

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université MENTOURI de CONSTANTINE

Faculté de Science de l'ingénieur
Département de l'Electrotechnique

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention
du diplôme de magister en Electrotechnique

Option : **Modélisation et Commande des machines électriques.**

Par

Nadir GHANEMI

Etude de la tenue aux courant de court-circuit pour
le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT

Soutenu le : -- / -- / 2008

Devant le jury :

<i>Président</i> :	LATRECHE Mohamed El-hadi	Prof. Université de Constantine
<i>Rapporteur</i> :	BOUZID AISSA	Prof. Université de Constantine
<i>Examineur</i> :	BENALLA HOCIN	Prof. Université de Constantine
<i>Examineur</i> :	BOUHRMA Mohamed	M.C. Université de Constantine

DEDICACE

Je dédie ce mémoire a mes chères parents, qui sont ma raison d'être d'abord à ma mère qui savait garder le sourire dans les moments les plus durs ensuite à mon père, qui ma donner la conscience et le courage de poursuivre mes études, à mes frères et sœurs, a ma femme, mes proches et amis à mes enseignants qui m'ont aidé à trouver le chemin vers la chose la plus précieuse dans la vie "le savoir", et je tient surtout à leur dire que c'était vraiment un honneur d'être l'un parmi leurs étudiant.

Je tiens ici à exprimer mes sincères remerciements à monsieur Labed Djamel, enseignant dans l'université de constantine, chargé du cours (analyse et protection des réseaux électriques) pour sont aide a réaliser ce modeste travail.

A la fin je dois dire que:

Tous ce que parviens aujourd'hui à dire où à accomplir c'est grâce à Dieux et à eux.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

I. Introduction	1
II. Organisation des différents chapitres de la thèse	4

CHAPITRE I : LES RESEAUX DE DISTRIBUTION ELECTRIQUE

I. Introduction	6
II. Les réseaux de distribution électrique	7
1) Histoire du développement de la distribution électrique	7
2) Le système électrique verticalement intégré	8
1. définition	8
2. les raisons du choix	10
3. schéma d'exploitation	10
a. les postes source HTA/HTB	11
b. les lignes ou départs HTA	12

CHAPITRE II : LA PRODUCTION DECENTRALISEE

I. Introduction	17
II. Différents types de la production décentralisée	18
1) les énergies renouvelables	18
2) les énergies non renouvelables	19
3) la cogénération	20
III. Avantage et potentiel de la production décentralisée	20
IV. Impacts de la production décentralisée sur le réseau	22

CHAPITRE III : LE COURANT DE COURT-CIRCUIT DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION ELECTRIQUE

I. Introduction	25
II. Définition de courant de court-circuit	26
III. Caractéristiques du courant de court-circuit	27
IV. Conséquences des courants de court-circuit	28
V. Modélisation de différents éléments du réseau	29
1) le réseau amont	29
2) le réseau aval	30
3) les lignes	31
4) les transformateurs	32
IV. Calcul du courant de court-circuit	34
1) hypothèses pour le calcul	34
2) la méthode de calcul	34
3) court-circuit triphasé	37
4) court circuit biphasé isolé	38
5) court circuit biphasé terre	39
6) court circuit monophasé	40
7) court circuit monophasé avec impédance	41

TABLE DE MATIERES

CHAPITRE IV : CALCUL DE COURANT DE COURT-CIRCUIT DU RESEAU TEST

I.	Calcul du court-circuit sans la GD	44
	1) court-circuit triphasé	44
	2) court-circuit biphasé isolé	46
	3) court-circuit biphasé terre	47
	4) court-circuit monophasé	49
II.	Calcul du court-circuit avec la GD	52
	1) court-circuit triphasé	53
	2) court-circuit biphasé isolé	56
	3) court-circuit biphasé terre	57
	4) court-circuit monophasé	59
III.	Simulation en MATLAB	62
	1) simulation sans la GD	62
	2) simulation avec la GD	69
IV.	Analyse des résultats	75
V.	Conclusion	76

CHAPITRE V : ETUDE DE LA COMMANDE DE LA GENERATION DISPERSEE

I.	Introduction	79
II.	Echange de la puissance active et réactive avec le réseau	81
III.	Réglage de la tension par le contrôle de la puissance réactive	84
IV.	Réglage de la tension par le contrôle de la puissance active	88
V.	Supervision de la régulation	91
	1) première solution	92
	2) deuxième solution	93
IV.	Simulation en MATLAB	94
	1) essai du système de régulation	94
	2) essai d'un court-circuit	97
	3) conclusion	99
VII.	Limitation de la puissance active et réactive	100
	1) choix de la limite de puissance	100
	2) conséquences d'un faux choix	100
	3) simulation et résultats	101
	4) conclusion	103

CONCLUSION GENERALE	104
----------------------------	-----

ANNEXE A	106
-----------------	-----

ANNEXE B	107
-----------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	112
----------------------	-----

INTRODUCTION GENERALE

I. Introduction

Les réseaux électriques connaissent depuis quelques années de profondes mutations dues à des bouleversements à l'échelle internationale des politiques énergétiques. La dérégulation du marché de l'électricité, qui a commencé en Europe avec la Grande-Bretagne au début des années 1990, a gagné le reste de l'Europe en 1996 avec l'édition par la commission européenne de la directive 96/92/CEE fixant les règles de l'ouverture du marché de l'énergie électrique à la concurrence. Les conséquences immédiates de cette directive sont une privatisation progressive des secteurs de la production et de la distribution du produit électricité, et donc la désintégration verticale du système électrique.

D'autre part, la 3^{ème} Conférence des Parties de la Convention – Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997 a mis en place un protocole visant à réduire les émissions globales de gaz à effet de serre pour les ramener d'ici 2012 à leur niveau de 1990. Dans le domaine de la production d'électricité, ce protocole favorise les énergies renouvelables.

Ces deux grandes évolutions récentes touchant l'industrie de l'énergie électrique conduisent aujourd'hui à une accélération du phénomène d'insertion de la production décentralisée de l'électricité dans les réseaux de distribution. Ces producteurs, généralement désignés sous les termes "**G**énération d'**E**nergie **D**ispersée, **GED**" ou "**P**roduction **D**écentralisée", qui ont toujours existé à la marge, connaissent en effet depuis quelques années un développement que l'on s'attend à voir s'amplifier significativement dans les décennies à venir.

Ces **GED**, tant qu'elles n'étaient présentes qu'à très petite échelle sur les réseaux **HTA**, n'avaient d'influence ni sur la qualité de l'énergie ni sur le fonctionnement et l'exploitation des réseaux. Elles étaient donc considérées par les gestionnaires de réseaux comme des charges négatives, et devaient s'effacer, c'est-à-dire se déconnecter, en cas d'incidents, même légers (creux de tension, de fréquence, court-circuit, etc.) survenant sur le réseau. Cette situation est encore d'actualité aujourd'hui.

Cependant, dans la mesure où le taux de pénétration deviendra significatif dans les années ou décennies à venir, cette philosophie devra être entièrement révisée pour faire des producteurs décentralisés des acteurs à part entière du système électrique, faute de quoi ce dernier perdra ses qualités de fiabilité et de sécurité. En effet, la thèse de Y. Pankow [YAN-04] a mis en évidence le fait que l'insertion massive de **GED**, n'était pas sans conséquences techniques lourdes sur les réseaux de distribution :

- impacts sur la tension et le fonctionnement des régulateurs en charge;
- impacts sur la stabilité du réseau et sur le temps d'élimination critique de défauts;
- impacts sur la protection : modification des transits de puissance et des courants de court-circuit.

De plus, la multiplicité et la diversité des sources d'énergie au sein des réseaux de distribution représentent un problème majeur pour leur pilotage puisqu'elles ne sont pas toujours observables et dispatchables [CRA_03]. Ces deux fonctions sont néanmoins indispensables à la sécurité du système dans le cas où ces sources ne sont plus marginales. Le fait qu'une partie de cette production est de type intermittent ou renouvelable nuit à la garantie de la puissance de sortie en dépit des avancées récentes en matière de prédiction, notamment dans le domaine de l'éolien.

Il apparaît alors évident que la croissance du taux de pénétration des **GED** ne peut être sereinement soutenue qu'au prix d'une réelle organisation économique et énergétique des producteurs indépendants, et d'une adaptation ou reconstruction des systèmes de protection en place dans les réseaux de distribution ; la thèse de CONG DUC PHAM [CON_05] traite le problème de la localisation des points de défauts au sein des réseaux de distribution en présence de la génération dispersée. Cette nouvelle organisation peut produire un outil susceptible de fournir certains services aux réseaux dits "services système" [REN_71]

(TOME 1), et plus particulièrement une solution au problème du plan de tension. Les moyens de réglages actuels n'étant pas aptes à résoudre ces problèmes de tension, puisque leur action est moyennée au niveau du poste source, il semble en effet naturel de chercher comment se servir des **GED** qui seront présentes. Cette solution présente également l'avantage de soulager l'action de réglage de tension du réseau de transport en limitant les transits de puissance réactive entre le transport et la distribution. Une autre solution consisterait à utiliser des dispositifs de compensation de type **D-FACTS (Distributed Flexible AC Transmission Systemes)**, mais il s'agit là d'une solution coûteuse basée sur des installations dédiées alors que les **GED** seront présentes pour produire de la puissance active. Une troisième solution consiste à mettre en oeuvre une technique permettant à la production décentralisée de participer à la régulation de tension.

Pour les courants de court-circuit, qui vont être changés par l'insertion d'une **GED** avec un taux de pénétration considérable dans les réseaux de distribution, le problème peut être traité de deux manières [MIC_03] :

La première, consiste à adapter le système de protection [CON_05], ou le changer carrément par des appareils plus sophistiqués (par exemple les automates de protection), pour pouvoir détecter et éliminer les courts-circuits en présence de la **GED**.

La deuxième, qui sera l'objet du présent travail, consiste à mettre en oeuvre une technique permettant un contrôle sur la puissance active et réactive injectées par la **GED** dans le réseau électrique. Ainsi, un tel contrôle permettra en même temps de résoudre le problème lié au changement du plan de tension et, en limitant la puissance de court-circuit, la contribution en courant de court-circuit est minimisée d'une façon à ne pas perturber le fonctionnement du système de protection.

II. Organisation des différents chapitres du mémoire

Dans le chapitre I, un rappel sur les réseaux de distribution électrique va nous permettre de définir l'architecture et l'exploitation de ces réseaux. Ainsi, la simulation qui sera faite dans le chapitre IV est basée sur ses deux faits.

Dans le chapitre II, on définit les productions décentralisées avec leurs différentes catégories et par rapport à la centrale centralisée.

Dans le chapitre III, le court-circuit sera défini avec les causes d'apparition et les conséquences. Une modélisation du réseau électrique avec ses différents éléments est réalisée pour permettre de calculer le courant de court-circuit.

Dans le chapitre IV, un calcul des courants de court-circuit avec leurs différentes catégories est entrepris. Ainsi, on peut déterminer la contribution de la génération dispersée en courant de court-circuit.

Dans le chapitre V, une attention est apportée à l'interface entre le réseau électrique et la génération dispersée par une étude afin de minimiser la contribution de la génération dispersée en courant de court-circuit.

CHAPITRE I :
LES RESEAUX DE DISTRIBUTION
ELECTRIQUE



I. INTRODUCTION

Les réseaux de distribution électrique n'ont cessé d'évoluer depuis leur origine à la fin du XIX^{ème} siècle, tant du point de vue des techniques utilisées que celui de l'exploitation et des protections. La phase d'évolution engagée depuis quelques années compte parmi les plus radicales puisqu'elle introduit la production d'énergie électrique au sein même des réseaux de distribution en aval des postes sources [RAI_01]. Cela n'est pas sans conséquences sur la sécurité et l'exploitation des réseaux, ainsi que sur la qualité de l'onde de tension délivrée aux clients.

Cette évolution, que l'on s'attend à voir s'accélérer au cours des prochaines décennies conduit à repenser les principes de fonctionnement, voire la structure même des réseaux de distribution afin de préparer l'insertion prochaine de production décentralisée avec des taux de pénétration très importants.



II. LES RESEAUX DE DISTRIBUTION

1) Histoire du développement de la distribution électrique

Les premières centrales électriques ont été construites au XIX^{ème} siècle par des industries pour s'autoalimenter en courant continu. L'usage public de l'électricité n'a réellement débuté qu'après l'Exposition Universelle de 1881. Les premières concessions municipales de production et de distribution d'électricité sont alors faites à des entreprises privées ou à des régies municipales pour l'éclairage public et l'alimentation de particuliers. Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le début du XX^{ème} siècle connaît un développement rapide, mais anarchique de l'industrie électrique en zone urbaine. Les options techniques sont prises de manière non concertée entre les différentes concessions et la mise en oeuvre incohérente rendra difficile l'unification du réseau. Ainsi, Paris utilisera en 1945 plusieurs types de distribution électrique : continu; alternatif monophasé ou biphasé. Le courant continu ne disparaîtra que dans les années 1960. L'électrification rurale reste avant la première guerre mondiale à la traîne à cause de la faible densité de raccordement et donc du fort coût d'investissement.

Entre les deux guerres, de nombreuses communes rurales vont se regrouper en syndicats intercommunaux d'électricité pour créer des réseaux de distribution ruraux qui se regrouperont petit à petit pour former des poches de plus en plus grandes. L'électrification rurale est très intense pendant cette période. En effet la proportion de la population ayant accès à l'électricité est passée de 58% en 1918 à 83% en 1929.

Cependant, les réseaux créés à cette période sont souvent sous dimensionnés, il en résulte une qualité de l'électricité très inégale.



Enfin, l'année 1946 marque un véritable tournant dans l'histoire de l'électrification puisque c'est cette année qu'est votée la loi N° 46-628 nationalisant la production, le transport et la distribution de l'électricité tel que nous le connaissons aujourd'hui.

2) Le système électrique verticalement intégré

1. Définition

Le développement à grande échelle des réseaux électriques s'est fait pendant les glorieuses trentaines, pour des raisons techniques et économiques, sous la forme d'un monopole verticalement intègre. L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée, et consommée de manière totalement décentralisée. Cela a nécessité la mise en place d'un réseau capable de transporter l'énergie produite en quelques dizaines de points de productions vers plusieurs millions de consommateurs repartis sur l'ensemble du territoire.

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension (225 kV et 400 kV) pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition (63 kV et 90 kV), puis de distribution (20 kV) d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension (230/400 V). Cette structure verticale "transport – répartition – distribution" est schématisée sur la (figure I.1). Notons ici que la terminologie "réseau de répartition" tend à disparaître, ce niveau de tension étant généralement englobé dans le terme "transport"

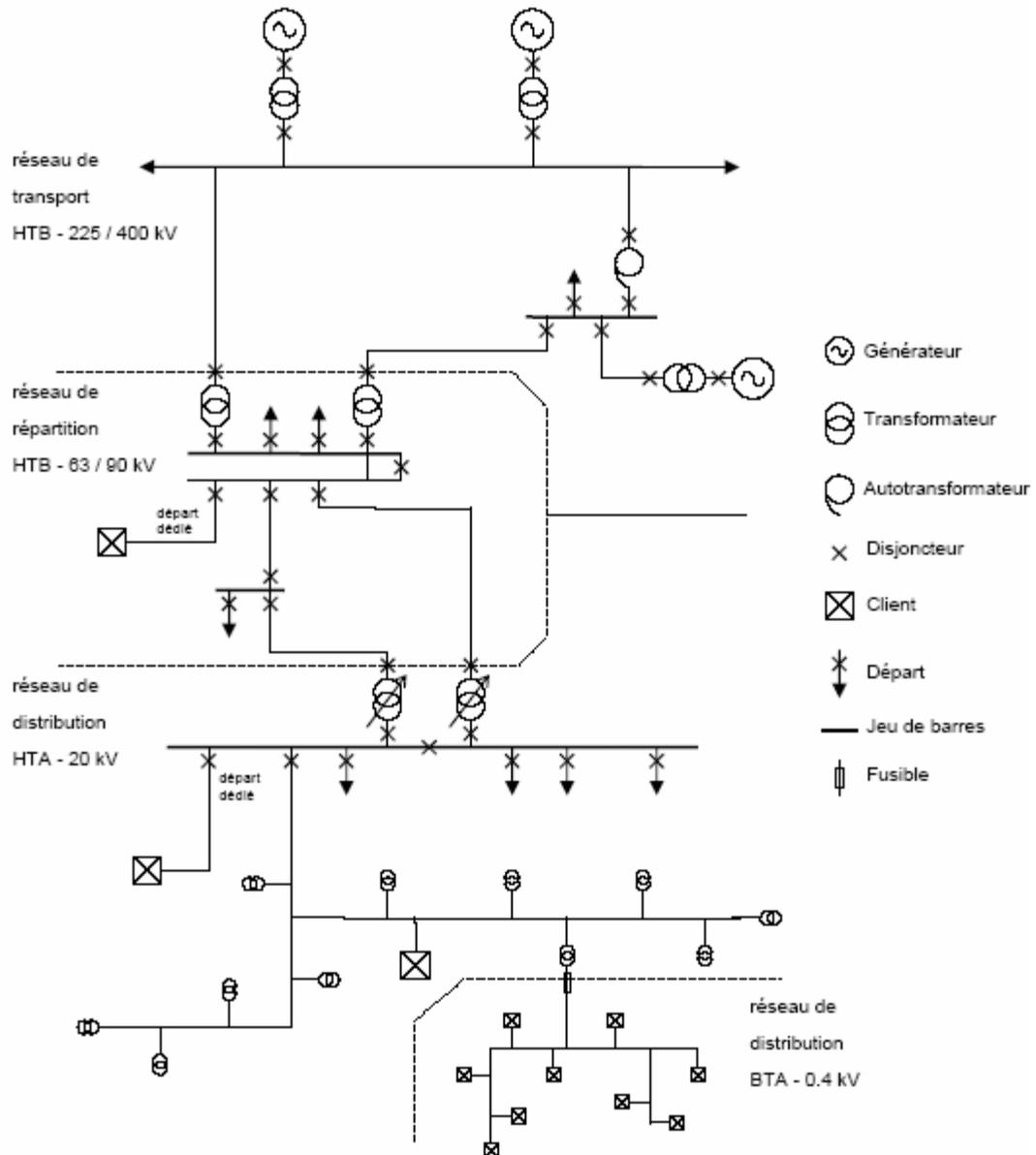


Figure I.1: Organisation des différents niveaux de tension du système électrique



2. Les raisons du choix

Le système électrique est basé depuis sa nationalisation sur un monopole production – transport – distribution pour des raisons économiques liées au coût de construction et d'entretien des installations de production, de transport et de distribution de l'électricité, ainsi que politiques. Cette structure verticalement intégrée était aussi favorisée par les obligations de service public du distributeur d'énergie électrique comme la continuité de service, l'égalité de traitement des consommateurs, ou l'obligation de fourniture.

