'invention français, « Procédé et installation de régulation de la tension d'un dispositif décentralisé de production d'énergie électrique raccordé à un réseau de distribution » FR 2 823 381, 2001.
- [EKEL-1999] P.Y.Ekel, L.D.B.Terra, M.F.D.Junges, F.J.A.Oliviera, R.Kowaltschuk, T.Y.Taguti, “Fuzzy logic in voltage and reactive power control in power systems”, in Proc. 1999 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 622-6627.
- [EKEL-2001] P.Y.Ekel, L.D.B.Terra, M.F.D.Junges, F.J.A.Oliviera, A.Melek, T.Y.Taguti, “Fuzzy logic in voltage and reactive power control in regulated and deregulated environmeents”, 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition.
- [ERD-2005] « Etat des demandes de raccordement au réseau public de distribution », www.grd.edf.fr.
- [EURO-2003] EUROSTAG 4.2, Guide d'utilisation, EdF - Tractebel, 2003.

- [ETXE-2003] I.Etxeberria-Otadui, « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – Application à la qualité de l'énergie », Thèse de doctorat de l'INPG, Septembre 2003.
- [FOOT-2001] C.E.T.Foote, G.W.Hault, G.M.Burt, J.R.McDonald, “Enhancing Flexibility and Transparency in the Connection of Dispersed Generation”, CIRED 2001, June 2001
- [GOMB-1-2005] C.Gombert, S.Bacha, D.Roye, Y.Bésanger, F.Blache, R.Chareille, « Simulation numérique temps-réel de systèmes à base d'électronique de puissance, Test en temps-réel de contrôles-commandes MLI », Revue Internationale de Génie Electrique (RIGE), 2005.
- [GOMB-2-2005] C.Gombert, « Simulation temps réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique » Thèse de doctorat de l'INPG, Septembre 2005.
- [HAAN-1996] S.W.H.de Haan, “Power electronics for renewable energy systems: state of the art, trends and challenges”, PEMC'96, vol. 3, p. 31-38, 1996.
- [HAUT-1997] J.P Hautier, J.P Caron, « Systemes Automatiques, Tome 2, Commande des processus », edition ellipses, 1997.
- [HINA-2002] A.Al-Hinai, A.Feliachi, “Dynamic Model of a Microturbine Used as a Distributed Generator”, Proc. Southeastern Symp. on System Theory, pp. 209-213, Huntsville, AL, March 18-19, 2002.
- [HINA-2005] D.Hinaux “Validation des régulateurs intelligents de tension pour les productions décentralisées d'énergie », Master de recherche de l'INPG, 2005.
- [IEEE-2003] IEEE Standards Coordinating Committee 21 (IEEE SCC21); “IEEE 1547 Standard for interconnected distributed resources with electric power system”, 2003.
- [JENK-2000] N.Jenkins, D.Kirschen, G.Strbac, R.Allan, P.Crossley, “Embedded Generation”, London, The Institution of Electrical Engineers, 2000, ISBN 0-85296-774-8.
- [KIM-1999] Y.H.Kim, S.S.Kim, “An Electrical Modeling and Fuzzy Logic Control of a Fuel Cell Generation System”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 14, No.2, June 1999.
- [KIPR-2003] A.E.Kiprakis, A.R.Wallace, “Hybrid control of distributed generation of distributed generators connected to weak rural networks to mitigate voltage variation”, CIRED, May 2003, Barcelone.
- [LASS-1998] R. H. Lasseter, “Control of distributed resources”, Symp. Proc., Bulk-Power Power Systems Dynamics and Control IV Restructuring, 323-329, Santorini (Grecia), 24-28 Aug 1998.

- [LASS-2000] R.Laseter, P.Piagi, “providing premium power through distributed resources” Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [LASS-2001] R.Laseter, “Dynamic models for microturbines and fuel cells”, IEEE power engineering Society, 2001 summer meeting.
- [LAVE-2005] N.Laverdure, “Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”, Thèse de doctorat de l’INPG, 2005.
- [LEME-1999] P.Lemerle, D.Cortinas, S.Vittet, J.L.Meyer, J.L.Fraisse, “Connection of Embedded Generation to LV Network”, CIRED 99, June 1999.
- [MARE-2002] M. I. Marei, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, “Flexible Distributed Generation: (FDG)”, IEEE PES Summer Meeting, Chicago 21-25 June 2002.
- [MOMO-1995] J.Momoh, X.Ma, K.Tomsovic, “Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No. 3, Aug. 1995, pp. 1676-1690.
- [NF 50160] Norme française, “Caractéristique de la tension fournie par les réseaux publics de distribution », Mai 2000.
- [OCNA-2005] D.Ocnasu, « Connexion à ARENE temps-réel d'un banc expérimental dédié à la génération éolienne », Master de recherche de l’INPG, 2005.
- [PATE-2005] A.V.Patel, “Simplest Fuzzy Controllers under Various Defuzzification Methods”, International journal of computational cognition, vol. 3,No. 1, 21-32.
- [RAMI-1-2004] G.Rami, T.Tran Quoc, N.Hadjsaid, “Energy supply for the base transceiver stations of telecommunication”, PES IEEE General Meeting, 2004.
- [RAMI-2-2004] G.Rami, “Modélisations des systèmes de productions décentralisées”, Note Technique du GIE IDEA, Décembre 2004.
- [RAMI-1-2005] G.Rami; T.Tran-Quoc, N.Hadjsaid, 2005, "Fuzzy logic supervision and control of distributed generators", CIRED 2005, Turin.
- [RAMI-2-2005] G.Rami, “Etude prospective pour le développement du régulateur auto adaptatif », Note technique du GIE IDEA, Février 2005.
- [RAMI-1-2006] G.Rami, G.Verneau, L.Bernard, T.Tran-Quoc, N.Hadjsaid, « Régulations de générations d’énergie dispersées connectées au réseau de distribution », RIGE, 2006

- [RAMI-2-2006] G.Rami, « Etude du comportement du régulateur auto adaptatif sur perturbations reseau » Note technique du GIE IDEA, Janvier 2006.
- [RICH-1-2006] O.Richardot, A.Viciu, Y.Besanger, N.Hadjsaid, J.C.Kieny, “Coordinated voltage controle in distribution networks using distributed generation”, IEEE PES, 2006
- [RICH-2-2006] O.Richardot, « Réglage Coordonnée de tension dans les réseaux de distribution à l’aide de la Production Décentralisée », Thèse de doctorat de l’INPG, Octobre 2006.
- [RTE-2004].RTE, « Mémento de la sûreté du système électrique », 2004
- [RUBA.2004] A.Rubaai, A.R.Ofoli, “Multilayer Fuzzy Controller for Control of Power Networks”, IEEE transactions on industry applications, vol. 40, 1521-1528, 2004.
- [TOMS-1993] K.Tomsovic, “Current Status of Fuzzy Set Theory Applications to Power Systems,” Transactions of the IEE Japan, Vol. 113-B, No. 1, pp. 2-6, 1993.
- [TRAN-2003] T.Tran-Quoc, C.Andrieu, N.Hadjsaid, “Technical impacts of small distributed generation units on LV networks”, IEEE General Meeting 2003, Canada, June 2003.
- [TRAN-2004] T.Tran-Quoc, N.Hadjsaid, G.Rami, L.Le-Thanh, L.Bernard, G.Verneau, J.L.Mertz, C.Corenwinder, P.Michalak, M.Boll “Dynamic analysis of an insulated distribution network ”, IEEE/PSCE, New York 2004.
- [VALE-2004] I.Valero, "Interfaçage et contrôle commande de piles à combustible pour applications stationnaires et transport", Thèse de doctorat de l’INPG, Décembre 2004.
- [VOVO-2005] P.N.Vovos, A.E.Kiprakis,G.P.Harrison, J.R.Barrie, “Enhancement of network capacity by widespread intelligent generator control”, CIRED, Juin 2005, Turin.
- [WALL-2001] S.Wall, “Performance of Inverter Interfaced Distributed Generation”, IEEE/PES T&D Conference and Exposition 2001, vol. 2.

Annexes

Annexe I

Le mode BATCH

Les simulations menées ont été, en majeure partie, réalisées à l'aide d'une utilisation conjointe d'Eurostag et de Matlab. En effet, Eurostag est un logiciel dédié réseau avec une bibliothèque de blocs fonctionnels permettant de réaliser les macroblocs associés aux contrôles désirés [EURO-2003]. Cependant il n'est pas possible d'importer ou de créer ces blocs fonctionnels. Ainsi, notre régulateur étant réalisé sous la forme d'un code en langage C et d'un langage M (langage Matlab), il n'est pas possible de l'intégrer directement sous l'environnement Eurostag. De plus, étant donné la taille des réseaux ainsi que les durées de simulations envisagées, la réalisation de celles-ci devient très difficile par le biais de Matlab/Simulink et la Toolbox Power System Bloc.

Nous nous sommes donc servi, d'Eurostag pour simuler le réseau et les PDE contrôlés avec un régulateur adaptatif et, de Matlab pour calculer et fournir à Eurostag les consignes de tension désirées grâce à l'algorithme flou.

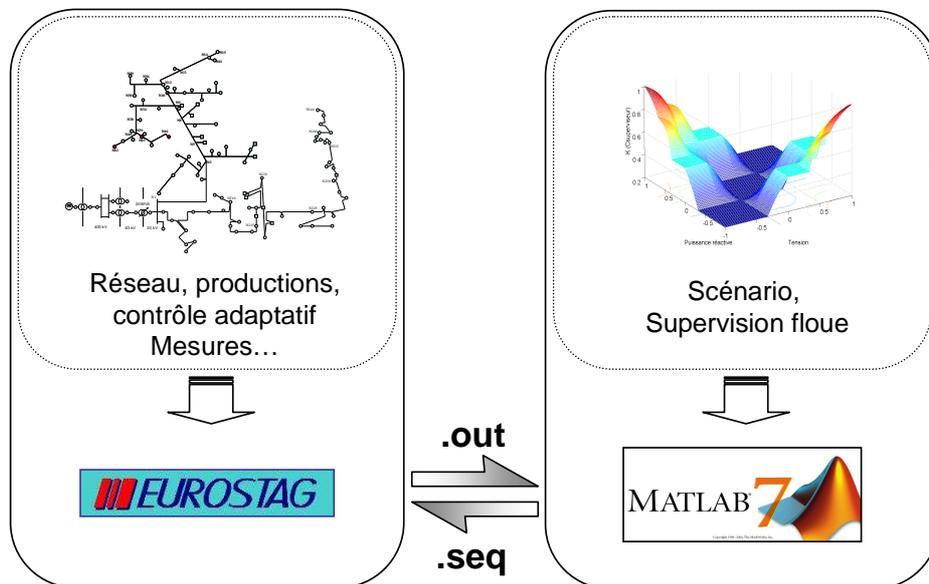


Figure 1 : fonctionnement du mode Batch.

Eurostag permet la fonctionnalité illustrée Figure 1. En effet, il est possible grâce à un mode spécifique dit mode « Batch », de stopper la simulation en enregistrant l'état global du réseau et des contrôles. Cet état est visible par Matlab (via le fichier de mesures *.out*) qui traitent ces valeurs pour calculer l'évolution des consignes désirées de tension. Ces consignes sont ensuite

écrites dans Eurostag et donc transférées aux contrôles des productions (via le fichier de scénario *.seq*). A partir de là, une autre simulation Eurostag est lancée et ainsi de suite.

La fréquence d'interruption d'Eurostag est un paramètre configurable. Dans nos simulations nous avons pris un pas de temps de 100ms. Ce pas de temps très petit induit des simulations assez longues (3h pour 250s). Cependant, celui-ci est nécessaire pour retranscrire l'adaptation dynamique des consignes en fonction du scénario de la manière la plus réaliste possible.

Annexe II

Détail des simulations du chapitre III

Les simulations illustrées dans le chapitre trois, ont été présentées de manière à ne pas surcharger le texte de courbes et à expliquer les résultats de manière concise. Cette annexe permet d'avoir l'évolution du comportement de chaque PDE en fonction du scénario proposé dans le cas d'un contrôle auto adaptatif. Ainsi pour toutes les productions sont présentées :

- Les consignes désirées calculées par le superviseur flou.
- La tension mesurée au point de connexion de la PDE considérée.
- La puissance réactive produite ou absorbée.

Ceci rend compte de la réaction de chaque PDE contrôlée avec le régulateur auto adaptatif.

I Simulation sur le réseau BT 14 nœuds.