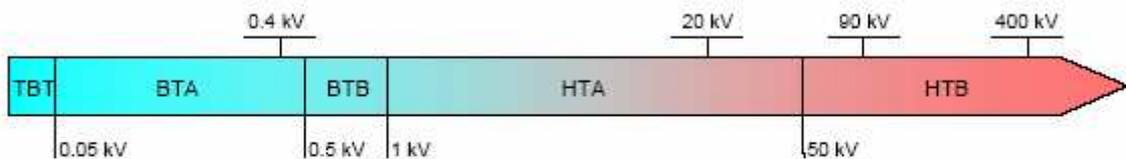


Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés

La définition des différents niveaux de tension résulte à la fois de choix historiques et d'optimisations technico-économiques entre le coût d'installation et de maintenance des ouvrages et leur capacité à transporter l'énergie du point de production au client final en générant un minimum de pertes. Ainsi, le niveau de tension HTA à 20 kV s'est imposé pour la distribution car il permet de minimiser le nombre de postes sources et de limiter les chutes de tension tout en utilisant du matériel peu exigeant en termes de tenue de tension.

3. Schéma d'exploitation

Pour des raisons de coût et de simplicité technique, les réseaux de distribution ont une structure arborescente [CAR_90], ce qui simplifie notamment considérablement le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source HTB/HTA vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide des défauts, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Cette structure est donc parfaitement adaptée à un système verticalement intégré dans lequel la production est centralisée et la consommation distribuée.



a. les postes sources HTA / HTB

Les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 225 kV) constituent l'interface entre les réseaux de transport/répartition et les réseaux de distribution. Ils sont constitués en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même une ou deux rames, ou jeux de barres (figure I.3.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un second transformateur est ajouté (figure I.3.b), et le poste est généralement raccorde à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne". En phase finale, un troisième (et quelquefois plus) transformateur est ajouté en double attaché (figure I.3.c).

En exploitation normale, un transformateur peut alimenter plusieurs rames, le second étant en secours; ou bien chaque transformateur alimente une rame ou une demi rame. Les transformateurs ne sont jamais en parallèle, sauf de courts instants pendant un changement de schéma d'exploitation du poste.

Les départs HTA sont regroupés par demi rame en fonction de leur nature (aérien ou souterrain) et de la similarité de leur courbe de charge, c'est-à-dire du type de clients raccordés.

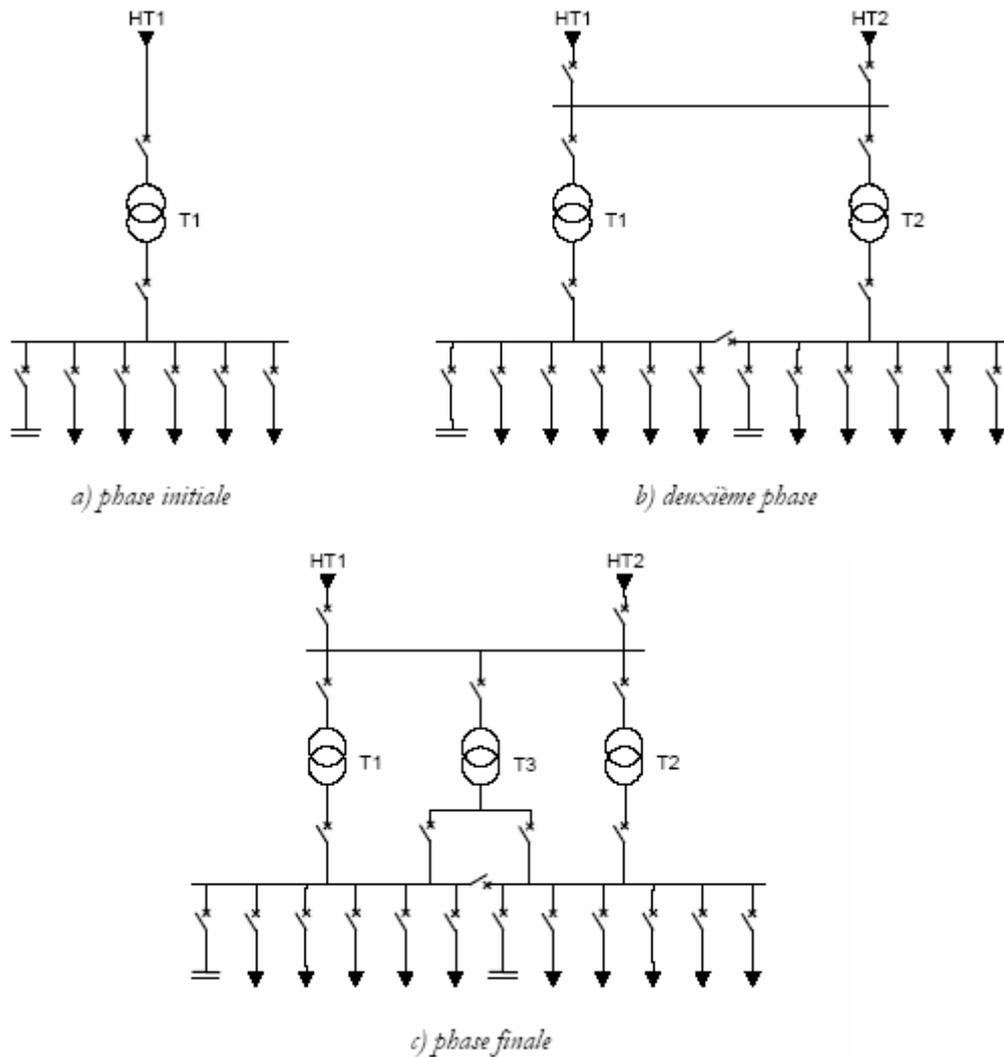


Figure I.3 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

b. les lignes ou départ HTA

Le réseau HTA a une structure arborescente radiale le plus souvent bouclable par une autre demi rame ou un autre poste source pour la sécurité d'exploitation. Il est en général constitué d'une artère ou ossature principale et de dérivations. Selon la densité des charges à desservir, le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains.



- **Réseau HTA aérien**

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.4), traditionnellement moins coûteuses que les câbles enterrés.

Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.

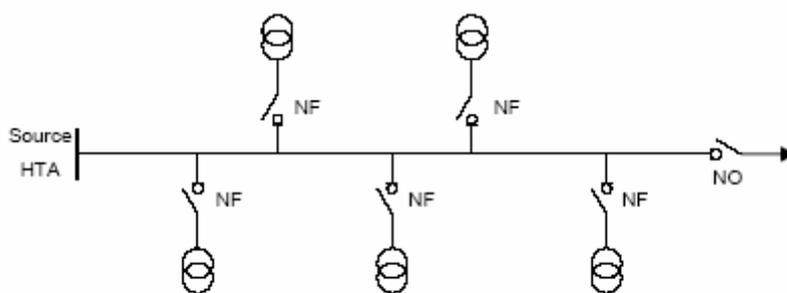


Figure I.4 : Simple dérivation

- **Réseau HTA souterrain**

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.5) ou en coupure d'artère (figure I.6). En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.



Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcoût lié à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.

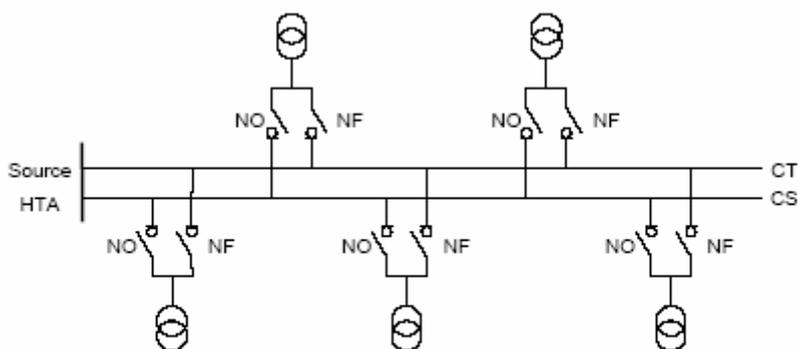


Figure I.5 : Double dérivation

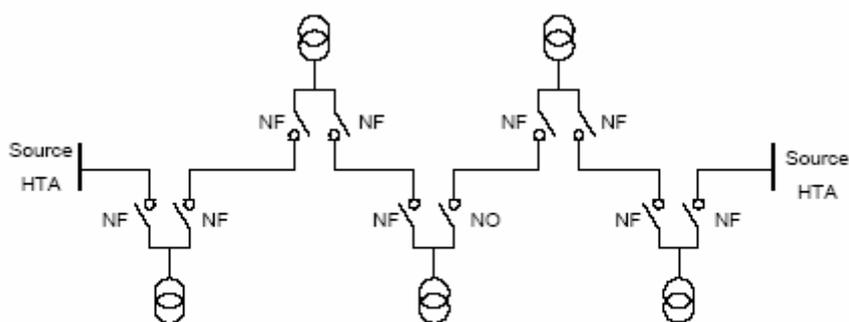


Figure I.6 : Coupure d'artère

Le réseau de distribution a pour rôle de fournir l'énergie électrique aux clients raccordés en HTA ou en BT en assurant une continuité de service et une qualité de l'onde électrique, dans les meilleures conditions de sécurité et au meilleur coût. Pour cela, le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) peut agir sur la conception (structure, nombre, dimensionnement,...) et sur les règles d'exploitation.



La qualité de l'onde de tension délivrée par le distributeur doit répondre à des caractéristiques définies par la norme européenne EN 50610 (NF C02-160) de mai 2000. Les éléments principaux en sont reportés dans le tableau I.1.

Caractéristiques	Valeurs admises
Fréquence	50 Hz \pm 1 % pendant 99,5 % du temps sur une année
	50 Hz + 4 % / - 6 % pendant 100 % du temps
Tension	230 V \pm 10 % pendant 95 % du temps sur une semaine
	20 kV \pm 10 % pendant 95 % du temps sur une semaine
Harmoniques	Taux global de distorsion harmonique \leq 8 % U_n
Déséquilibre de la tension	$U_{inverse} \leq 2$ % de U_{direct} pendant 95 % du temps sur une semaine

Tableau I.1: Caractéristiques de la tension BT et HTA

Au-delà de cette norme européenne, l'arrêté ministériel du 29 mai 1986, fixe la tension réglementaire de distribution BT à 230/400 V avec des seuils de tolérance de +10 % et -10 % de la tension nominale. De plus, le distributeur s'engage contractuellement à délivrer en tout point du réseau une tension HTA ne sortant pas d'une plage de \pm 5 % autour d'une valeur contractuelle U_c elle-même fixée dans une plage de \pm 5 % autour de la tension nominale (en général 20 kV).

CHAPITRE II :

LA PRODUCTION DECENTRALISEE



I. DEFINITION

Depuis le début des années 1990, l'organisation du système électrique est remise en cause par divers facteurs économiques, écologiques et politiques. Le ralentissement de la croissance de demande d'énergie électrique conduit à freiner les lourds investissements dans des installations de grande taille [RAI_01]. Ce phénomène est accentué par le poids de l'opinion publique : chacun veut une électricité à faible coût, mais personne n'accepte la construction d'une grande centrale à sa porte. D'autre part, l'intérêt croissant accordé à l'environnement pousse les producteurs à développer la production décentralisée d'électricité basée sur l'utilisation des sources d'énergies primaires renouvelables et de la cogénération afin d'augmenter le rendement énergétique des installations de production, ce qui contribue à produire une énergie plus "propre". Ces nouveaux phénomènes, dans le contexte de dérégulation qui a pour cadre la directive européenne 96/92/CEE, poussent inévitablement au développement rapide d'une nouvelle catégorie de producteurs : **la génération d'énergie dispersée**, ou **GED** qui sont des producteurs indépendants.

Les GED se distinguent des unités de production centralisée par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au réseau de distribution, et par leur "petite taille"[SAL_04], bien qu'il n'y ait à l'heure actuelle pas de limite clairement définie entre les catégories centralisée et décentralisée. Cependant, la loi française (arrêté du 17 mars 2003) limite la puissance des installations raccordées au réseau HTA à 12 MVA, alors que la norme IEEE 1547 sur l'interconnexion des ressources dispersées au réseau électrique ne s'applique qu'aux sources d'une puissance inférieure à 10 MVA.



II. DIFFERENTS TYPES DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE

1) Les énergies renouvelables

- **Hydraulique.** Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie Potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mué par la force de l'eau qui est due soit a la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.
- **Eolien.** Les aérogénérateurs, ou éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence a atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. Elle est passée devant la production géothermique au niveau mondial en 2000.
- **Géothermie.** Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.
- **Solaire photovoltaïque.** Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation des sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage.



- **Solaire thermique.** Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.
- **Biomasse et déchets.** Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou des déchets industriels et domestiques.
- **Marémotrice.** Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées. Cette source d'énergie, malgré sa disponibilité considérable, reste anecdotique car elle nécessite la construction de barrages qui modifient les sites côtiers en causant un ensablement ou un envasement du site.
- **Hydrolienne.** Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique de la houle dont l'énergie provient du vent. De nombreuses solutions techniques ont été imaginées, mais l'hostilité du milieu sous-marin compromet sérieusement leur développement à l'heure actuelle.

2) Les énergies non renouvelables

- **Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole).** Les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:
 - ✓ le thermique à flamme, basé sur des turbines ou micro turbines vapeur;
 - ✓ les turbines à gaz et cycles combinés de cogénération ou trigénération;



- ✓ les moteurs atmosphériques, diesel, etc.
- **Hydrogène.** Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie sur laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature, il faut en effet de l'énergie pour le produire.

3) La cogénération

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

III. AVANTAGE ET POTENTIEL DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE

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



Cependant, à l'heure actuelle, les énergies renouvelables, à l'exception de l'énergie hydraulique, ne sont pas rentables. Leur relative compétitivité vient principalement de subventions sous forme d'obligation de rachat par le distributeur à des tarifs élevés. Mais on estime que ces nouvelles filières deviendront compétitives quand elles approcheront leur maturité technologique, et que leur exploitation sera rentable sans subventions autour de 2020. Le mixage de ces ressources avec les ressources classiques devrait alors favoriser grandement le respect de l'environnement.

Le potentiel énergétique de la grande hydraulique est exploité près de son maximum au niveau mondial avec 740 GW installés. En France, 90 % des ressources sont déjà exploités. La petite hydraulique en revanche, dispose d'un potentiel d'évolution de 1700 MW.

Le solaire photovoltaïque installé dans le monde fin 2001 atteint 1400 MW. Le potentiel énergétique de cette source est considérable, puisqu'en couvrant un tiers de la surface totale des toits en Europe de panneaux photovoltaïques, la puissance installée atteindrait 120 GW, ce qui permettrait de fournir 120 TWh/an avec un taux d'utilisation équivalent à 1000 heures par an à pleine puissance, ce qui représente un peu moins de 5 % de la consommation européenne actuelle.

Les éoliennes installées dans le monde fin 2002 représentent 30 GW et le potentiel reste énorme. Le potentiel éolien français est estimé à 30 GW en zone terrestre avec une production annuelle de 66 TWh, et à 4.2 GW en offshore avec une production de 14 TWh/an. Le taux d'utilisation moyen de l'énergie éolienne est compris entre 3000 et 3300 heures par an à pleine puissance.



IV. IMPACTS DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION

De précédentes études montrent qu'un taux de pénétration croissant de production décentralisée n'est pas sans impacts prévisibles sur l'exploitation future des réseaux de distribution [Oli_06], [Yan_04]. En particulier, le plan de tension peut être grandement modifié par la présence de GED, au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure en certains noeuds du réseau alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source. Le plan de protection risque également d'être affecté par un fort taux de pénétration des GED du fait de la puissance de court-circuit qu'elles apportent en aval des protections, et de l'inversion possible des flux de puissance active sur certaines lignes, ainsi que de la diminution du temps d'élimination critique de défauts.

Les GED fournissent de l'énergie près des points de consommation, diminuant ainsi les transits de puissance active et donc les pertes en ligne sur le réseau de transport, mais sont pénalisantes du point de vue de l'exploitation des réseaux de distribution pour les raisons cités plus haut ajoutées aux risques d'oscillations de puissance active et leur corollaire qui est une stabilité dégradée.

Une partie de ces GED à, de plus, des sources d'énergie primaire intermittentes (éolien, solaire) qui ne permettent pas de prévoir aisément la production disponible à court terme. Elles ne peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché. D'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchables par les gestionnaires de réseaux de distribution et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système. Cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. Cela peut contraindre par exemple les gestionnaires de réseaux à engager des investissements non prévus initialement.



Une partie de ces GED produisant par construction du courant continu (pile à combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée.

Enfin, la présence de GED en aval d'un poste source dont le transformateur est équipé d'un régulateur en charge régulé par compoundage perturbe son fonctionnement basé sur la mesure du courant absorbé. En effet, la production de puissance par les GED réduit le courant traversant le transformateur, provoquant une action du régulateur en charge et diminuant ainsi la tension au niveau du poste source.

CHAPITRE III :
LE COURANT DE COURT-CIRCUIT DANS
LES RESEAUX DE DISTRIBUTION
ELECTRIQUE



I. INTRODUCTION

Le savoir faire en matière de construction et de dimensionnement des réseaux d'énergie électrique exige la connaissance du comportement lors d'un court-circuit. Les contraintes thermique et mécanique des conducteurs doivent être vérifiées non seulement avec le courant maximal d'emploi [MER_03] mais, le conducteur doit supporter un courant de court-circuit qui peut atteindre plusieurs kiloampères dans les réseaux moyens tension [CHI_91]. En matière de protection et de bon fonctionnement des réseaux électriques, l'élément de base chargé de cette fonction est le disjoncteur. Pour qu'un disjoncteur fonctionne correctement, il faut que son pouvoir de coupure doive être supérieur au courant maximum d'un court-circuit $PDC > I_{cc_tri}$ [MER_03].

Pour cela, on doit dans une première étape donner une définition au court-circuit, causes et effets, avec ses catégories.

Effectuer en seconde étape le calcul en considérant une modélisation des éléments du réseau conforme à la méthode utilisée.

Le calcul analytique pour déterminer les courants de court-circuit est possible. A cause de leur importance et leur utilité, on s'intéresse toujours à la valeur efficace (la phase sera de plus d'importance dans d'autres applications, par exemple dans la détermination de point de défaut dans un réseau maillé [MIC_03]). La méthode utilisée dans ce mémoire (et évidemment la plus utilisée) est celle basée sur les composantes symétriques. La norme CEI-60909 décrit la procédure et le niveau de tension limite pour l'utilisation de cette méthode (tension limite égale 230KV). Ce qui est suffisamment pour un réseau radial de tension 20KV.

La troisième étape consiste en une analyse des résultats obtenus.

II. DEFINITION DE COURANT DE COURT-CIRCUIT

Lors de l'apparition d'un court-circuit, et du fait de la nature inductive du réseau, la valeur à fréquence industrielle ne s'établit pas immédiatement (figure III.1)[JEA_97]. Le courant peut approximativement être considéré comme la somme de deux termes.

- ✓ *Composante transitoire apériodique* qui décroît rapidement de la forme $I\sqrt{2}.e^{-\frac{t}{T}}.\cos(\beta)$, où β l'instant du court-circuit.
- ✓ *composante sinusoïdal $f=50\text{hz}$* correspondant au régime établi de la forme $I\sqrt{2}.\cos(\omega.t + \beta)$.

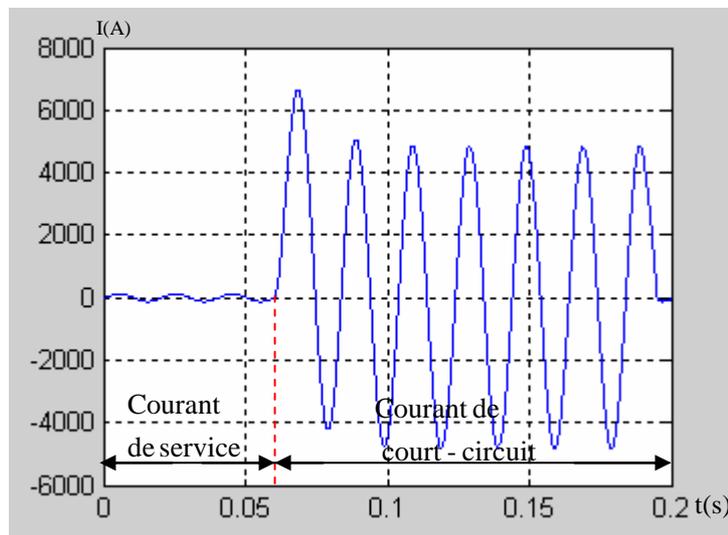


Figure III-1 forme générale d'un courant de court-circuit.



III. CARACTERISTIQUE DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire. Ils sont principalement caractérisés par :

1. leur durée

- auto extincteur ;
- fugitif;
- permanent.

2. leur origine

- mécanique;
- surtension externe ou interne;
- dégradation d'isolement.

3. type de défaut

- triphasé. (Figure III-2-a)
- biphasé : deux cas sont possible
- biphasé isolé. (Figure III-2-b)
- biphasé a la terre. (Figure III-2-c)
- monophasé : sans ou avec impédance de court-circuit. (Figure III-2d, III-2-e)

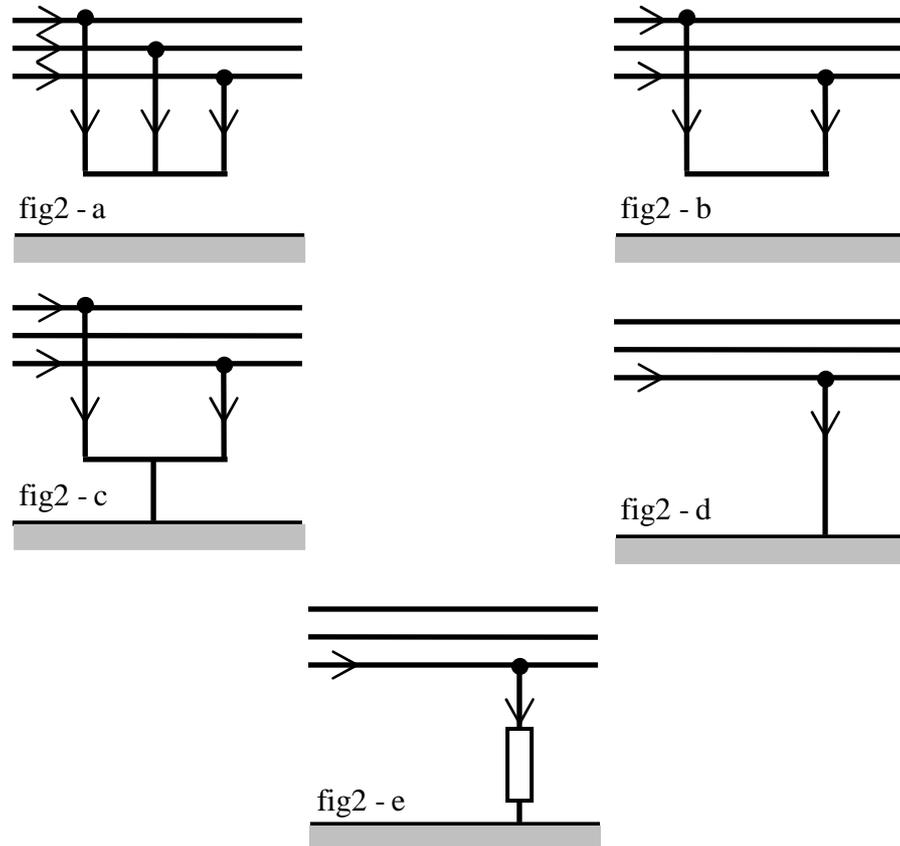


Figure III-2 différent type de défaut

IV. CONSEQUENCE DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

Les conséquences des courants de court-circuit sont variables selon le type et la durée du court-circuit. Le point concerné du réseau et l'intensité.



1. au point de défaut.

La présence d'arc de défaut avec :

- détérioration des isolants ;
- fusion des conducteurs ;
- incendie et danger pour les personnes.

Pour les circuit défectueux :

- déformation des jeux de barre ;
- arrachement des câbles.

2. pour les autres circuits électriques du réseau

- les creux de tension pendant et après la durée d'élimination du défaut ;
- la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité des protections ;
- l'instabilité et/ou la perte de synchronisme des machines influencées par le court-circuit.

V. MODELISATION DES DIFFERENTS ELEMENTS DU RESEAU ELECTRIQUE

1) LE RESEAU AMONT

Pour le réseau HTA (moyenne tension), et dû a son architecture, le réseau amont est constitué par le réseau de transport, d'où les centrales de production de l'énergie électrique (avec leur différents principes de production, thermique, nucléaire,..) débitant leur énergie. Ainsi, il est alors commode de remplacer le réseau amont par une impédance représentative (figure III-3) ou au moins un réseau fictif d'impédances [OLL_73]. Comme ce réseau



« amont » serait souvent à une tension différente de celle du réseau étudié, on définit commodément l'impédance du réseau amont par :

$$Z_{cc} = \frac{U_n^2}{S_{cc}}$$

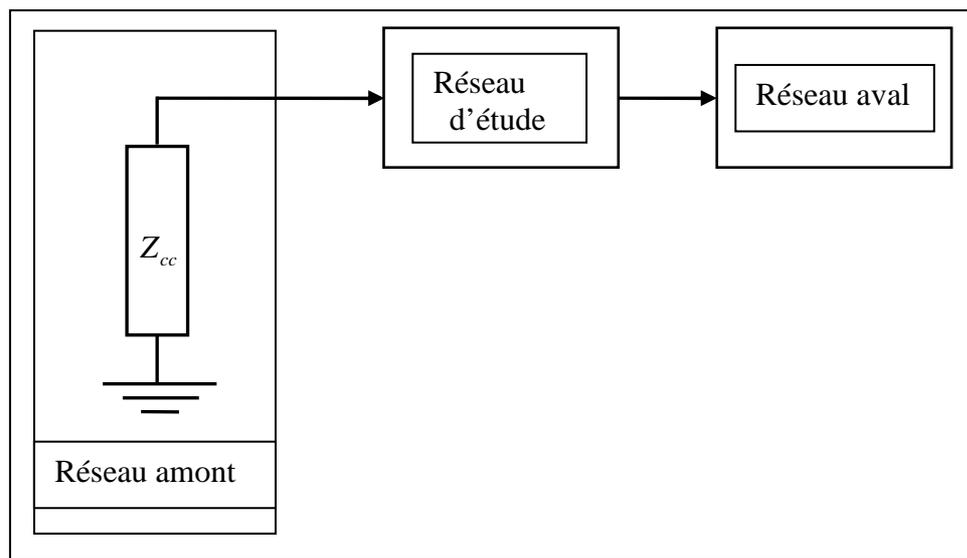


Figure III-3 schéma représentatif du réseau électrique

2) LE RESEAU AVAL

Le réseau aval est souvent constitué par des charges qui consomment un courant électrique appelé courant de *service*. Ce courant de service (de quelques ampères à quelques dizaines d'ampères pour le réseau HTA) est négligeable devant le courant de court-circuit.

Vu cette négligence, le réseau aval ne sera pas considéré pour le calcul des courants de court-circuit.



3) LES LIGNES

Une ligne peut être modélisée par un schéma en pi par phase (Figure III-4) ; ce schéma va présenter les trois phénomènes [OLL_73] :

- phénomène résistif : qui va être représenté par une résistance R .
- phénomène inductif : qui va être représenté par une inductance L .
- phénomène capacitif : qui va être représenté par une capacité C .

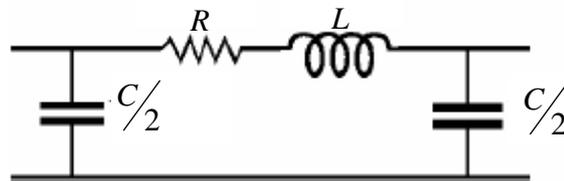


Figure III-4 schémas en pi d'une ligne

Selon le constructeur, dans le niveau de tension, on trouve les différentes caractéristiques des lignes. Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques des lignes en fonction de la tension du service

U (kV)	15	20	63	90	150	225	400
R (mΩ/Km)	460	460	160	130	60	60	30
L (mH/Km)	1,33	1,33	1,21	1,21	1,33	1,26	1,05
C (nF/Km)	20	20	20	19	17,2	17,8	21,6

Tableau III-1 : Tableau tiré de [JEA_97]

En examinant les valeurs du tableau, on constate que, l'effet capacitif peut être négligé devant l'effet résistif et inductif. Donc la ligne sera modélisée en fin de compte par une résistance en série avec une inductance. (Figure III-5)

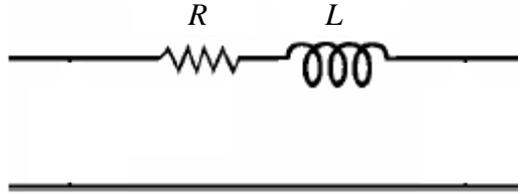


Figure III-5 schéma simplifié d'une ligne

4) LES TRANSFORMATEURS

Un transformateur peut être modélisé de façon à obtenir les séquences directes, inverses et homopolaires [REN_71]. Les impédances directes et inverses sont égales et peuvent être considérées comme des « réactances de fuites » dont les valeurs relatives sont généralement comprises entre :

- 4 pour-cent (transformateur HTA/BT)
- 7 à 13 pour-cent (transformateur HTB/HTB)

La valeur relative est rapportée à une impédance égale à U^2/S_n , S_n étant la puissance nominale du transformateur.

L'impédance homopolaire dépend de la position du neutre par rapport à la terre et le type d'enroulement, l'impédance homopolaire vue d'un des jeux de bornes (primaire, secondaire ou tertiaire) est évidemment infinie si le neutre de l'enroulement est isolé.

Les différents cas de transformateurs à 2 enroulements sont rassemblés dans le tableau suivant.



Couplage				Schéma équivalent $X_{cc} = 4 \text{ à } 13 \% \text{ de } U^2/P_n$
Primaire		Secondaire		
Bobinage	Neutre	Bobinage	Neutre	
Etoile	Terre	Etoile	Terre	
		Triangle		
		Etoile	isolé	
		Zig - zag	Terre	Flux forcé $X_1 = 10 \text{ à } 15X_{cc}$ Flux libre $X_1 = \infty$
		Zig - zag	Terre	
Zig - zag	Terre	Triangle		
		Etoile	isolé	

Tableau III-2 : schéma équivalent des transformateurs
Tableau tiré de [REN_71]



VI. CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

1) Hypothèses pour le calcul

1. le réseau considéré est radial et sa tension ne dépasse pas 230KV, limite donnée par la norme CEI909 ;
2. pendant la durée du court-circuit, le nombre de phases concernées n'est pas modifié : un défaut triphasé reste triphasé, de même un défaut phase terre reste phase terre ;
3. pendant la durée du court-circuit, les tensions qui ont provoqué la circulation du courant et l'impédance du court-circuit ne changent pas d'une façon significative ;
4. les régleurs ou changeurs de prise des transformateurs sont supposés être en position moyenne ;
5. les résistances d'arc ne sont pas prises en compte ;
6. toutes les capacités de ligne sont négligées ;
7. le courant de service est négligé.

2) La méthode de calcul

Le calcul de courant de court-circuit s'appuie sur l'application du théorème de Thévenin lui-même issu du principe de superposition applicable aux réseaux linéaires actifs [JEA_97].

Si on connecte entre deux points quelconques M et N d'un réseau linéaire (Figure III-6) actif un élément extérieur d'impédance Z_e , le courant parcourant cette impédance se calcule en assimilant le réseau entre les points M et N à une source unique dont la f.é.m serait égale à la tension préexistante V_p et l'impédance interne à l'impédance Z_p du réseau rendu passif vu des points M et N.

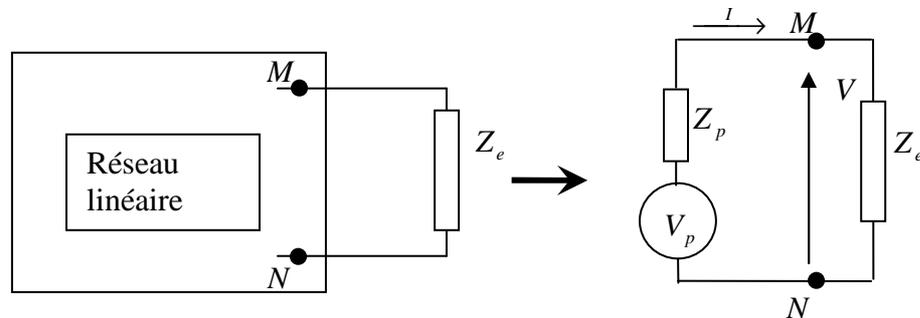


Figure III-6 Théorème de Thévenin.

Avec $V = Z_e \cdot I = V_p - Z_p \cdot I$ soit $I = \frac{V_p}{Z_e + Z_p}$

La méthode consiste à :

- isoler la zone dissymétrique du reste du réseau en la réduisant au maximum ;
- appliquer dans la partie symétrique du réseau extérieur à cette zone, la méthode des composantes symétrique aux courants et tensions ;
- appliquer à l'intérieur de la zone isolée les formules classiques en utilisant les tensions et courant de phase
- exprimer la continuité des grandeurs électriques tension et courants à la frontière délimitant la zone ;
- résoudre le système d'équations permettant de calculer les grandeurs électriques en tous les points du réseau.

Le défaut peut être considéré comme une dissymétrie ponctuelle séparée du réseau (qui reste de configuration symétrique) par une frontière fictive (figure III-7).

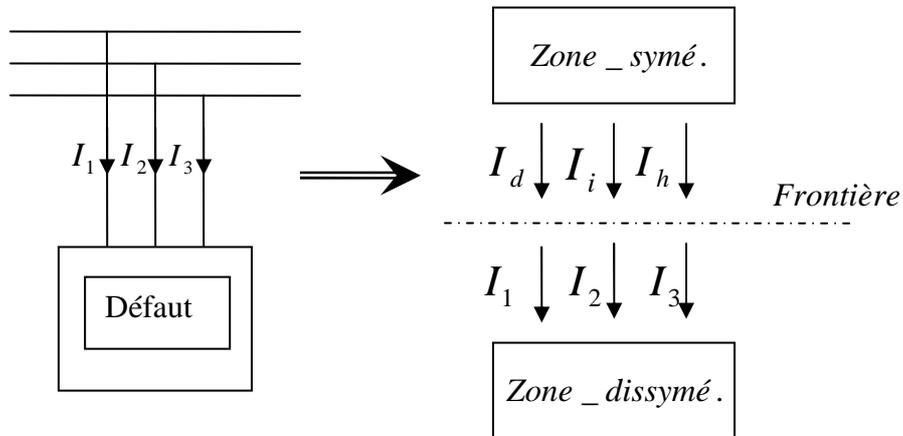


Figure III-7 Court-circuit en un point du réseau
Isolement de la zone dissymétrique

Dans la zone dissymétrique, on exprime le défaut en grandeurs de phase :

Type de défaut	Grandeurs de phase
triphasé	$V_a = V_b = V_c = 0$
biphasé	$V_a = V_b = 0 \quad I_c = 0$
monophasé	$V_a = 0 \quad I_b = I_c = 0$

La zone symétrique peut être décomposée en trois schémas monophasés équivalents, et en appliquant le théorème de Thévenin aux composantes symétriques liées à chaque schéma. On obtient trois équations :

$$\begin{cases} V_d = V_d^p - Z_d \times I_d \\ V_i = -Z_i \times I_i \\ V_h = -Z_h \times I_h \end{cases} \dots\dots\dots(III-1)$$

Avec V_d^p la tension préexistante au point de défaut et Z_d, Z_i, Z_h les impédances équivalents au réseau dans les trois systèmes.



En considérant la continuité des grandeurs à la frontière, on convertit en grandeurs symétriques les grandeurs des phases décrites dans la zone dissymétrique.

La résolution du système à six équations à six variables permet d'obtenir les courants et tensions au point M, en coordonnée symétrique, puis en coordonnées de phase.