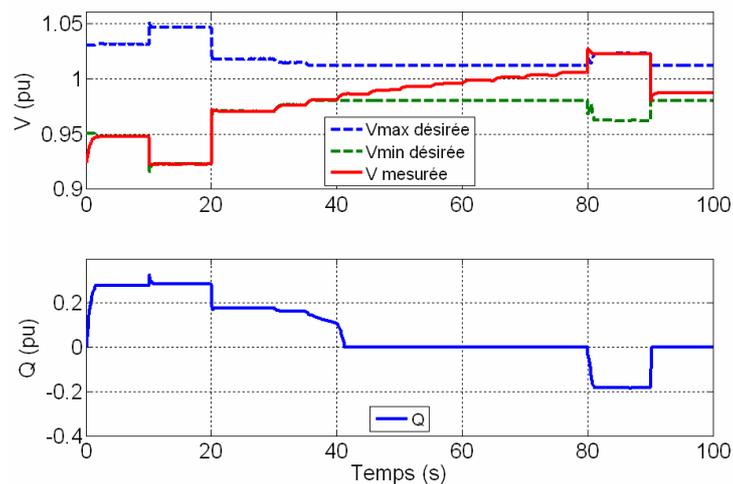


Figure 1 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N3 au scénario

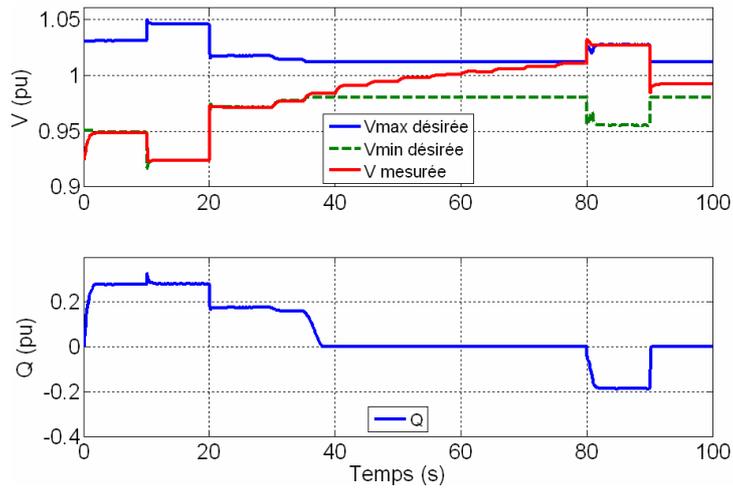


Figure 2 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N4 au scénario

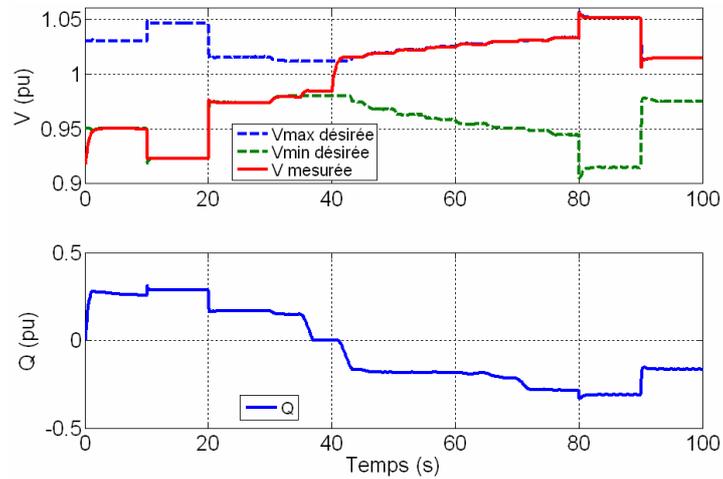


Figure 3 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N5 au scénario

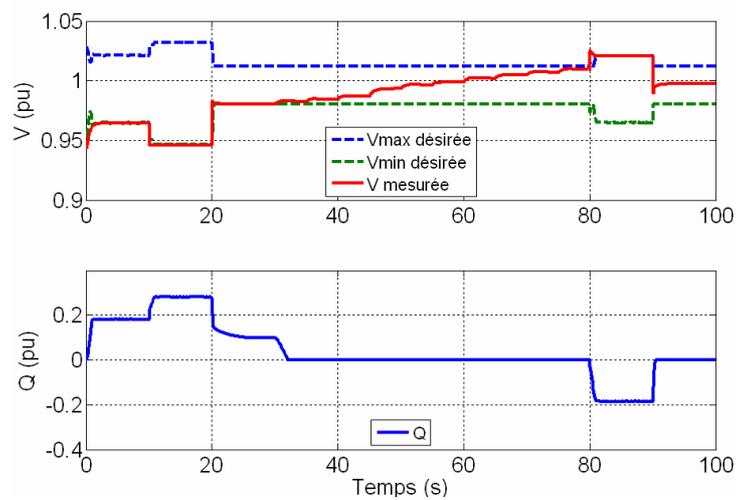


Figure 4 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N6 au scénario

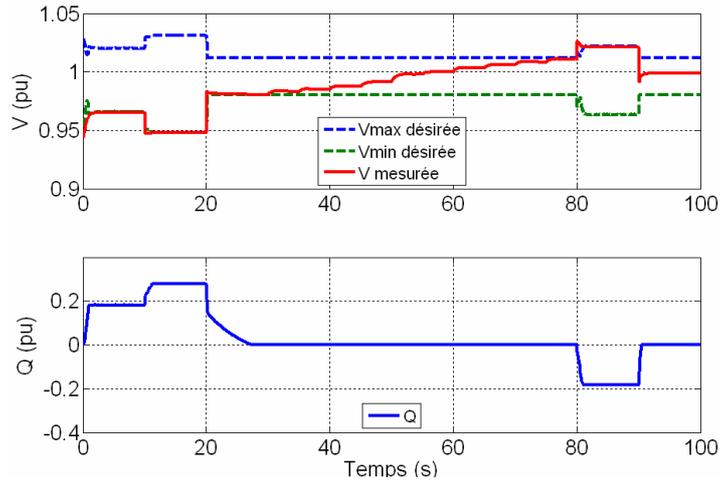


Figure 5 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N7 au scénario

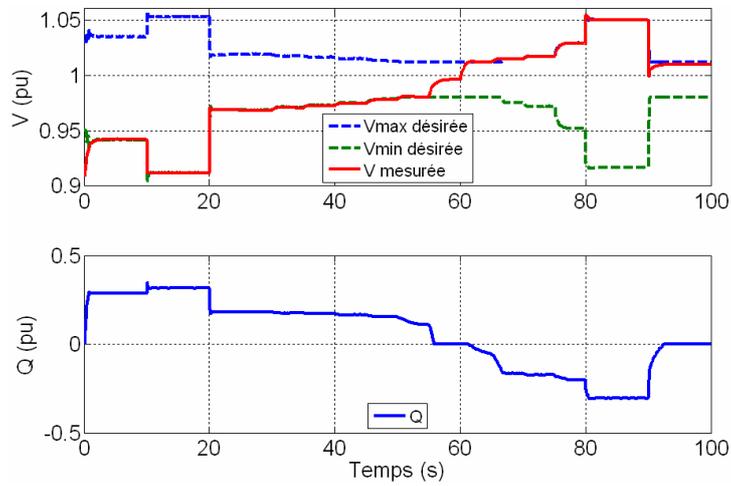


Figure 6 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N10 au scénario

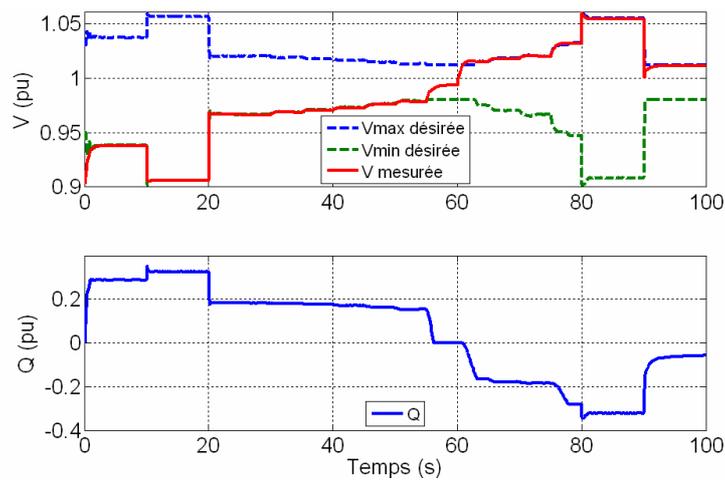


Figure 7 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N11 au scénario

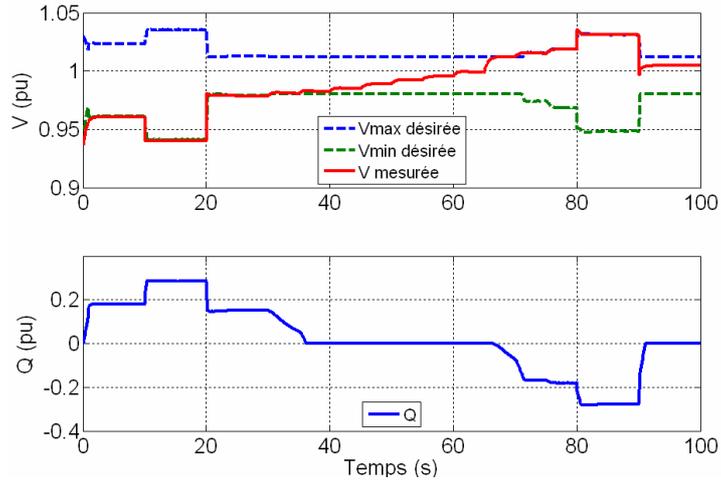


Figure 8 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N12 au scénario

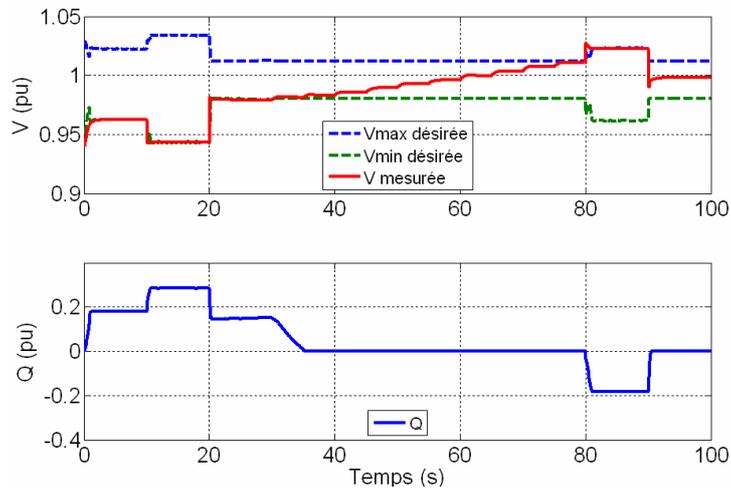


Figure 9 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N13 au scénario

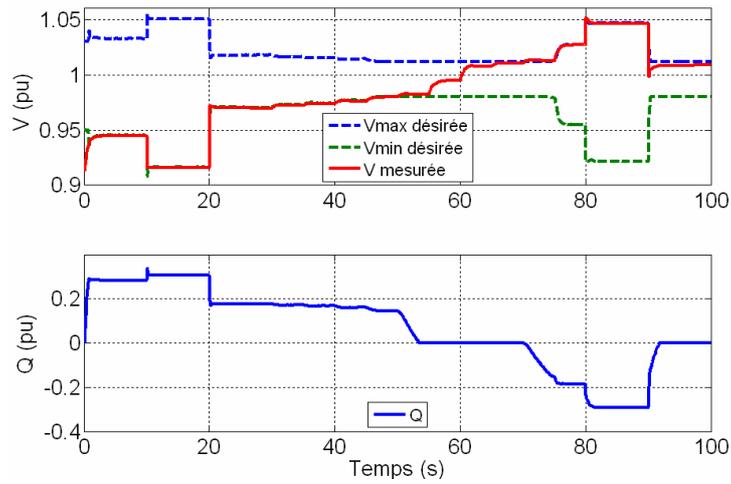


Figure 10 : Réaction des tensions et de la puissance réactive de la PDE N14 au scénario

Annexe III

Réseaux utilisés lors des simulations

Il y a trois principaux réseaux utilisés lors cette thèse. Un premier réseau BT puis deux autres en HTA. Cette annexe présente leurs caractéristiques.