3) Court-circuit triphasé

- Expression du défaut

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

- Traduction en grandeurs symétriques

$$V_d = V_i = V_h = 0$$

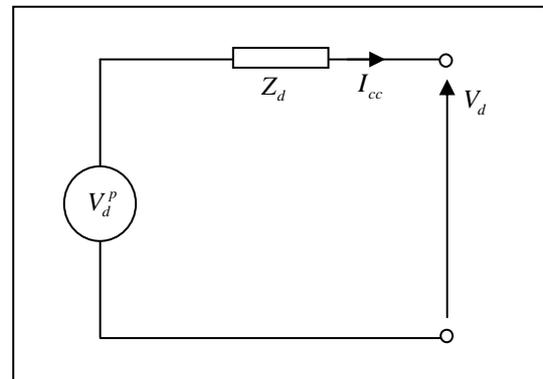
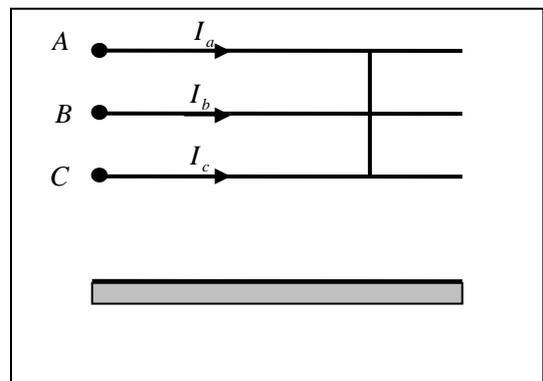
- Soit d'après (III-1)

$$I_d = \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_i = I_h = 0$$

- Retour aux grandeurs de phase

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_d}$$





4) Court-circuit biphasé isolé

- Expression du défaut

$$V_b = V_c \quad U_{bc} = 0 \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

- Traduction en grandeurs symétriques :

$$V_{bc} = V_{bn} + V_{nc} = (a^2 \cdot V_d + a \cdot V_i + V_h) - (a \cdot V_d + a^2 \cdot V_i + V_h) = 0$$

$$V_{bc} = V_d(a^2 - a) + V_i(a - a^2) + V_h(1 - 1) = 0$$

$$\Rightarrow V_d(a^2 - a) = V_i(a^2 - a) \Rightarrow V_d = V_i$$

implique que $V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i$

$$I_d = \frac{1}{3}(I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b = j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b$$

$$I_i = \frac{1}{3}(I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) = -\frac{1}{3}(a - a^2)I_b = -j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b$$

$$I_h = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0$$

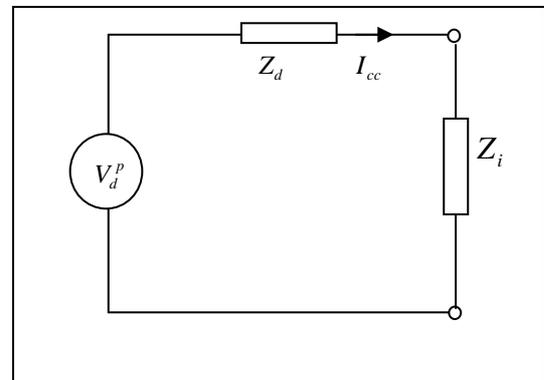
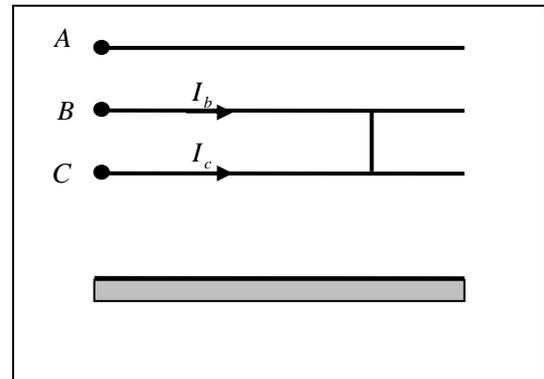
Donc : $I_d = -I_i$

- Soit d'après (III-1)

$$V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i \quad \Rightarrow \quad I_d = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

- Retour aux grandeurs de phase :

$$I_a = 0 \quad I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i} \quad I_c = j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$





5) Court-circuit biphasé terre

- Expression du défaut
 $V_b = V_c = 0 \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$
- Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{3}(V_a + a.V_b + a^2.V_c) = \frac{1}{3}V_a \\ V_i = \frac{1}{3}(V_a + a^2.V_b + a.V_c) = \frac{1}{3}V_a \\ V_h = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3}V_a \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_d = V_i = V_h$$

- Soit d'après (III-1)

$$\begin{aligned} \Rightarrow I_i &= -\frac{V_i}{Z_i} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_h}{Z_h} \\ I_h &= -\frac{V_h}{Z_h} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_i}{Z_i} \end{aligned}$$

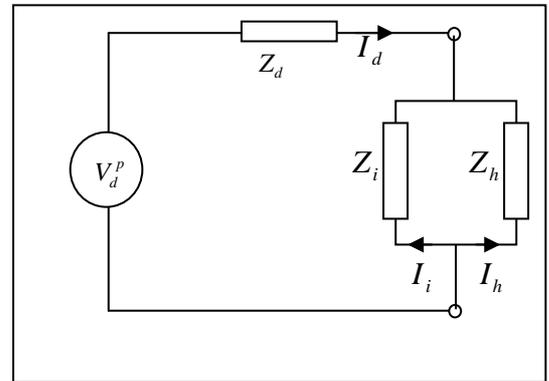
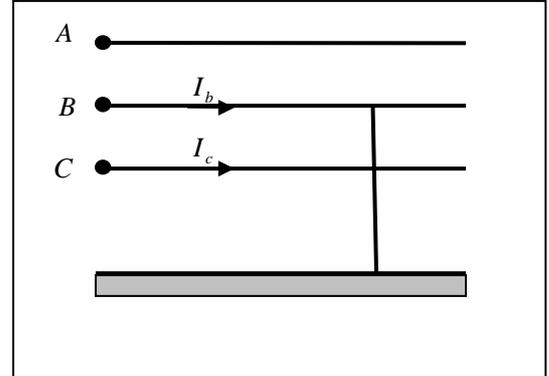
$$\text{Donc } I_i = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i}$$

$$I_h = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h}$$

$$I_a = I_d + I_i + I_h = 0$$

$$\Rightarrow I_a = I_d - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i} - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h} = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_d = \frac{V_d^p (Z_i + Z_h)}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \\ I_i = -\frac{V_d^p \cdot Z_h}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \\ I_h = -\frac{V_d^p \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \end{cases}$$





- Retour aux grandeurs de phase :

$$I_b = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_h$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{\sqrt{3} \cdot V_d^p \left(Z_h \cdot 1^{\langle -90 \rangle} + Z_i \cdot 1^{\langle -150 \rangle} \right)}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h}$$

6) Court-circuit monophasé

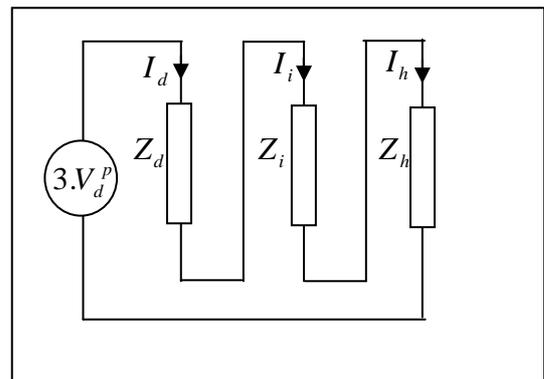
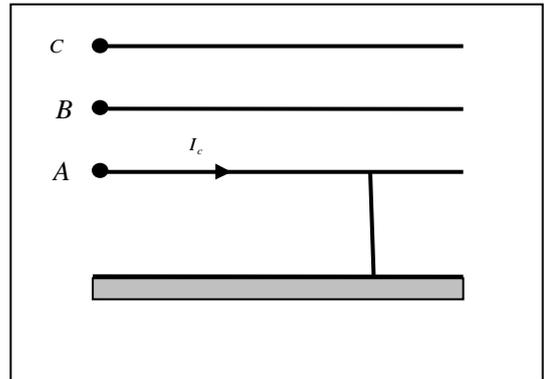
- Expression du défaut
 $V_a = 0 \quad I_a = I_b = 0$
- Traduction en grandeurs symétriques
 $V_d + V_i + V_h = 0 \quad I_d = I_i = I_h$
- Soit d'après (III-1)

$$I_d = I_i = I_h = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h}$$

$$V_d = \frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_p^d$$

$$V_i = -\frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_p^d$$

$$V_h = -\frac{Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_p^d$$





- Retour aux grandeurs de phase

$$V_a = 0$$

$$V_B = \frac{(a^2 - a)Z_i + (a^2 - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_d^p$$

$$V_c = \frac{(a - a^2)Z_i + (a - 1)Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \times V_d^p$$

$$I_a = \frac{3.V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad I_b = I_c = 0$$

7) Court-circuit monophasé avec impédance

Dans ce cas la tension au point du défaut n'est pas nulle.

- Expression du défaut

$$V_a \neq 0 \quad I_b = I_c = 0$$

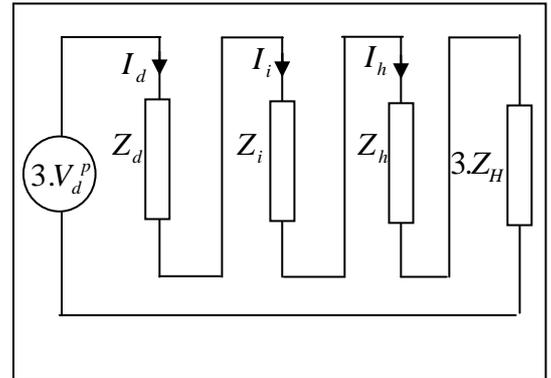
- Traduction en grandeurs symétriques

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{3}(I_a + a.I_b + a^2.I_c) = \frac{1}{3}.I_a \\ I_i = \frac{1}{3}(I_a + a^2.I_b + a.I_c) = \frac{1}{3}.I_a \\ I_h = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}.I_a \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_d = I_i = I_h$$

Avec $V_a = V_d + V_i + V_h = Z_H . I_a$

$$\Rightarrow V_d = -(V_i + V_h) + Z_H . I_a$$





- Soit d'après (III-1)

$$V_d^p - Z_d \cdot I_d = \frac{1}{3} Z_h \cdot I_a + \frac{1}{3} Z_i \cdot I_a + Z_H \cdot I_a$$

- Retour aux grandeurs de phase

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_H}$$

Remarque : toutes les grandeurs utilisées sont en valeur complexe

CHAPITRE IV :
CALCUL DU COURANT DE
COURT-CIRCUIT POUR LE RESEAU TEST



Le réseau électrique dont on va déterminer les différents courants de court circuit sans (et avec) la production décentralisé, est d'une architecture radiale (Figure IV-1) avec des caractéristiques rassemblées dans l'annexe A.

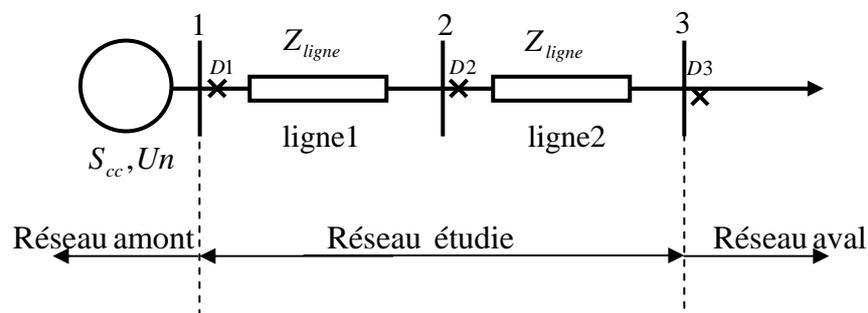


Figure IV-1 Schéma unifilaire du réseau d'étude

I. CALCUL DU COURT-CIRCUIT SANS LA GENERATION DISPERSÉE

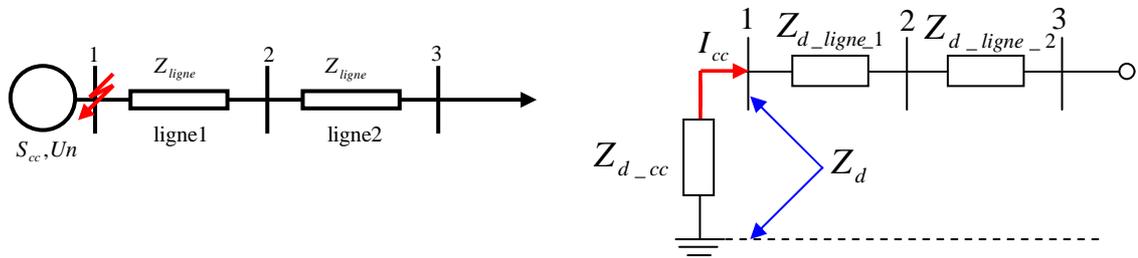
1) Court-circuit triphasé

Le courant de court circuit triphasé est donné par :

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_d}$$



1-1) Court-circuit triphasé dans la barre 1



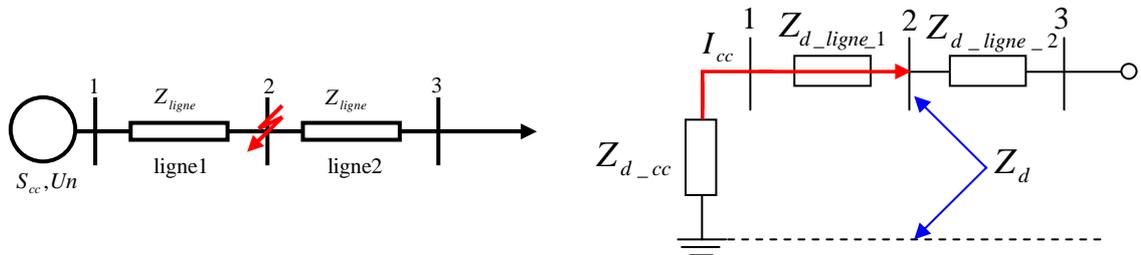
L'impédance directe vue entre la barre (1) et la terre est : $Z_d = Z_{d_cc}$

Implique que : $I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}}$ $I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}}$ $I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}}$

Remarque :

Les valeurs des impédances et des courants calculés sont mises dans deux tableaux à la fin de cette partie.

1-2) Court-circuit triphasé dans la barre 2

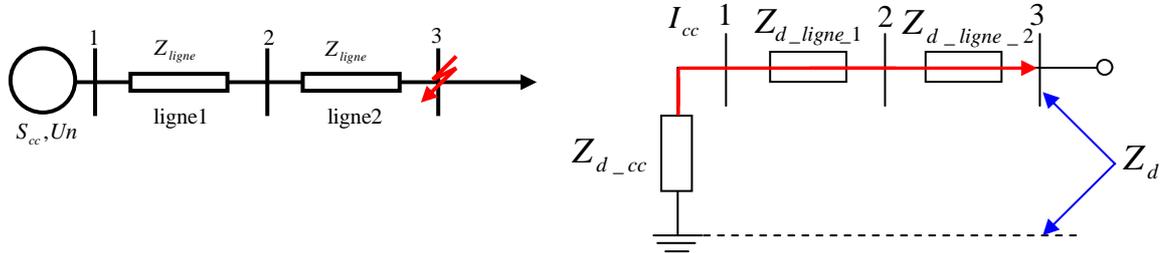


L'impédance directe vue entre la barre (2) et la terre est : $Z_d = Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}$

Implique que : $I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}}$ $I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}}$
 $I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}}$



1-3) Court-circuit triphasé dans la barre 3



L'impédance directe vue entre la barre (2) et la terre est : $Z_d = Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}$

$$\text{Implique que : } I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} \quad I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}}$$

$$I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}}$$

2) Court-circuit biphasé isolé

Le courant de court circuit biphasé isolé (entre la phase B et C) est donné par :

$$I_a = 0 \quad I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i} \quad I_c = j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

En général, l'impédance inverse est égale à l'impédance directe.

donc :

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_d} \quad I_c = j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_d}$$

En outre, l'impédance directe pour un court-circuit triphasé est la même pour un court circuit biphasé ou monophasé.



2-1) Court-circuit biphasé dans la barre 1

$$Z_d = Z_{d_cc}$$

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}} \quad I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}}$$

2-2) Court-circuit biphasé dans la barre 2

$$Z_d = Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}$$

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} \quad I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}}$$

2-3) Court-circuit biphasé dans la barre 3

$$Z_d = Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}$$

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}}$$

$$I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}}$$

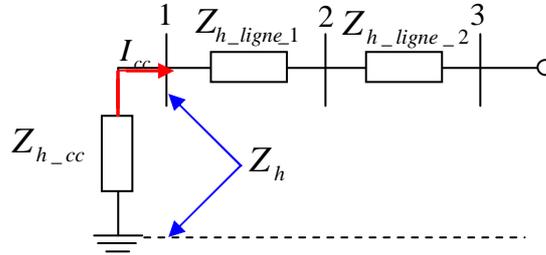
3) Court-circuit biphasé terre

Le courant de court circuit biphasé terre est donné par :

$$I_a = 0 \quad I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_h \cdot 1^{(-90)} + Z_i \cdot 1^{(-150)})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_h \cdot Z_i} \quad I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_h \cdot 1^{(+90)} + Z_i \cdot 1^{(+150)})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_h \cdot Z_i}$$



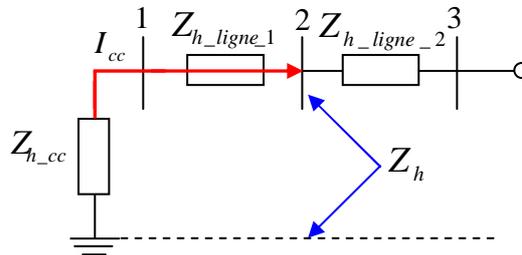
3-1) Court-circuit biphasé terre dans la barre 1



$$Z_h = Z_{h_cc}$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h_cc} \cdot 1^{\langle -90} + Z_i \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h_cc} + Z_{h_cc} \cdot Z_i} \quad I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h_cc} \cdot 1^{\langle +90} + Z_i \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h_cc} + Z_{h_cc} \cdot Z_i}$$

3-2) Court-circuit biphasé terre dans la barre 2



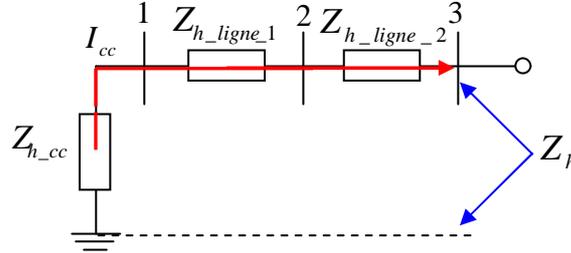
$$Z_h = Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot 1^{\langle -90} + Z_i \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot 1^{\langle +90} + Z_i \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot Z_i}$$



3-3) Court-circuit biphasé terre dans la barre 3



$$Z_h = Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) \cdot 1^{(-90)} + Z_i \cdot 1^{(-150)})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) \cdot 1^{(+90)} + Z_i \cdot 1^{(+150)})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) \cdot Z_i}$$

Les impédances directe et inverse sont égales, et elles se déduisent de la même manière qu'un court-circuit triphasé.

4) Court-circuit monophasé

Le courant de court circuit monophasé est donné par :

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad I_b = I_c = 0$$

4-1) Court-circuit monophasé terre dans la barre 1

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{2 \cdot Z_{d_cc} + Z_{h_cc}}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3 \cdot V_d^p}{2 \cdot Z_{d_cc} + Z_{h_cc} + 3 \cdot Z_H}$$

**4-2) Court-circuit monophasé terre dans la barre 2**

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1})}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + 3.Z_H}$$

4-3) Court-circuit monophasé terre dans la barre 3

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2})}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + 3.Z_H}$$

Barre en court-circuit	Z_d		Z_i		Z_h	
	Mod [Ω]	Arg [deg]	Mod [Ω]	Arg [deg]	Mod [Ω]	Arg [deg]
1	3,2	71,56	3,2	71,56	9,6	71,56
2	6,66	55,5	6,66	55,5	19,98	55,5
3	10,27	50,5	10,27	50,5	30,81	50,5

Tableau IV.1 : Différentes impédances vue par les barres sans la GD



Type de court circuit	Courant de court circuit	Barre en court-circuit					
		1		2		3	
		Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]
3 Φ	Ligne 1	0	--	1733.8	-55.5	1124.34	-50.50
	Ligne 2	0	--	0	--	1124.34	-50.50
	I _{cc} barre	3608	-71.8	1733.8	-55.5	1124.34	-50.50
2 Φ	Ligne 1	0	--	1501.5	-55.5	973.7	-50.50
	Ligne 2	0	--	0	--	973.7	-50.50
	I _{cc} barre	3125	-71.8	151.5	-55.5	973.7	-50.50
2 Φ -T	Ligne 1	0	--	1543	-20.6	1000.7	-25.6
	Ligne 2	0	--	0	--	1000.7	-25.6
	I _{cc} barre	3211	-4.3	1543	-20.6	1000.7	-25.6
1 Φ -T	Ligne 1	0	--	1040	-55.5	674.6	-50.50
	Ligne 2	0	--	0	--	674.6	-50.50
	I _{cc} barre	2165	-71.8	1040	-55.5	674.6	-50.50

Tableau IV-2 : Courant de court-circuit sans la GD



II. CALCUL DU COURT-CIRCUIT AVEC LA GENERATION DISPERSÉE

Du point de vue des puissances, l'intégration d'une nouvelle source d'énergie dans les réseaux de distribution va augmenter la puissance du réseau. Ainsi la nouvelle source sera modélisée d'une façon à prendre seulement sa contribution en courant en cas d'un court-circuit.

En supposant que le plan des tensions n'est pas infecté (ou dans les limites autorisées $\pm 10\%$) par l'intégration du **GD**; et c'est le cas où une technique de réglage de la tension est basée sur l'injection de la puissance active et réactive dans le réseau électrique. Cela signifie que la méthode des composantes symétriques reste valable pour le calcul. De ce fait, la nouvelle source d'énergie sera représentée par une impédance de court-circuit

$$Z_{cc_GD} = U^2 / P_{cc_GD}$$

Comme on l'a déjà vu dans l'introduction générale, la **GD** sera intégrée dans le réseau sans que les autres sources centralisées aient le moindre contrôle sur elle, le raccordement s'effectue à travers un transformateur **MT/MT** couplé en triangle/étoile et le neutre est mis directement à la terre, pour bénéficier de l'isolement galvanique et la réduction du courant de court circuit monophasé (qui représente les 80% de la majorité des défauts). Alors on peut superposer les deux cas :

- ✓ **1^{er} cas** : Le courant de court circuit sans GD, $I_{cc}|_{réseau}$
- ✓ **2^{ème} cas** : Le courant de court circuit injecté dans le réseau seulement par la GD, $I_{cc}|_{GD}$

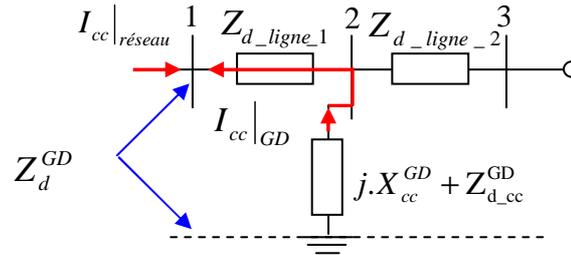
Et le courant dans le point de défaut sera la somme :

$$I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$$



1) Court-circuit triphasé

1-1) Court-circuit triphasé dans la barre 1



L'impédance directe vue entre la barre (1) et la terre est :

$$Z_d^{GD} = Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}$$

$$\text{donc : } I_a|_{GD} = \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}} \quad I_b|_{GD} = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}}$$

$$I_c|_{GD} = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}}$$

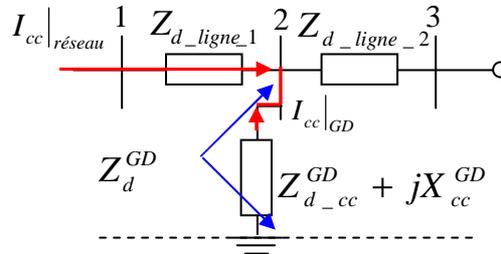
$$\text{Avec } I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$$

On trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}} + \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}} \\ I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}} + a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}} \\ I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}} + a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_ligne_1} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_cc}^{GD}} \end{array} \right.$$



1-2) Court-circuit triphasé dans la barre 2



L'impédance directe vue entre la barre (2) et la terre est : $Z_d^{GD} = Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}$

$$\text{Implique que : } I_a|_{GD} = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}} \quad I_b|_{GD} = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}}$$

$$I_c|_{GD} = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}}$$

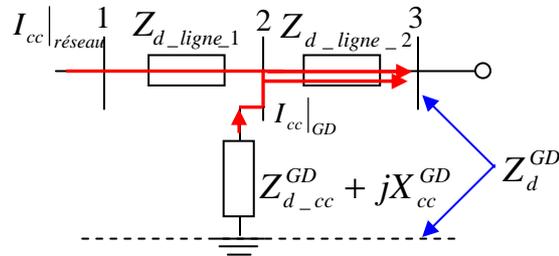
Avec $I_{cc} = I_{cc}|_{reseau} + I_{cc}|_{GD}$

On trouve

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} + \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}} \\ I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} + a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}} \\ I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} + a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j \cdot X_{cc}^{GD}} \end{array} \right.$$



1-3) Court-circuit triphasé dans la barre 3



L'impédance directe vue entre la barre (3) et la terre est : $Z_d^{GD} = Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}$

$$\text{Implique que : } I_a|_{GD} = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}} \quad I_b|_{GD} = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}}$$

$$I_c|_{GD} = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}}$$

Avec $I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$

On trouve

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} + \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}} \\ I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} + a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}} \\ I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} + a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}} \end{array} \right.$$



2) Court-circuit biphasé isolé

2-1) Court-circuit biphasé isolé dans la barre 1

$$Z_d^{GD} = Z_{d_ligne_1} + Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}$$

$$I_a = 0 \quad I_b|_{GD} = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_ligne_1} + Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}}$$

$$I_c|_{GD} = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_ligne_1} + Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}}$$

Avec $I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_ligne_1} + Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}} \\ I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_ligne_1} + Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}} \end{cases}$$

2-2) court-circuit biphasé isolé dans la barre 2

$$Z_d^{GD} = Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}$$

$$I_a = 0 \quad I_b|_{GD} = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}} \quad I_c|_{GD} = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}}$$

Avec $I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}} \\ I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + j.X_{cc}^{GD}} \end{cases}$$



2-3) court-circuit biphasé isolé dans la barre 3

$$Z_d^{GD} = Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2} + j.X_{cc}^{GD}$$

$$I_a = 0 \quad I_b|_{GD} = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2} + j.X_{cc}^{GD}}$$

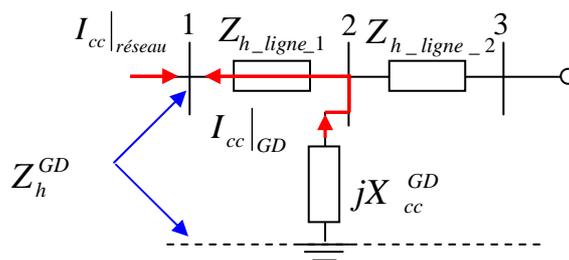
$$I_c|_{GD} = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2} + j.X_{cc}^{GD}}$$

Avec $I_{cc} = I_{cc}|_{réseau} + I_{cc}|_{GD}$

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2} + j.X_{cc}^{GD}} \\ I_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_d^P}{Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2} + j.X_{cc}^{GD}} \end{cases}$$

3) Court-circuit biphasé terre

3-1) Court-circuit biphasé terre dans la barre 1



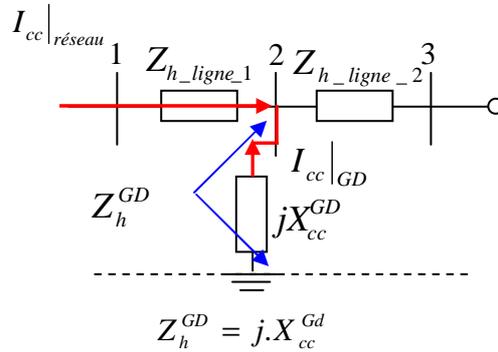
$$Z_h^{GD} = j.X_{cc}^{GD} + Z_{h_ligne_1}$$



Implique :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = 0 \\ I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h_cc} \cdot 1^{\langle -90} + Z_i \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h_cc} + Z_{h_cc} \cdot Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j \cdot X_{cc}^{GD} + Z_{h_ligne_1}) \cdot 1^{\langle -90} + Z_i^{GD} \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d^{GD} \cdot Z_i^{GD} + Z_d^{GD} \cdot (Z_{h_ligne_1} + j \cdot X_{cc}^{GD}) + (Z_{h_ligne_1} + j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot Z_i^{GD}} \\ I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h_cc} \cdot 1^{\langle +90} + Z_i \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h_cc} + Z_{h_cc} \cdot Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j \cdot X_{cc}^{GD} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_cc}^{GD}) \cdot 1^{\langle +90} + Z_i^{GD} \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d^{GD} \cdot Z_i^{GD} + Z_d^{GD} \cdot (Z_{h_ligne_1} + j \cdot X_{cc}^{GD}) + (Z_{h_ligne_1} + j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot Z_i^{GD}} \end{array} \right.$$

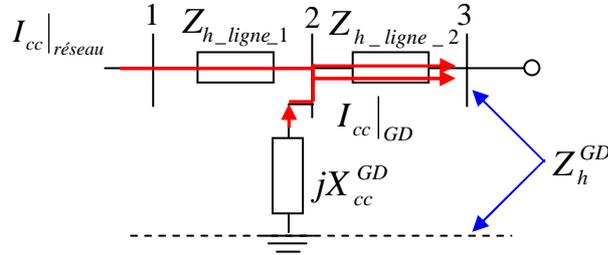
3-2) Court-circuit biphasé terre dans la barre 2



$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = 0 \\ I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot 1^{\langle -90} + Z_i \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot 1^{\langle -90} + Z_i^{GD} \cdot 1^{\langle -150})}{Z_d^{GD} \cdot Z_i^{GD} + Z_d^{GD} \cdot (j \cdot X_{cc}^{GD}) + (j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot Z_i^{GD}} \\ I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot 1^{\langle +90} + Z_i \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) \cdot Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot 1^{\langle +90} + Z_i^{GD} \cdot 1^{\langle +150})}{Z_d^{GD} \cdot Z_i^{GD} + Z_d^{GD} \cdot (j \cdot X_{cc}^{GD}) + (j \cdot X_{cc}^{GD}) \cdot Z_i^{GD}} \end{array} \right.$$



3-3) Court-circuit biphasé terre dans la barre 3



$$Z_h^{GD} = j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}^{GD}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = 0 \\ I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}).1^{\langle -90} + Z_i.1^{\langle -150})}{Z_d.Z_i + Z_d.(Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}).Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}).1^{\langle -90} + Z_i^{GD}.1^{\langle -150})}{Z_d^{GD}.Z_i^{GD} + Z_d^{GD}.(j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}) + (j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}).Z_i^{GD}} \\ I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p ((Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}).1^{\langle +90} + Z_i.1^{\langle +150})}{Z_d.Z_i + Z_d.(Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}).Z_i} \\ \quad + \sqrt{3} \frac{V_d^p ((j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}).1^{\langle +90} + Z_i^{GD}.1^{\langle +150})}{Z_d^{GD}.Z_i^{GD} + Z_d^{GD}.(j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}) + (j.X_{cc}^{Gd} + Z_{h_ligne_2}).Z_i} \end{array} \right.$$

4) Court-circuit monophasé

4-1) Court-circuit monophasé terre dans la barre 1

$$I_a = \frac{3.V_d^p}{2.Z_{d_cc} + Z_{h_cc}} + \frac{3.V_d^p}{2.Z_{d_cc}^{GD} + (Z_{h_ligne_1} + jX_{cc}^{GD})}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3.V_d^p}{2.Z_{d_cc} + Z_{h_cc} + 3.Z_H} + \frac{3.V_d^p}{2.Z_{d_cc}^{GD} + (Z_{h_ligne_1} + jX_{cc}^{GD}) + 3.Z_H}$$



4-2) Court-circuit monophasé terre dans la barre 2

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}) + Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}} + \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc}^{GD}) + jX_{cc}^{GD}}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1}) + 3.Z_H} + \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc}^{GD}) + jX_{cc}^{GD} + 3.Z_H}$$

4-3) Court-circuit monophasé terre dans la barre 3

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2})} + \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}) + jX_{cc}^{GD} + Z_{h_ligne_2}}$$

si le court circuit s'effectue à travers une impédance Z_H , le courant sera :

$$I_a = \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc} + Z_{d_ligne_1} + Z_{d_ligne_2}) + (Z_{h_cc} + Z_{h_ligne_1} + Z_{h_ligne_2}) + 3.Z_H} + \frac{3.V_d^P}{2.(Z_{d_cc}^{GD} + Z_{d_ligne_2}) + jX_{cc}^{GD} + Z_{h_ligne_2} + 3.Z_H}$$

Barre en court-circuit	Z_d		Z_i		Z_h	
	Mod [Ω]	Arg [deg]	Mod [Ω]	Arg [deg]	Mod [Ω]	Arg [deg]
1	11.7	63.12	11.7	63.12	11.89	45.9
2	8.38	72.4	8.38	72.4	1.2	90
3	11.7	63.12	11.7	63.12	11.89	45.9

Tableau IV-3 : Différentes impédances vue par les barres avec la GD



Type de court-circuit	Barre en court-circuit					
	1		2		3	
	Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]
3Φ	987	-63.12	1378	-72.4	987	-63.12
2Φ	854.7	-63.12	1193.4	-72.4	854.7	-63.12
2Φ-T	897.3	29.5	2074.5	68.7	897.3	29.5
1Φ	989.3	-57.33	1955.2	-73.6	989.3	-57.33

Tableau IV-4 : Courant de contribution par la GD

Type de court circuit	Courant de court circuit	Barre en court-circuit					
		1		2		3	
		Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]	Mod [A]	Arg [deg]
3Φ	Ligne 1	987	-63.12	1733.8	-55.5	1124.34	-50.50
	Ligne 2	0	0	0	--	2098.6	-56.4
	I _{cc} barre	4586	-67	3078.46	-63	2098.6	-56.4
2Φ	Ligne 1	854.7	-63.12	1501.5	-55.5	973.7	-50.50
	Ligne 2	0	--	0	--	1817.4	-56.4
	I _{cc} barre	3971.87	-67	2666.03	-55.5	1817.4	-56.4
2Φ-T	Ligne 1	897.3	29.5	1543	-20.6	1000.7	-25.6
	Ligne 2	0	--	0	--	1683.4	0.32
	I _{cc} barre	3988	2.3	2600.5	32.3	1683.4	0.32
1Φ-T	Ligne 1	989.3	-57.33	1040	-55.5	674.6	-50.50
	Ligne 2	0	--	0	--	1661.15	-54.6
	I _{cc} barre	3132.7	-67.27	2941.6	67.3	1661.15	-54.6

Tableau IV-5 : Courant de court-circuit avec la GD



III. SIMULATION EN MATLAB

Le réseau à simuler est représenté par bloc fonctionnel (figure IV-2). Les caractéristiques de ce réseau sont données dans l'annexe A.

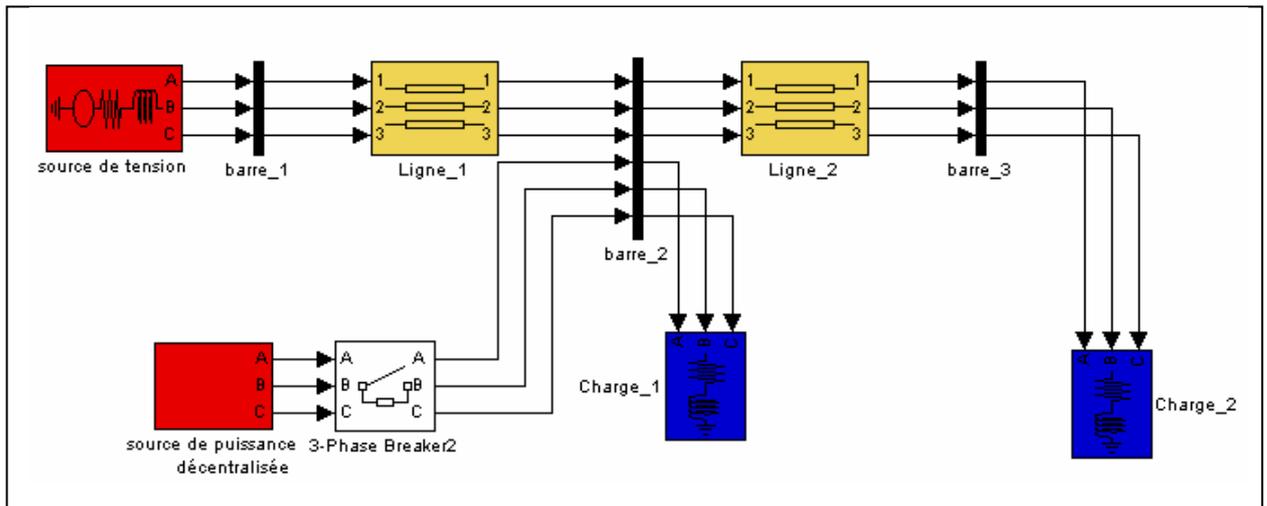


Figure IV-2 - Réseau simulé

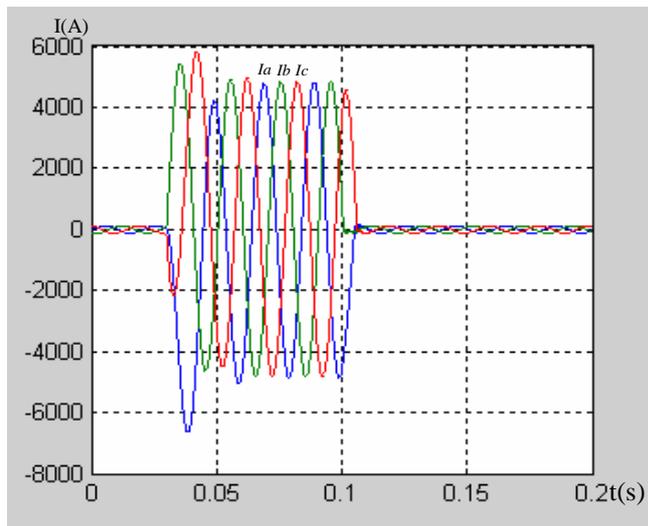
1) Simulation sans la production décentralisée

- ✓ temps de simulation = 0,2s ;
- ✓ durée de court-circuit = 0,07s (de 0,03s à 0,1s).