I Réseau rural BT

Ce réseau est un réseau français de type rural. Sa structure est radiale et les caractéristiques relatives au poste source ainsi qu'à la charge globale sont données dans les tableaux suivants.

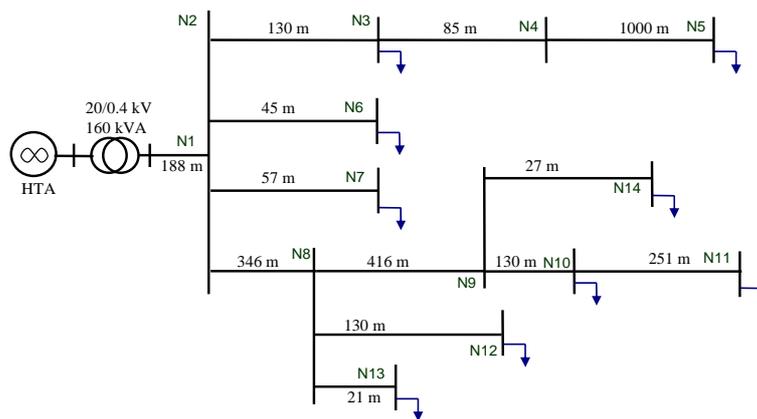


Figure 1 : réseau BT de type rurale utilisée dans la thèse

Puissance apparente totale du départ (kVA)	94,1
Tangente phi global des charges	0,4
Longueur du chemin le plus long (m)	1403
Longueur totale du départ (m)	2514

Tableau 1 : Caractéristique du réseau BT

Le poste source utilisé est modélisé comme suit :

Puissance apparente (kVA)	160
$R_{\text{équivalent}}$ (Ohm)	36,71875

$X_{\text{équivalent}}$ (Ohm)	93,01469
-------------------------------	----------

Tableau 2 : Caractéristique du poste source

II Réseaux HTA

Les réseaux présentés sont des départs de réseaux de distribution d'étude du GIE IDEA fournis par EDF. Ceci sont intéressant de part leur nature : rurale ou urbaine, souterraine ou aérienne.

II.1 Départ rural

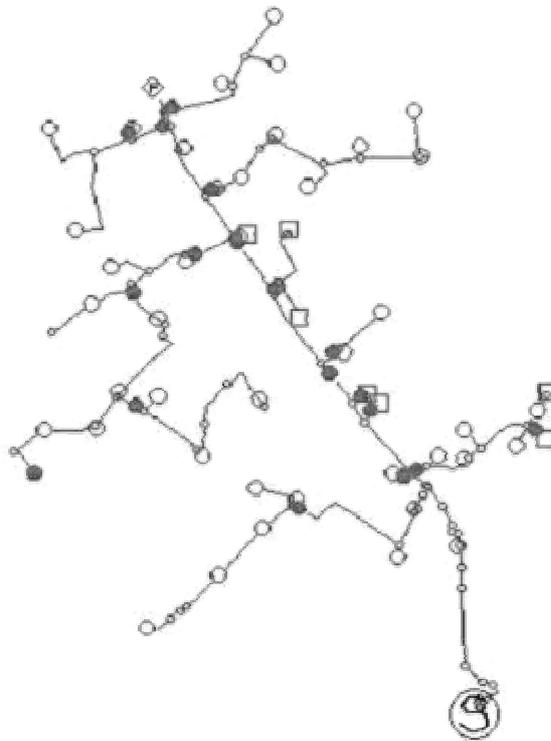


Figure 2 : Représentation géographique du départ de type rurale utilisé

Capacitif du départ (3 Io en A) (sous 20 kV)	11.39
Nb clients BT	449
Nb. clients HTA	7
Puissance apparente totale du départ (kVA)	1143
Chute de tension max (%)	0.265
Icc biphasé min. (A)	1777
Proportion de câble souterrain (% de la longueur totale)	14.78
Longueur du chemin le plus long (km)	8.8
Longueur totale du départ (km)	27.6
Nb. d'organes de coupure télécommandés (dont Nb. DRR)	2 (0)

Tableau 3 : caractéristique générale du départ considéré

II.2 Départ urbain

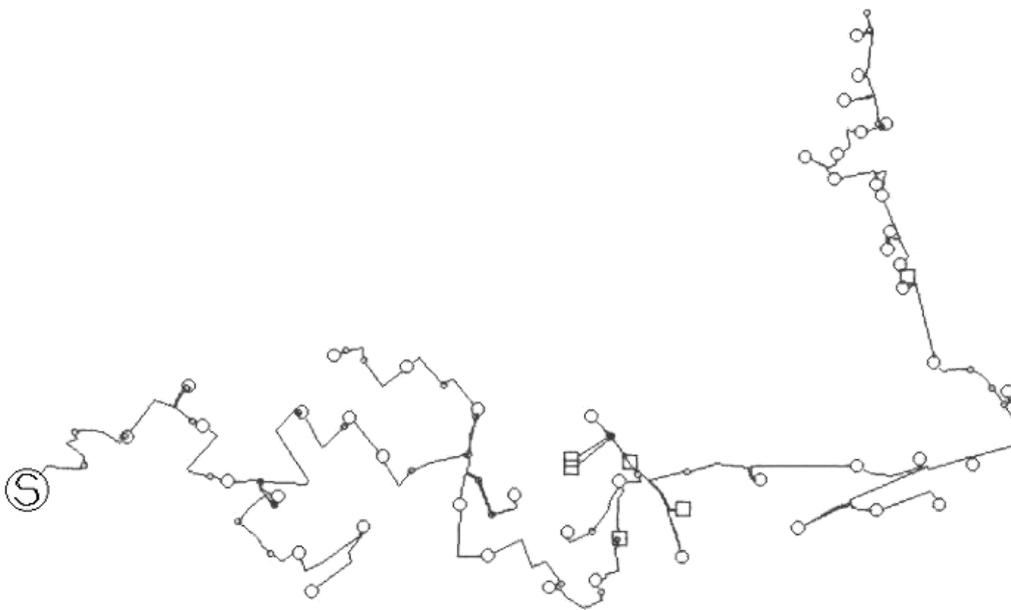


Figure 3 : Représentation géographique du départ de type urbain utilisé

Capacitif du départ (3 Io en A) (sous 20 kV)	37.2
Nb clients BT	5587
Nb. clients HTA	6
Puissance apparente totale du départ (kVA)	4509
Chute de tension max (%)	1.32
Icc biphasé min. (A)	2251
Proportion de câble souterrain (% de la longueur totale)	100

Longueur du chemin le plus long (km)	12.29
Longueur totale du départ (km)	15.65
Nb. d'organes de coupure télécommandés (dont Nb. DRR)	5 (0)

Tableau 4 : caractéristique générale du départ considéré

Les simulations du chapitre IV illustrent le fonctionnement du régulateur auto adaptatif sur un réseau de distribution intégrant ces deux départs HTA. Ce réseau est alimenté via un poste source de 20MVA. La Figure 4 illustre cette configuration.