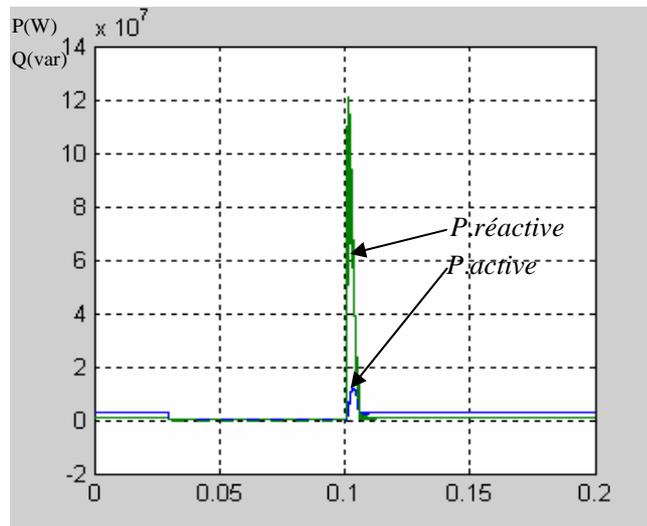


a) court-circuit dans la barre 1

a.1) court-circuit triphasé

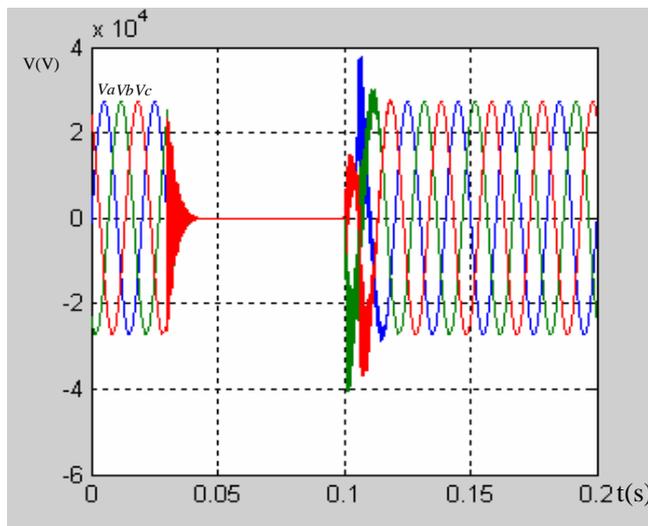


a) Courants dans la barre 1

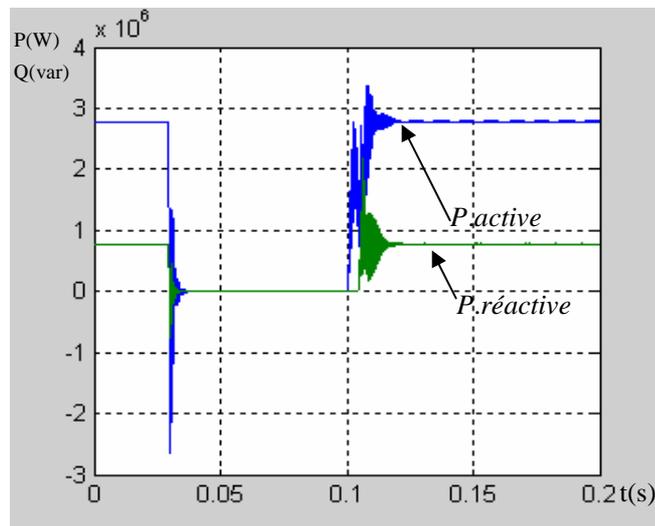


b) Puissances dans la barre 1

Figure IV-3



a) Tensions dans la barre 2

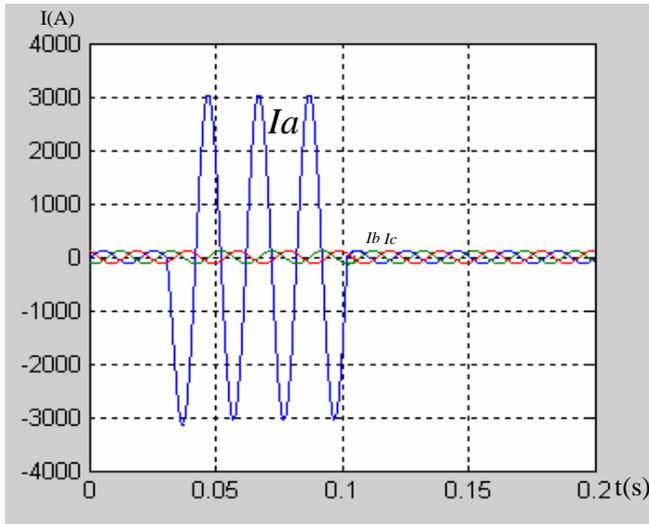


b) Puissances dans la barre 2

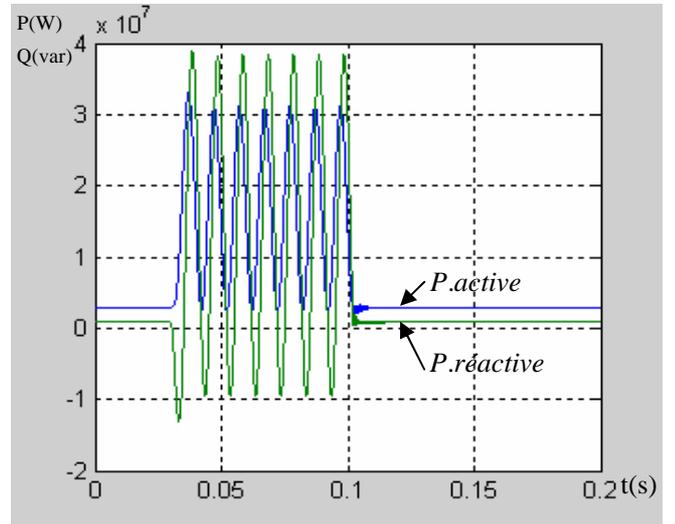
Figure IV-4



a.2) court-circuit monophasé

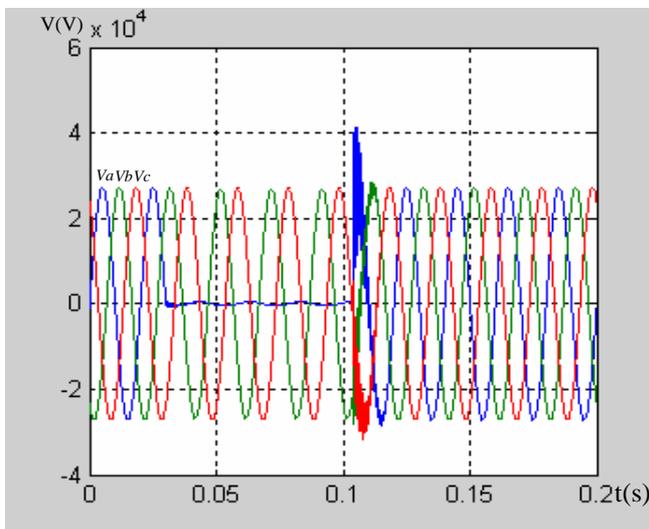


a) Courants dans la barre 1

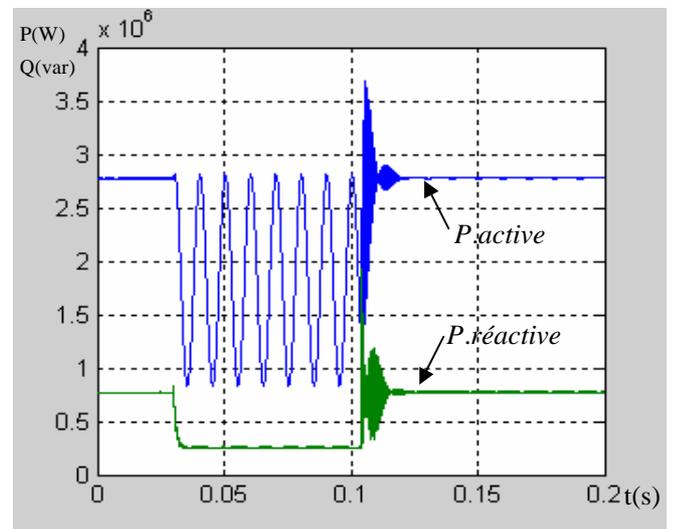


b) Puissances dans la barre 1

Figure IV-5



a) Tensions dans la barre 2



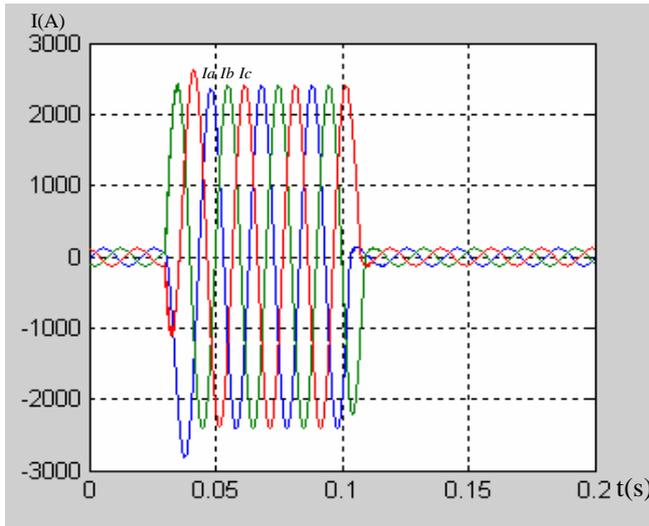
b) Puissances dans la barre 2

Figure IV-6

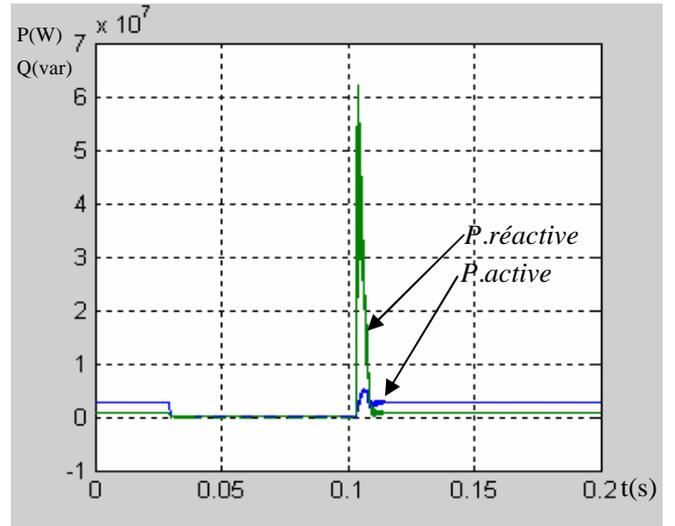


b) court-circuit dans la barre 2

b.1) court-circuit triphasé



a) Courants dans la barre 2



b) Puissances dans la barre 2

Figure IV-7

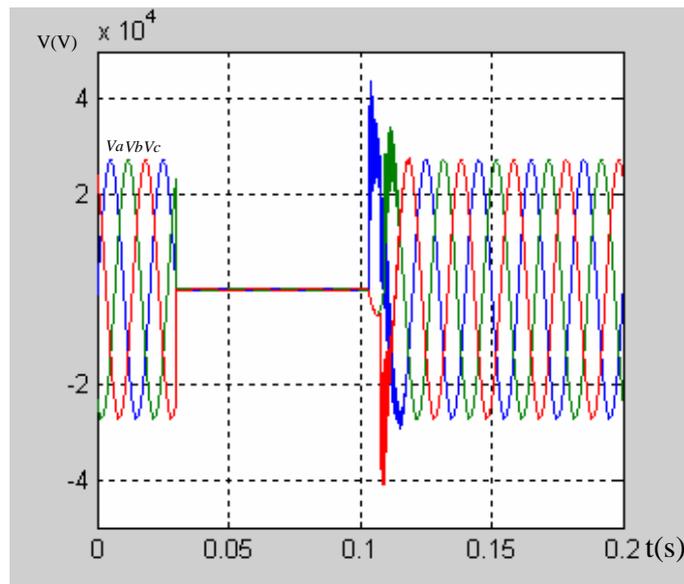
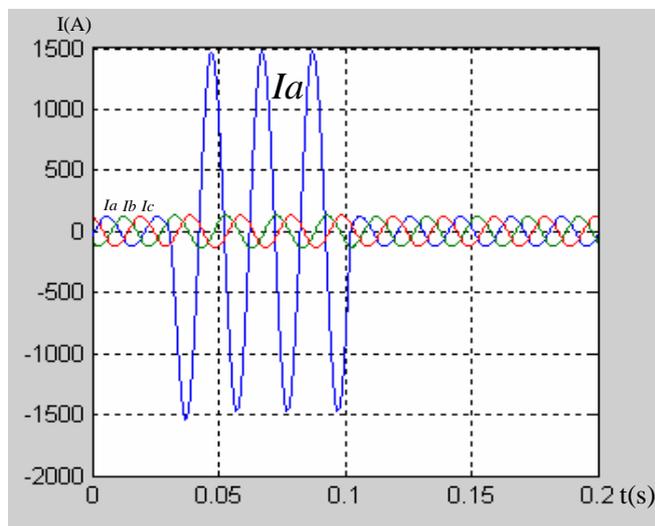


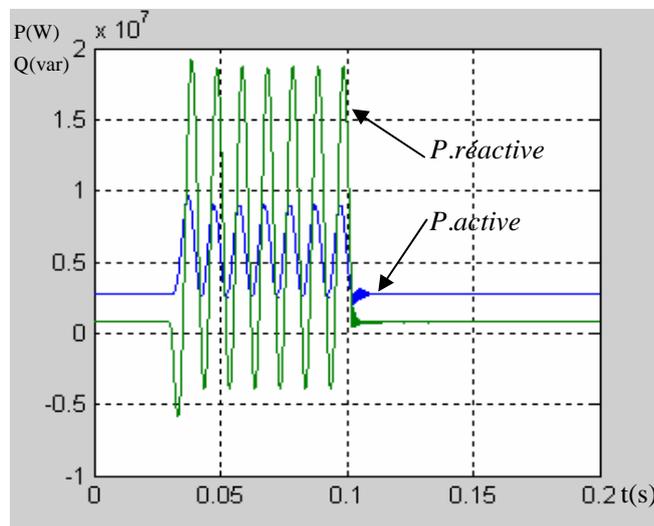
Figure IV-8 Tensions dans la barre 2



b.2) court-circuit monophasé



a) Courants dans la barre 2



b) Puissances dans la barre 2

Figure IV-9

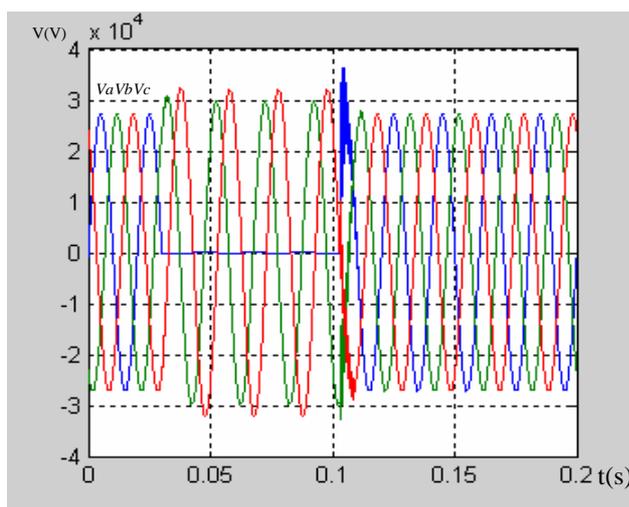
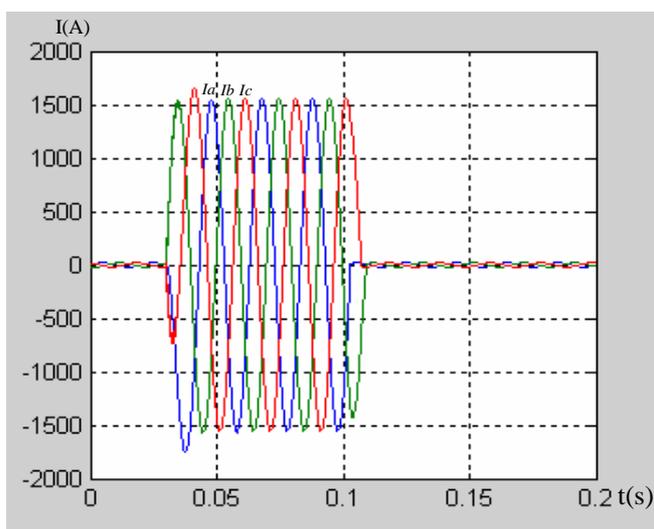