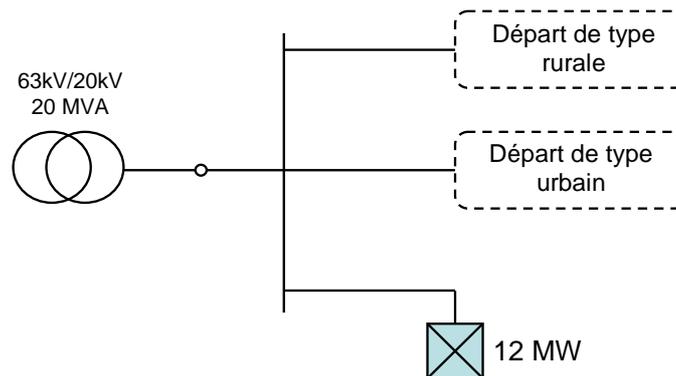


Figure 4 : Configuration du réseau de distribution utilisé dans le chapitre IV

Puissance apparente	20 MVA
Tension primaire	63 kV
Tension secondaire	20 kV
Perte fer	18 kW
Perte Joule	125 kW
$R_{\text{equivalent}}$	0,125 Ohm
$X_{\text{equivalent}}$	2,4 Ohm

Tableau 5 : caractéristique du poste source utilisé pour les réseaux HTA

II.3 Les réseaux tests utilisés pour la simulation temps réel

Deux réseaux ont été modélisés et utilisés lors de ces simulations. Le premier pour tester les régulations de type P/Q et P/V, le second pour le régulateur adaptatif. La principale différence entre ces deux réseaux étant la charge connectée à ceux-ci.

II.4 Réseau test des contrôles P/Q et P/V

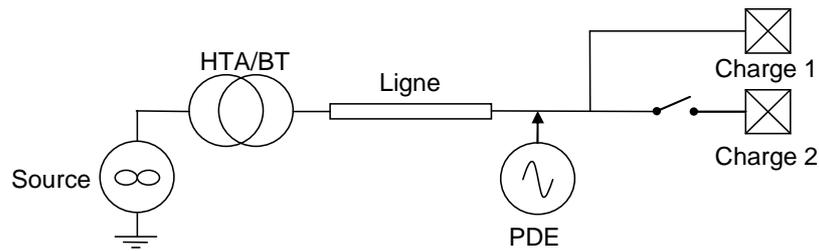


Figure 5 : Représentation du réseau test utilisé lors d'essais des contrôles P/Q et P/V.

Source	U = 0.38 kV		Fréquence = 50 Hz
Transformateur	R = 0.0147 Ω		L = 0.1184 mH
Ligne	Longueur = 1km	R = 0.1074 Ω	L = 0.395 mH
Charge 1	R = 2.0513 Ω	L = 0.1306 mH	
Charge 2	R = 1.5 Ω	L = 0.04 mH	
P _{GED}	P _n = 90 kW		
Q _{GED}	Q _n = \pm 45 kVAR (\pm 1/2.P _n)		

Tableau 6 : caractéristique du réseau test

II.5 Réseau test du contrôle adaptatif

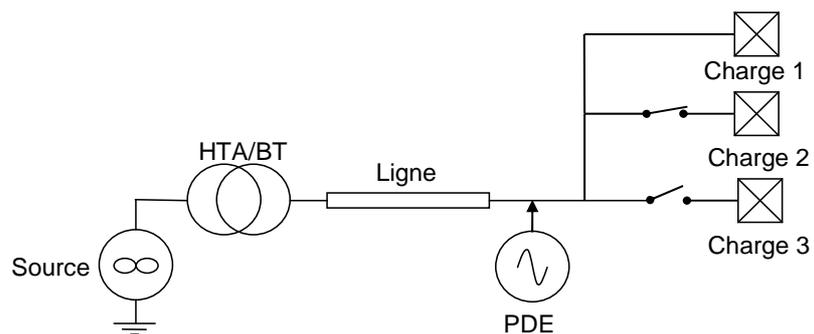


Figure 6 : Réseau test pour le contrôle adaptatif

Source	U = 0.38 kV		Fréquence = 50 Hz
Transformateur	R = 0.0147 Ω		L = 0.1184 mH
Ligne	Longueur = 1km	R = 0.1074 Ω	L = 0.395 mH

Charge 1	$R = 10.2565 \Omega$	$L = 0.653 \text{ mH}$
Charge 2	$R = 2.5641 \Omega$	$L = 0.1632 \text{ mH}$
Charge 3	$R = 1.5 \Omega$	$L = 0.004 \text{ mH}$
P_{GED}	$P_n = 90 \text{ kW}$	
Q_{GED}	$Q_n = \pm 45 \text{ kVAR } (\pm 1/2.P_n)$	

Tableau 7 : caractéristique du réseau test

Annexe IV

I Comparaison des méthodes d'inférence.

Cette annexe présente les méthodes les plus classiques permettant la construction d'une supervision à l'aide de la logique floue. Ainsi, la méthode de construction d'un superviseur ne va pas être réexpliquée puisque ceci a été abordé dans le chapitre III. Cependant, différentes méthodes d'inférence et de défuzzification vont être réalisées puis comparées.

L'inférence est une étape essentielle dans la création d'une supervision floue puisque c'est ici qu'est définie la réaction de la sortie par rapport aux évolutions des entrées. Les trois méthodes d'inférences les plus utilisées sont :

- MAX-MIN
- MAX-PROD
- SOM-PROD

Ces trois méthodes vont être expliquées puis illustrées sur notre application de superviseur de tension. Ainsi, il sera possible de visualiser et de comparer l'évolution de la sortie du superviseur pour toutes les définitions possibles des entrées.

Pour faciliter la compréhension du mécanisme de chaque méthode, celles-ci seront illustrées sur un cas simple avec deux variables d'entrées et une variable de sortie chacune définie par 3 ensembles flous comme le montre la figure suivante :

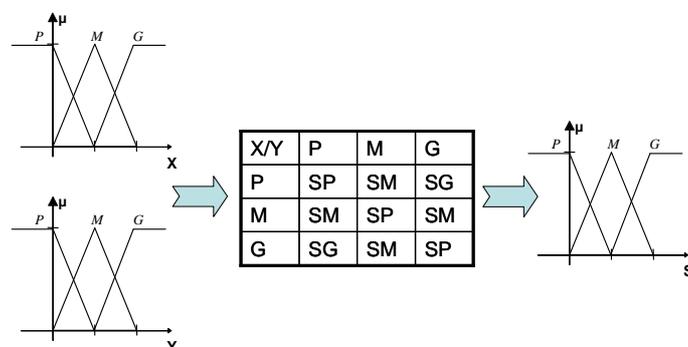


Figure 1 : Configuration choisie pour l'explication de chaque méthode

I.1 La méthode MAX-MIN

I.1.a Définition

La première méthode d'inférence est la méthode MAX-MIN. Celle-ci est certainement la plus facile des trois méthodes étudiées à mettre en œuvre. En effet, d'après la Figure 1 l'appartenance de la sortie S à l'ensemble flou SG peut être définie comme suit :

Si X est P et Y est M

OU Si X est M et Y est P

ALORS S est SM

Par cette méthode l'opérateur OU est définie par la fonction Maximum et l'opérateur ALORS par la fonction Minimum. Ainsi cette expression est interprétée par la méthode d'inférence de la manière suivante :