Figure IV-10 Tensions dans la barre 2

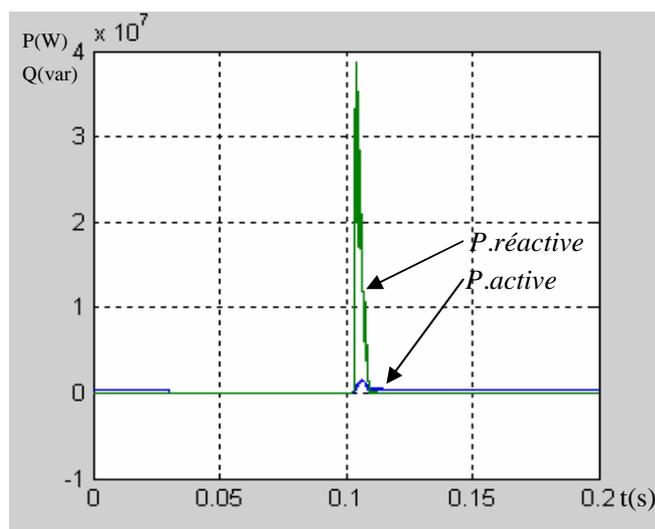


c) court-circuit dans la barre 3

c.1) court-circuit triphasé

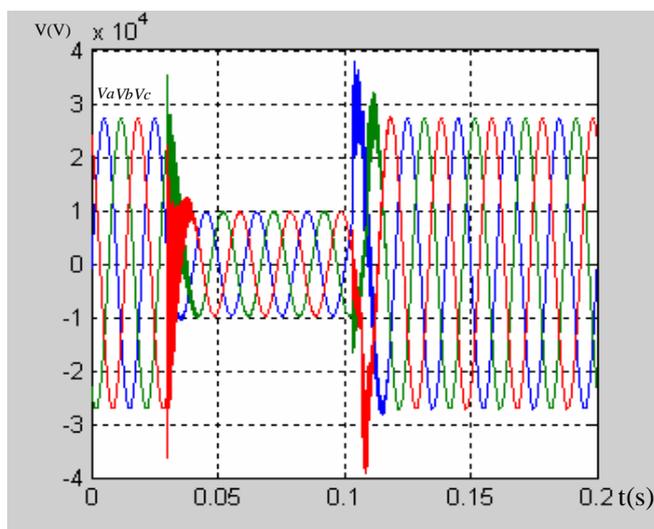


a) Courants dans la barre 3

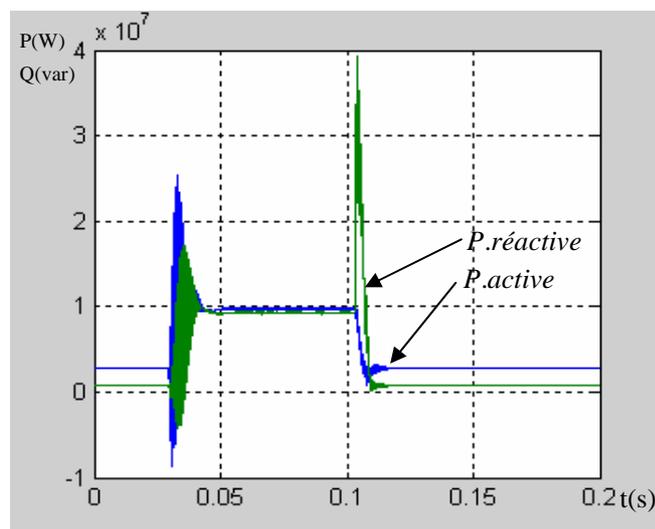


b) Puissances dans la barre 3

Figure IV-11



a) Courants dans la barre 2

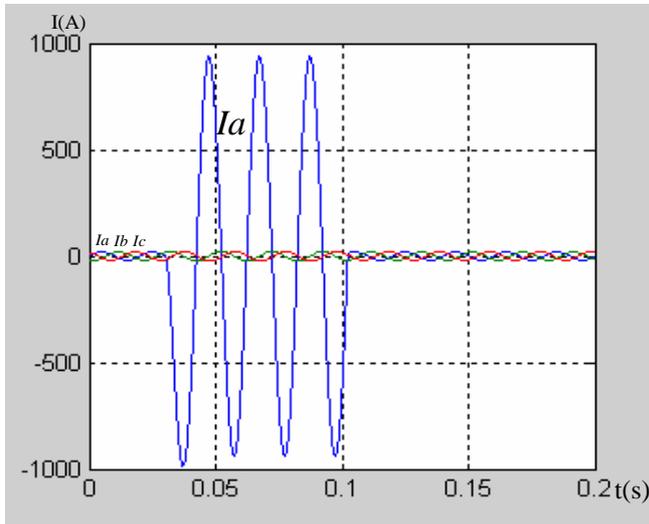


b) Puissances dans la barre 2

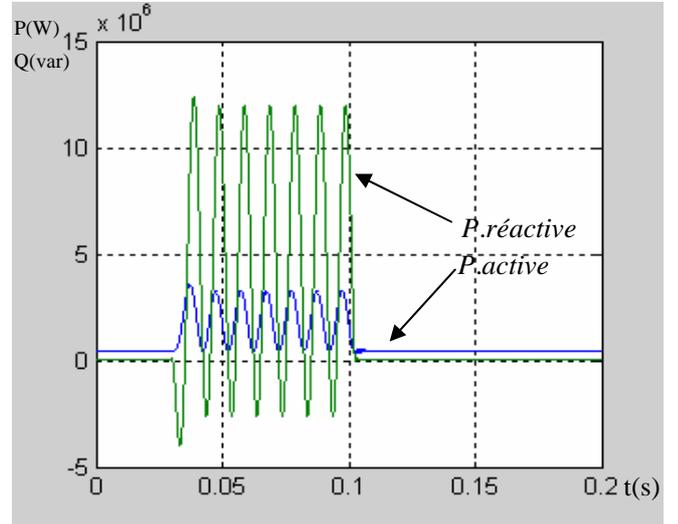
Figure IV-12



c.2) court-circuit monophasé

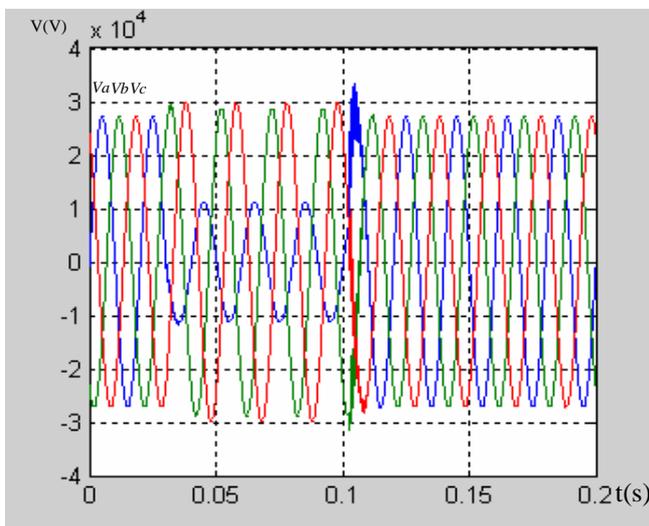


a) Courants dans la barre 3

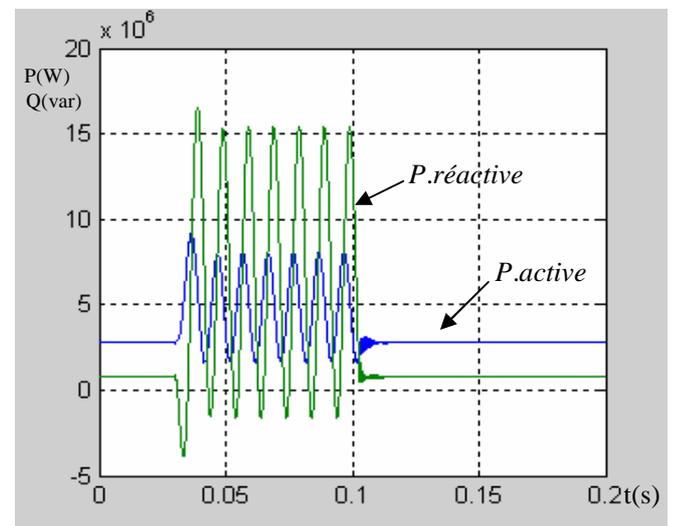


b) Puissances dans la barre 3

Figure IV-13



a) Courants dans la barre 2



b) Puissances dans la barre 2

Figure IV-14

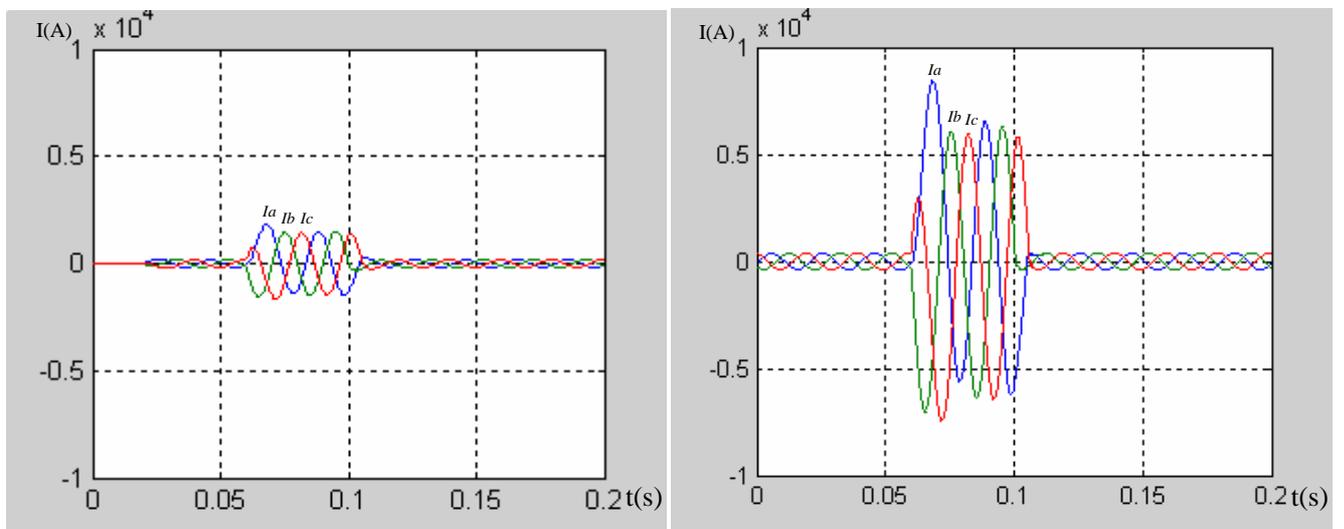


2) Simulation avec la production décentralisée

- ✓ temps de simulation = 0,2s ;
- ✓ l'instant du couplage de la GD = 0,04s ;
- ✓ durée de court-circuit = 0,04(de 0,06 a 0,1s).