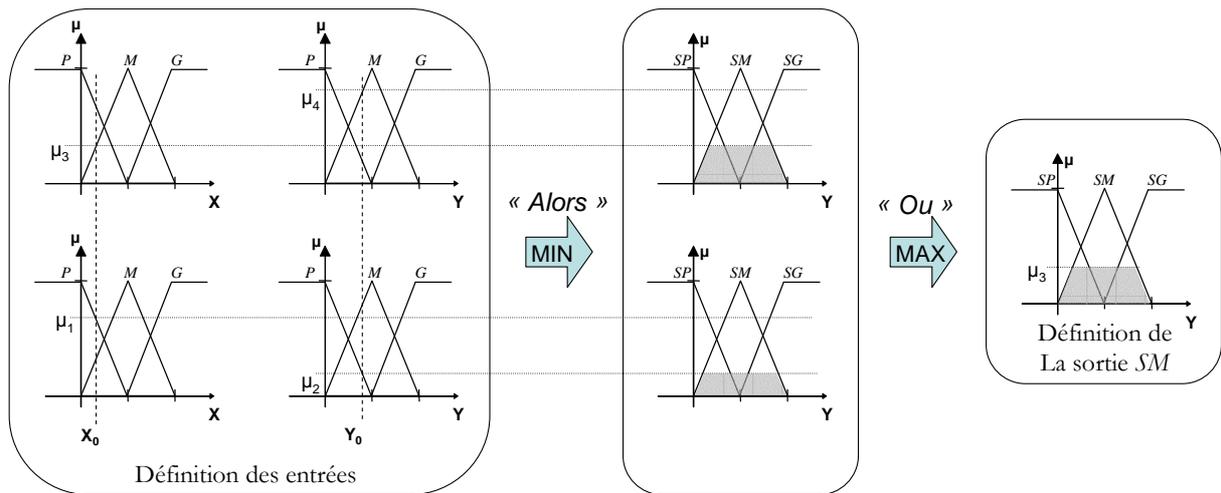


Figure 2 : Fonctionnement de la méthode MIN-MAX

La généralisation de cette méthode, à toute la table d'inférence, donne le raisonnement suivant :

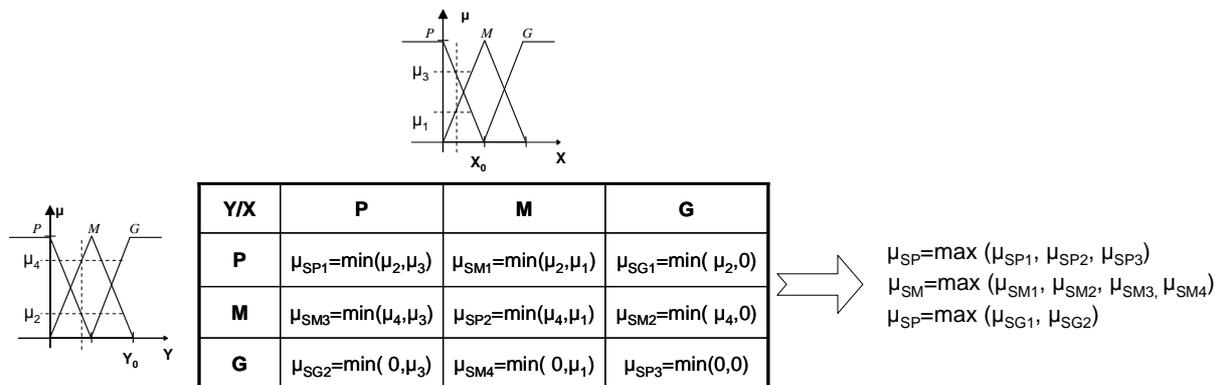


Figure 3 : Généralisation de la méthode à toutes les fonctions d'appartenance

I.1.b Application de la méthode MAX-MIN à la réalisation du superviseur de tension désirée

Pour comparer cette méthode aux autres, nous fixons la manière de réaliser la fuzzification ainsi que la défuzzification. La fuzzification est réalisée à l'aide de 7 fonctions d'appartenance triangulaires, pour chaque variable. La défuzzification elle, est réalisée à l'aide de la méthode du barycentre des maxima.

Ainsi, la Figure 4 est une représentation tridimensionnelle de l'état de la sortie en fonction des définitions possibles des entrées.

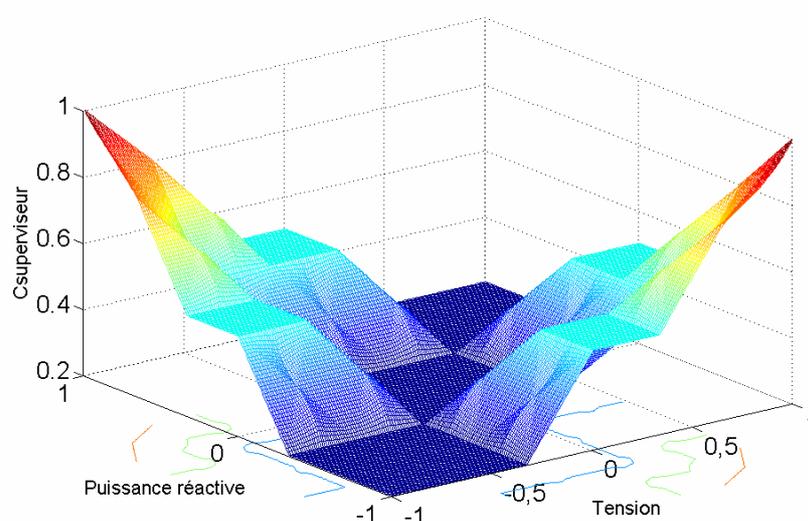


Figure 4 : Représentation tridimensionnelle de l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction des entrées du superviseur par la méthode MAX-MIN

La méthode MAX-MIN est très simple à mettre en œuvre cependant celle-ci donne des résultats moins nuancés dans les changements d'états de $C_{\text{superviseur}}$. En effet, il est visible sur la Figure 4 que les transitions entre les quatre niveaux de définitions de la sortie du superviseur sont nettes et peuvent conduire à une légère instabilité de réponse si le point de fonctionnement se trouve sur une arête.

I.2 La méthode MAX-PROD

I.2.a Définition

De la même façon que pour la méthode MAX-MIN si nous prenons la définition de la fonction d'appartenance SM de la sortie S (Figure 1), à savoir :

Si X est P et Y est M

OU Si X est M et Y est P

ALORS S est SM

Alors, pour cette méthode l'opérateur *OU* est définie par la fonction Maximum et l'opérateur *ALORS* par la fonction Produit. Ainsi, la Figure 5 montre les mécanismes de cette méthode :

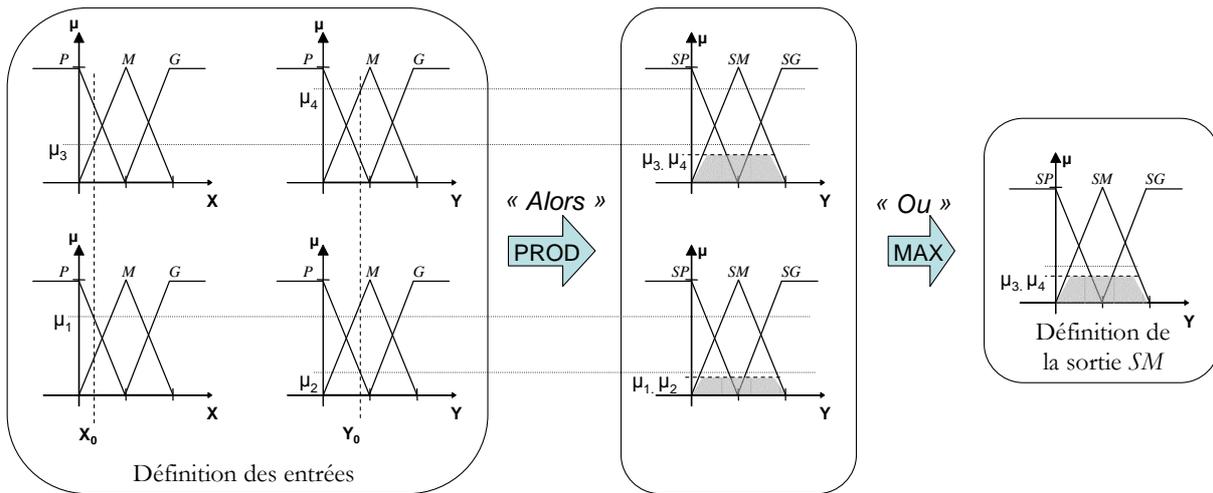


Figure 5 : Fonctionnement de la méthode MAX-PROD

Ainsi, la généralisation de cette méthode à toute la table d'inférence donne le raisonnement suivant :

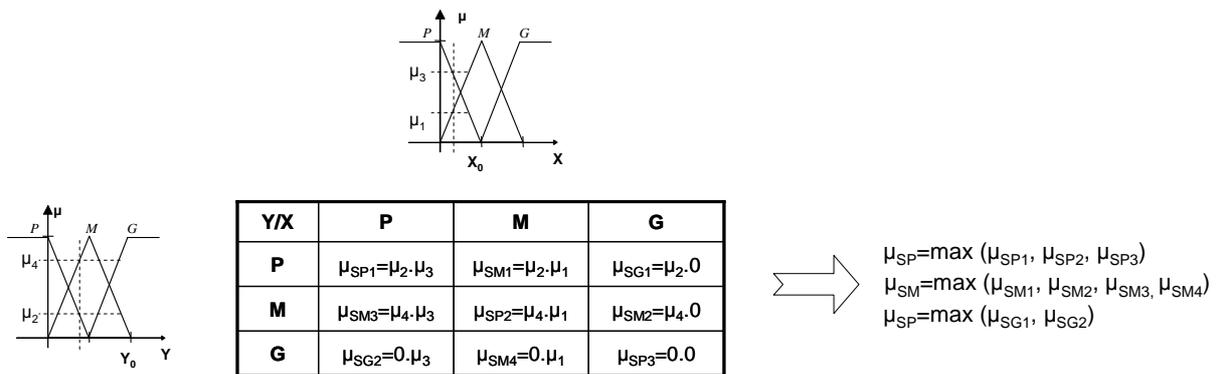


Figure 6 : Généralisation de la méthode à toutes les fonctions d'appartenance

I.2.b Application de la méthode MAX-PROD à la réalisation du superviseur de tension désirée

Les étapes de fuzzification et de défuzzification sont réalisées de la même manière que précédemment. Les sorties calculées en fonction de points de fonctionnement des entrées sont représentées sur la Figure 7.

Ici les transitions entre les paliers définis pour le coefficient $C_{\text{superviseur}}$ sont moins abruptes que celles données par la méthode MAX-MIN. Cependant, la réponse recherchée étant la plus linéaire possible, la méthode SOM-PROD doit être testée.

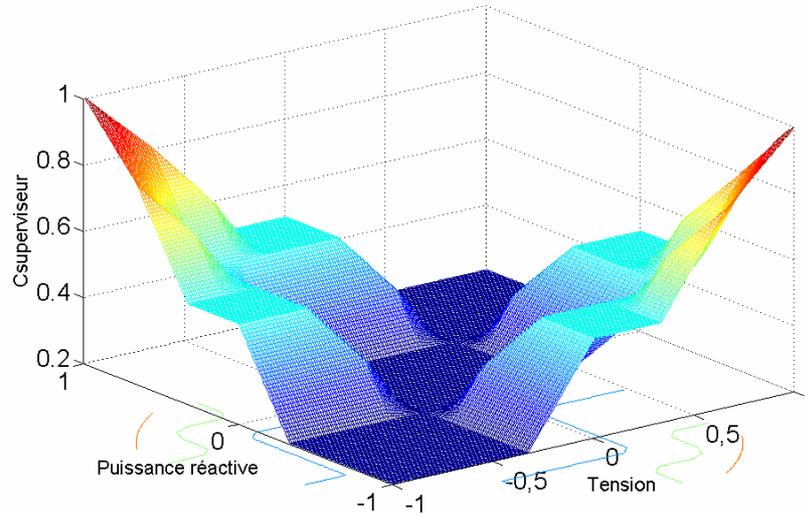


Figure 7 Représentation tridimensionnelle de l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction des entrées du superviseur par la méthode MAX-PROD

I.3 La méthode SOM-PROD

I.3.a Définition

La encore nous allons examiner le fonctionnement de cette méthode grâce à la définition de la fonction d'appartenance SM. Pour cette méthode, l'opérateur *OU* est définie par la fonction Somme et l'opérateur *ALORS* par la fonction Produit

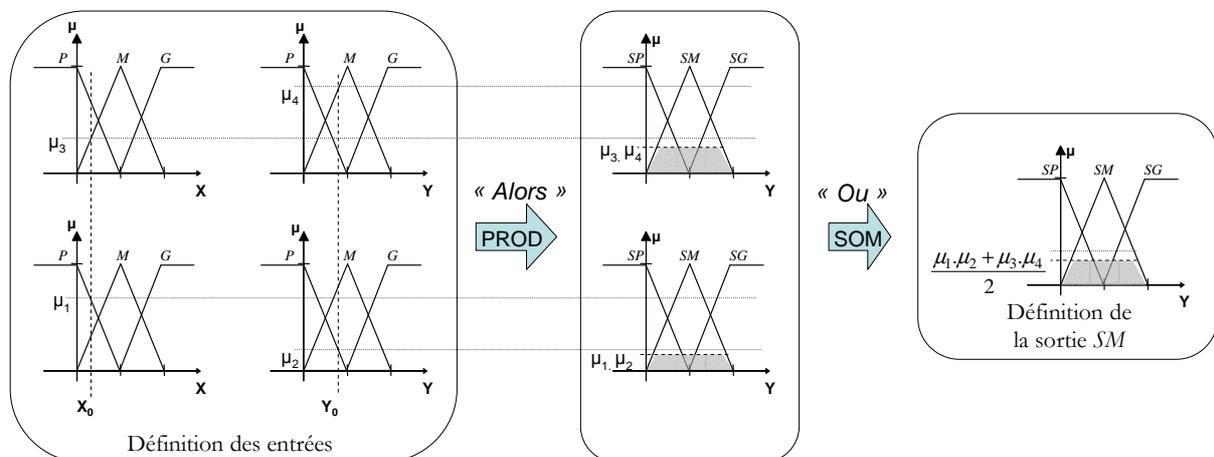


Figure 8 : Fonctionnement de la méthode SOM-PROD

Ainsi, la généralisation de cette méthode à toute la table d'inférence donne le raisonnement illustré Figure 9:

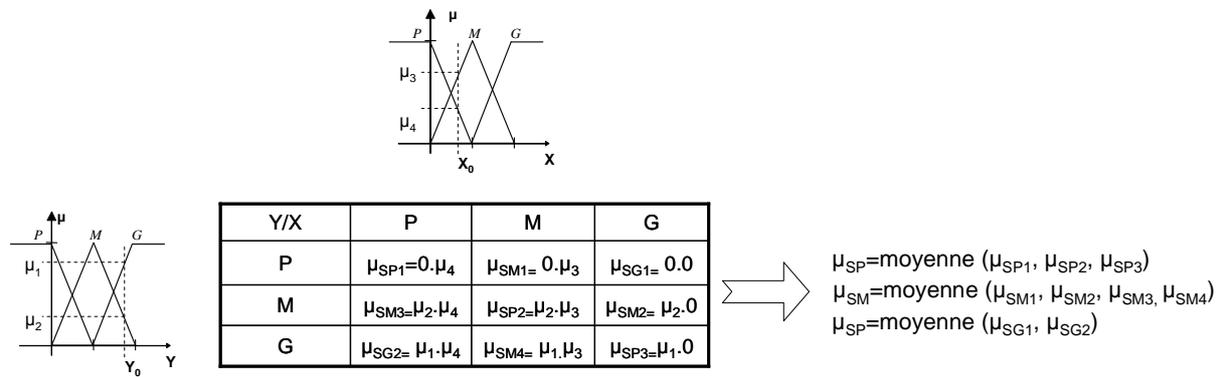


Figure 9 : Généralisation de la méthode à toutes les fonctions d'appartenance

I.3.b Application de la méthode SOM-PROD à la réalisation du superviseur de tension désirée

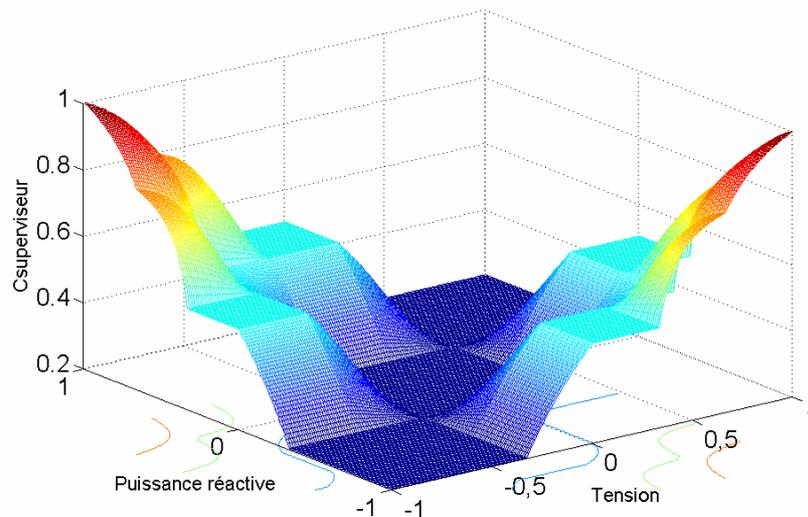


Figure 10 : Représentation tridimensionnelle de l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction des entrées du superviseur par la méthode SOM-PROD

Il est évident sur cette courbe que c'est cette méthode qui permet d'avoir le plus de souplesse dans la réponse du superviseur. En effet, ici les transitions entre les paliers sont linéaires, ceci permet donc des changements de consignes de tensions plus continues, sans « saut » de valeur. Pour ces raisons, nous avons choisi cette méthode d'inférence aux deux autres pour notre application.

Le choix de la méthode d'inférence dépend donc d'un compromis entre la complexité de la méthode et la qualité des évolutions de la réponse du superviseur. Cependant il existe d'autre

manière d'améliorer cette sortie de contrôle et de rendre la caractéristique Figure 10 encore plus linéaire. Pour ce faire, il va être possible d'utiliser différentes méthodes de défuzzification. Celles-ci vont être illustrées dans le paragraphe suivant.

II Comparaison des méthodes de défuzzification.

Comme pour l'inférence trois principales méthodes existent pour la réalisation de l'étape de défuzzification :

- La méthode du maximum
- La méthode du barycentre des maxima
- La méthode du centre de gravité (centroïde)

Ces trois méthodes permettent d'obtenir une valeur numérique pour la sortie du superviseur en fonction de sa définition floue en sortie de l'étape d'inférence (zone grisée sur la Figure 11). Les méthodes seront illustrées sur une définition floue de la variable de sortie comprenant 4 ensembles flous comme pour notre application.

II.1 La méthode du maximum.

La méthode du maximum est la plus simple des trois envisagées. La valeur numérique de la sortie est la valeur de l'abscisse résultant de la zone grisée sur la Figure 11. Le principe de cette méthode est donc de fournir comme solutions possibles, les abscisses correspondant au maximum de la contribution des fonctions d'appartenance de sortie. Ainsi cette méthode ne donne pas de solution unique mais un intervalle dans lequel toutes les valeurs sont possibles. Cette solution est trop imprécise et n'a donc pas été retenue.

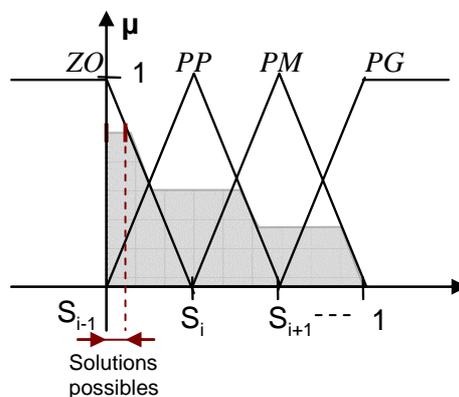


Figure 11 : Fonctionnement de la méthode du maximum

II.2 La méthode du barycentre des maxima

Cette méthode fournit comme solution, le barycentre des maxima de la participation de chaque ensemble flou, participant à la définition de la sortie. Cette solution est celle utilisée pour toutes les études réalisées lors des comparaisons de méthodes d'inférence précédentes.

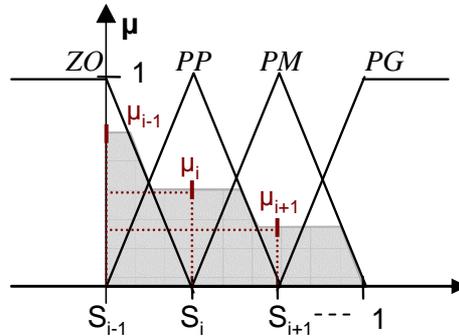


Figure 12 : Fonctionnement de la méthode du barycentre des maxima

$$C_{\text{superviseur}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (1)$$

La Figure 10, donnée précédemment pour la méthode d'inférence SOM-PROD, a été réalisée avec cette méthode. La représentation de la sortie en fonction des points de fonctionnement ne sera donc pas retracée.

II.3 La méthode du centre de gravité (centroïde)

La méthode du centre de gravité ressemble à la méthode du barycentre des maxima, à la différence que celle-ci donne l'abscisse du centre de gravité de la zone en grise sur la Figure 13. Rappelons que cette zone grisée est la définition floue de la sortie de l'étape d'inférence.

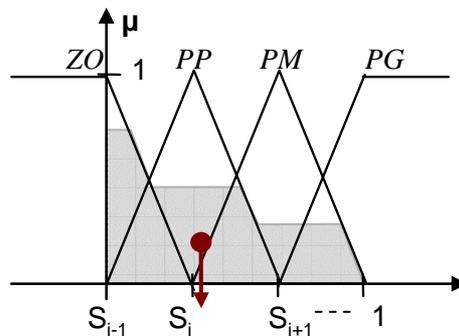


Figure 13 : Fonctionnement de la méthode du centre de gravité

$$C_{\text{superviseur}} = \frac{\int_0^1 \mu.s.ds}{\int_0^1 \mu.ds} \quad (2)$$

La Figure 14 représente les états de la sortie du superviseur en fonction des points de fonctionnement des entrées.

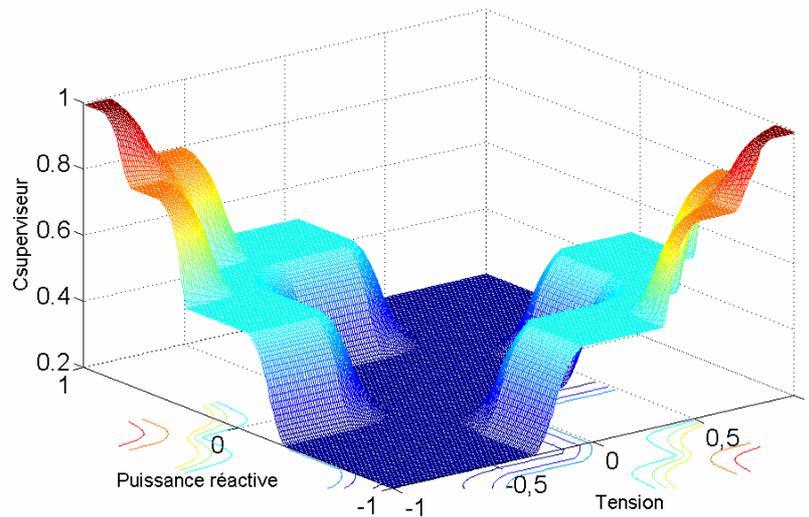


Figure 14 Représentation tridimensionnelle de l'évolution du coefficient d'adaptation en fonction des entrées du superviseur par la méthode du Centroïde

Cette figure illustre l'efficacité de cette méthode puisque l'évolution de la sortie du superviseur est linéaire, en effet aucune arête n'est présente sur la Figure 14. Ainsi, cette méthode, permettant une meilleure définition de la sortie, a été celle sélectionnée pour la réalisation de nos simulations exposées dans ce mémoire.