a) court-circuit dans la barre 1

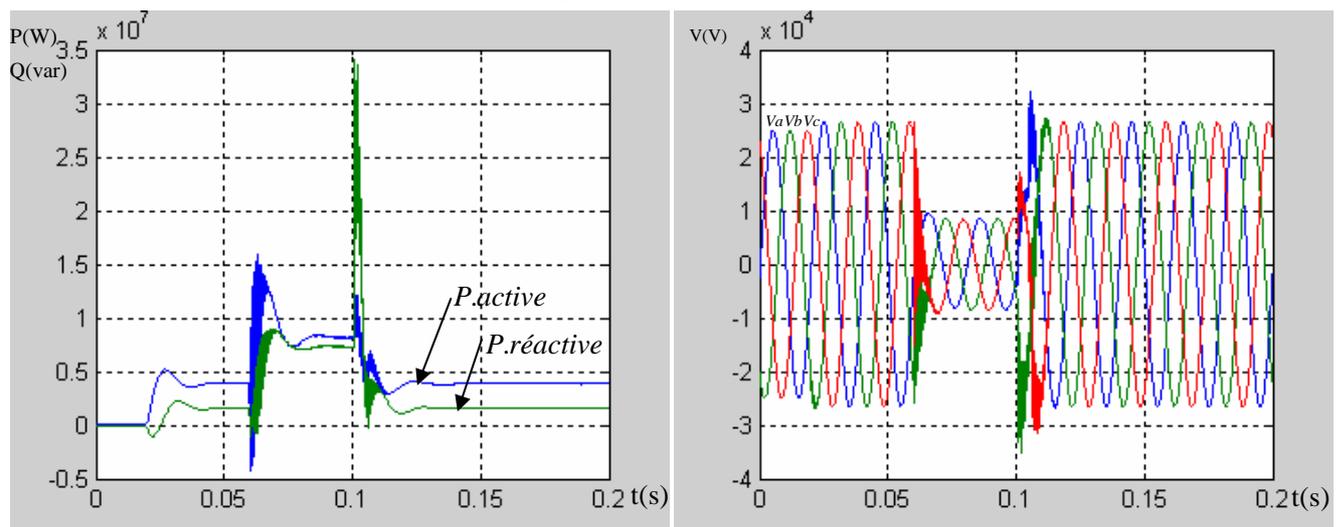
a.1) court-circuit triphasé



a) Courants de contribution de la GD

b) Courants dans la barre 1

Figure IV-15



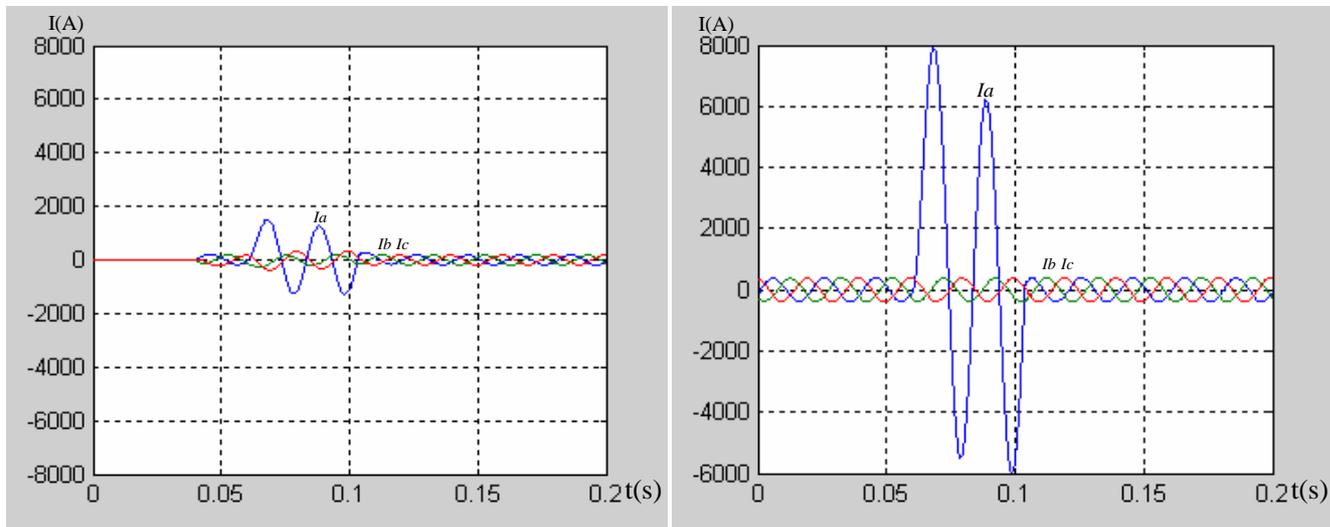
a) Puissances de contribution de la GD

b) Tensions dans la barre 1

Figure IV-16



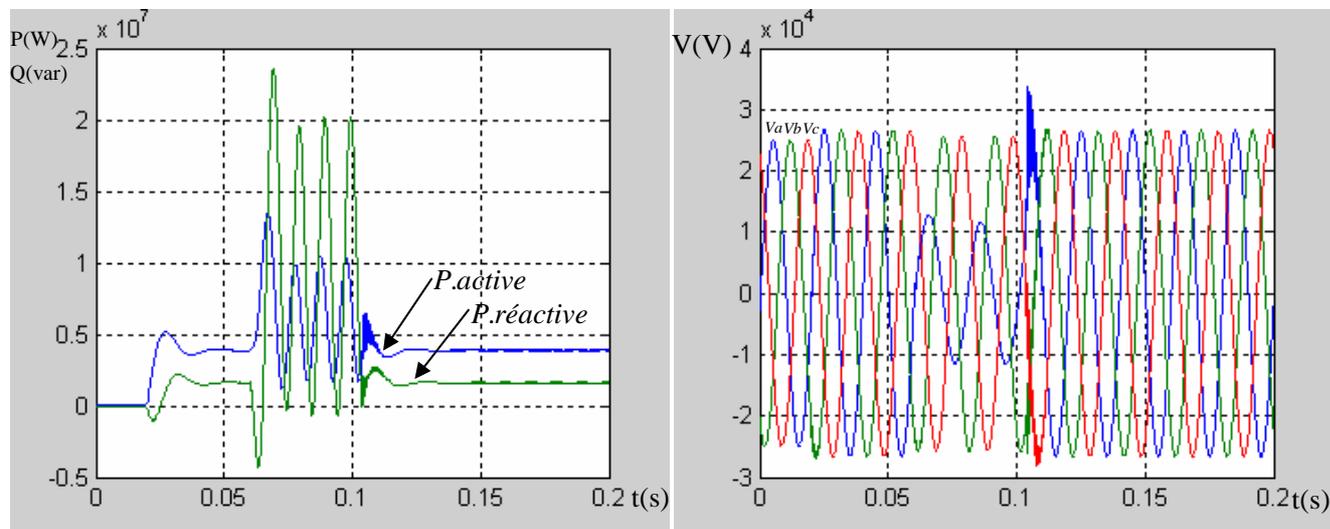
a.2) court-circuit monophasé



a) Courants de contribution de la GD

b) Courants dans la barre 1

Figure IV-17



a) Puissances de contribution par GD

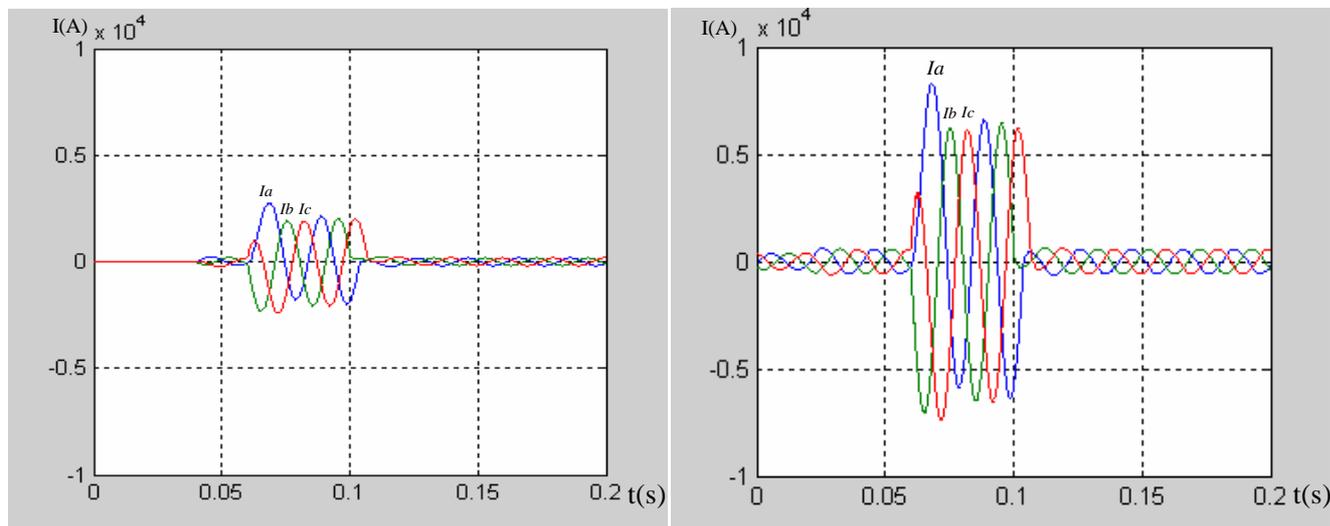
b) Tensions dans la barre 2

Figure IV-18



b) court-circuit dans la barre 2

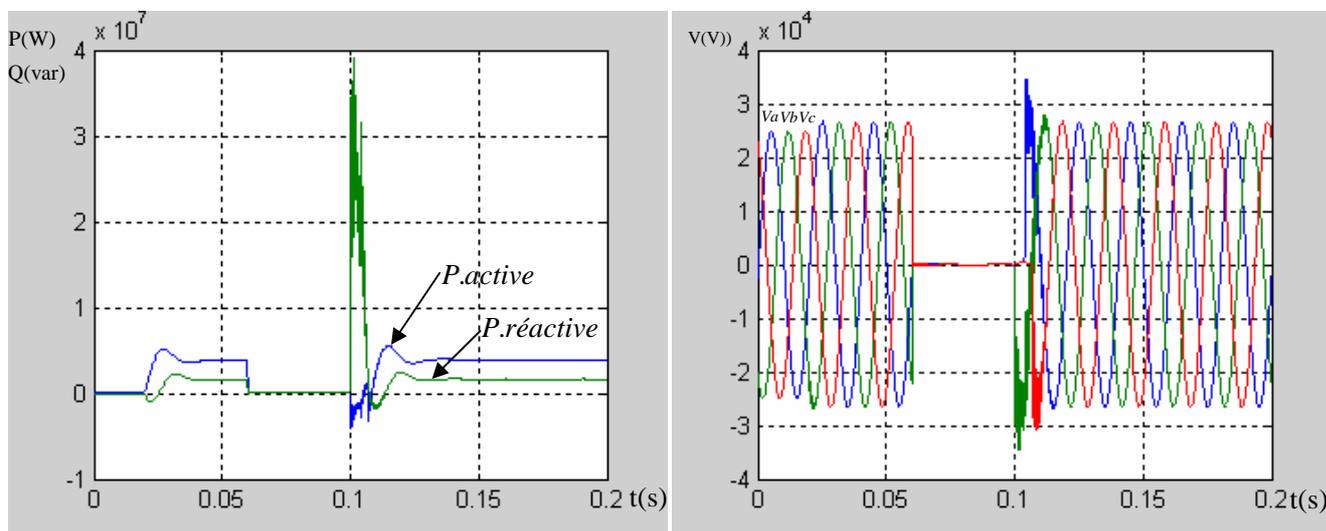
b.1) court-circuit triphasé



a) Courants de contribution de la GD

b) Courants dans la barre 2

Figure IV-19



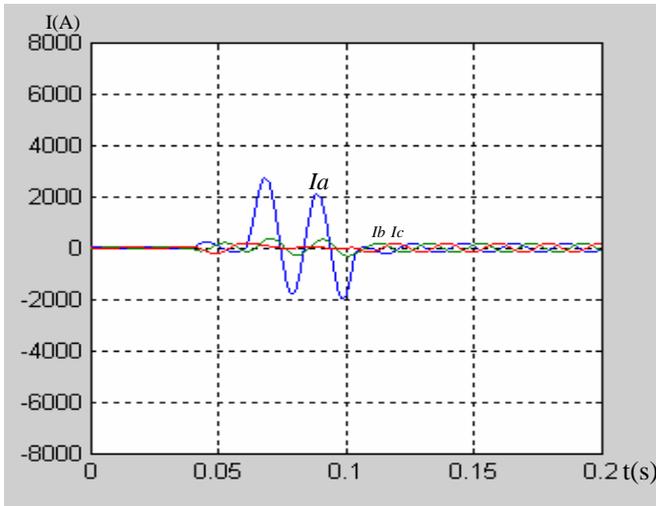
a) Puissances de contribution par GD

b) Tensions dans la barre 2

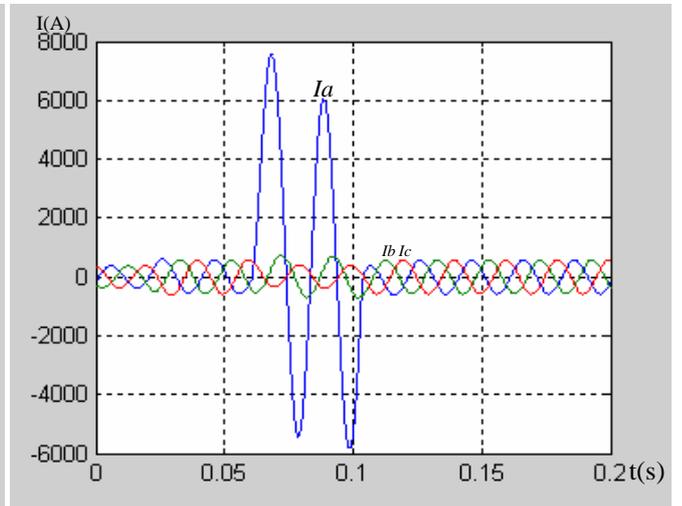
Figure IV-20



b.2) court-circuit monophasé

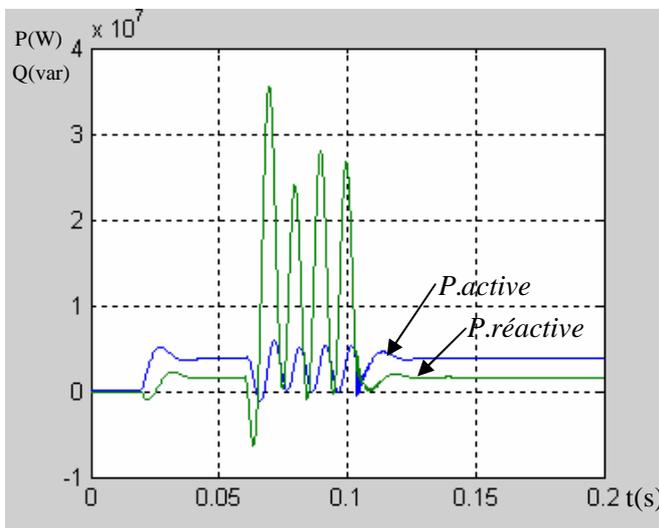


a) Courants de contribution de la GD

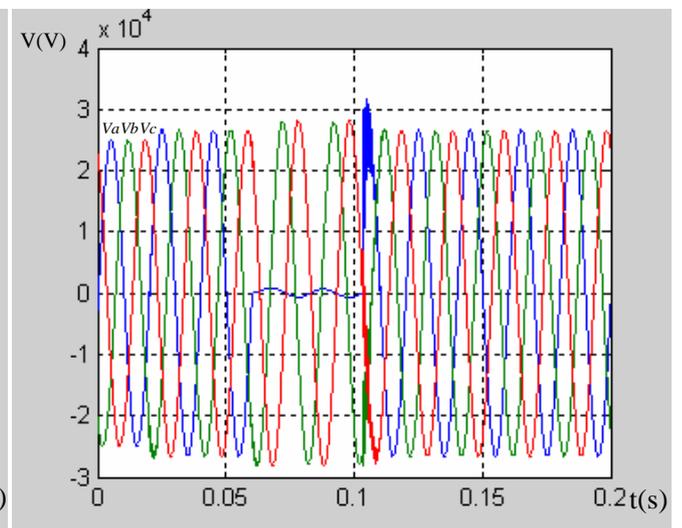


b) Courants dans la barre 2

Figure IV-21



a) Puissances de contribution par GD



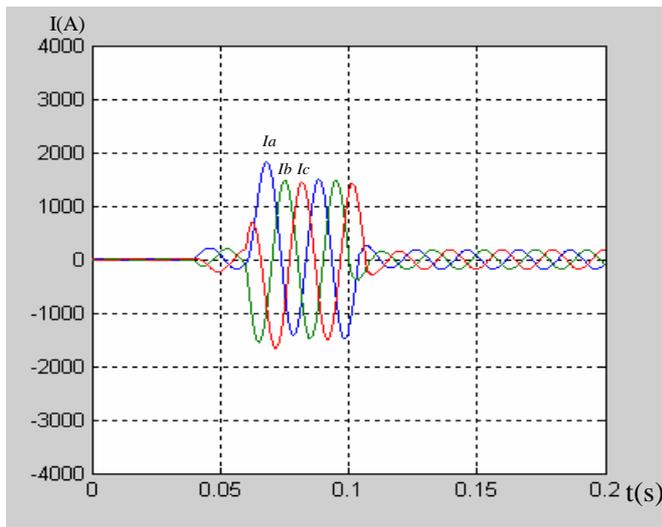
b) Tensions dans la barre 2

Figure IV-22

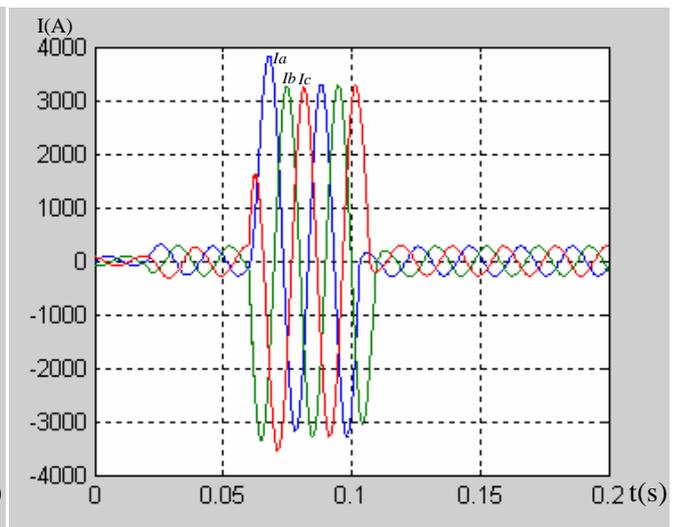


c) court-circuit dans la barre 3

c.1) court-circuit triphasé

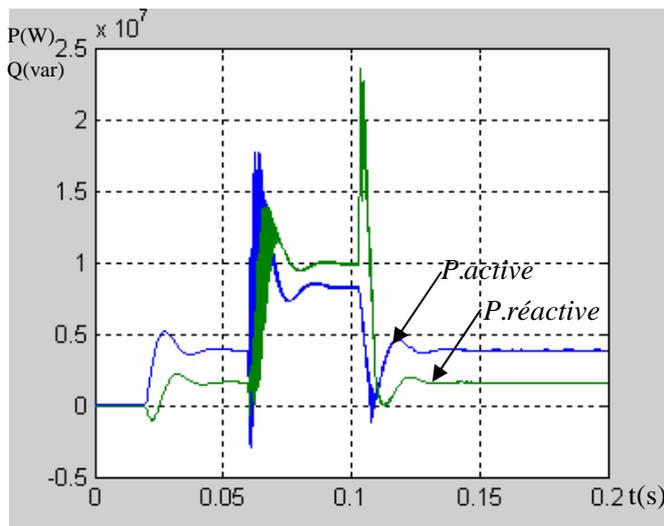


a) Courants de contribution de la GD

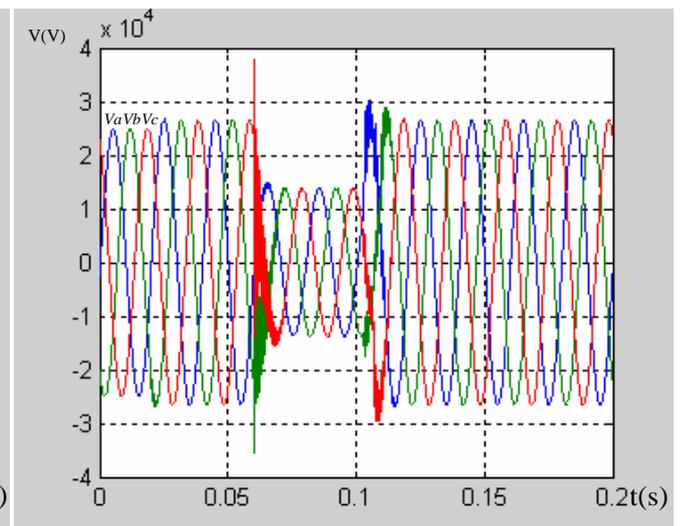


b) Courants dans la barre 3

Figure IV-23



a) Puissances de contribution par GD



b) Tensions dans la barre 2

Figure IV-24



c.2) court-circuit monophasé

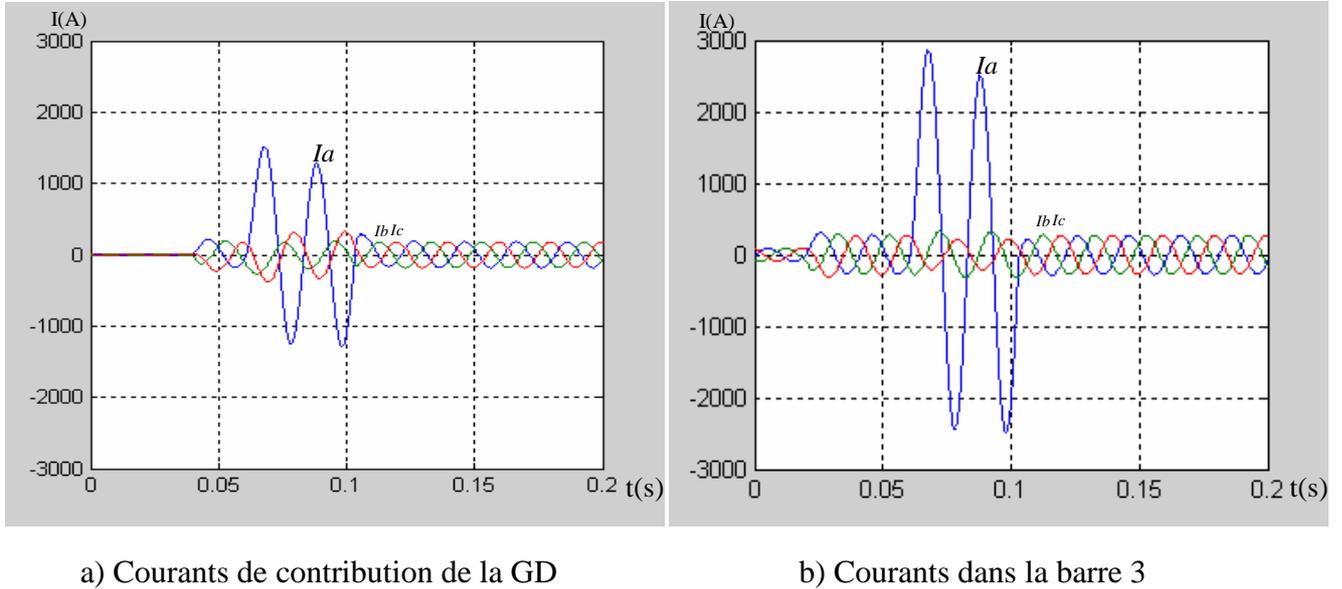


Figure IV-25

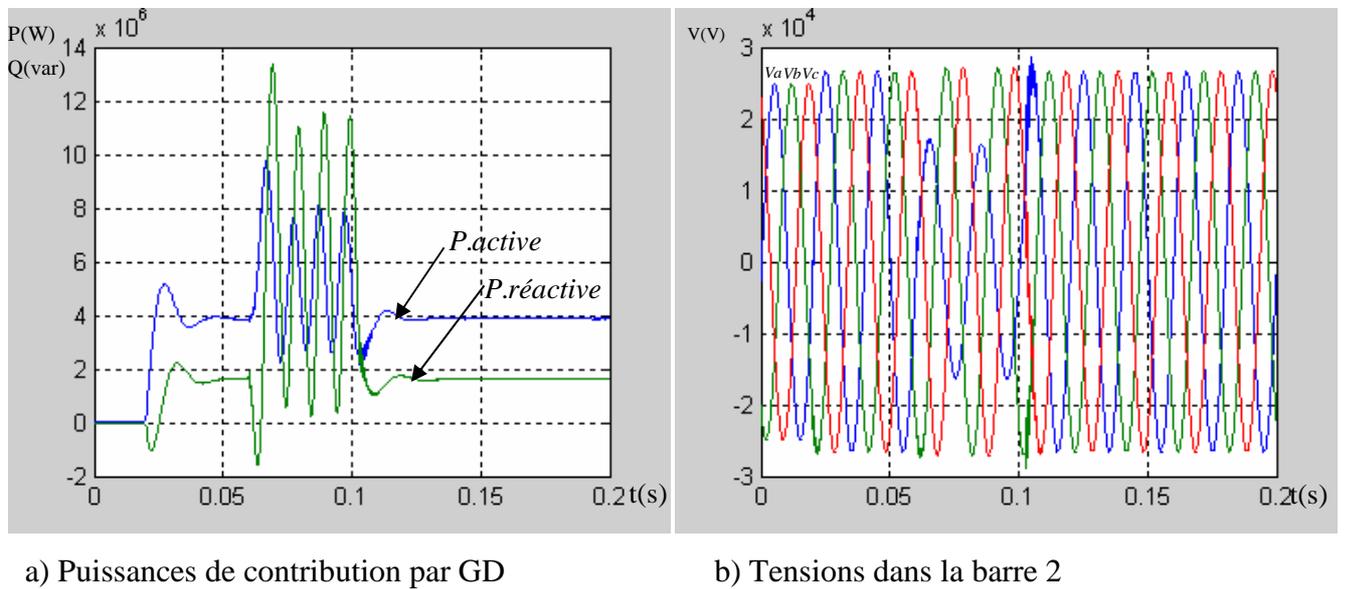


Figure IV-26



IV. ANALYSE DES RESULTATS

En examinant les résultats obtenus par le calcul (tableau IV-2 p.51 et IV-5 p.61), on peut dire que la **GD** a augmenté au point de défauts les valeurs des courants de court-circuit. Cette augmentation sera traduite par une augmentation des dégâts au niveau des matériels constituant le réseau électrique.

Pour les défauts situés en amont de la **GD**, les courants provenant du réseau amont causés par un court-circuit dans la **barre 1**, restent les mêmes, mais la **ligne 1** sera parcourue par un courant provenant de la **GD** (pour l'exemple d'étude, le courant d'un court-circuit triphasé égale à 987 A) ne peut être détecté par le **disjoncteur D1** situé au début de la **ligne 1** qui est sensée fonctionner dans un intervalle $1732 A < I_{cc} < 2165 A$. Par conséquent, le disjoncteur de découplage de la **GD** va intervenir pour découpler la **GD** du réseau après un retard de quelques secondes (2 à 3s [MIC_03]).

La déconnexion de la **GD** ne sera pas une solution techniquement envisageable due aux deux points suivants :

- chute de la puissance du réseau
- demande du temps pour être couplée à nouveau.

De même, si on diminue le courant de déclenchement du **disjoncteur D1** pour qu'il puisse détecter ce courant (987 A), cette action va mettre sa sélectivité en question (un courant vu par **D1** lors d'un court-circuit à la **barre 3** est de 1124 A).

Pour les courts-circuits situés en aval de la **GD**, où le disjoncteur **D2** est sensé les éliminer, le courant maximal est de 1124 A ; avec la contribution de la **GD**, le courant augmente à 2098 A, et cette valeur dépasse le pouvoir de coupure du **disjoncteur D2** qui est généralement égale à $1,3 \cdot I_{cc3\phi}$.



En outre, la **ligne2** qui est dimensionnée pour les pires des cas (un court-circuit triphasé) pour supporter 1124 A, va être surchauffée par un courant de 2098 A jusqu'à l'intervention du disjoncteur de découplage de la **GD**, après la déconnexion de la **GD**, le **disjoncteur D2** peut couper le courant de court-circuit.

Pour un court-circuit dans la **barre 2** (barre de raccordement de la **GD**) le fonctionnement du **disjoncteur D1** ne va pas être influencé par la **GD**, mais la **GD** va se déconnecter pour assurer sa protection.

Les résultats obtenus par la simulation montrent qu'un court-circuit est toujours accompagné par des chutes de tension voire une tension nulle.

Dans le cas où la production décentralisée est connectée, la contribution en courant et en puissance active et réactive seront la clé de la troisième partie, où on va traiter une technique pour minimiser le courant de court-circuit en contrôlant la puissance active et réactive injectée dans le réseau électrique lors d'un court-circuit.

V. CONCLUSION

L'insertion d'une source d'énergie dans le réseau de distribution de HTA (moyenne tension) a des conséquences sur le fonctionnement de la protection, ainsi la sélectivité est mise en cause ; une autre conséquence est celle de l'augmentation des courants de court-circuit, ce qui va accélérer le vieillissement du matériel.

Pour la sélectivité, le problème pourra être résolu en adoptant des méthodes et des appareils plus au moins sophistiqués, par exemple les **IPD** (Indicateur de Passage de Défaut [CON_05]). En revanche, le problème de l'augmentation des courants de court-circuit ne peut être résolu que par l'adaptation d'une technique qui nous permet de minimiser la contribution de la **GD** en courant de court-circuit.



Comme technique classique pour minimiser le courant de court-circuit monophasé, on peut augmenter l'impédance de mise à la terre du transformateur MT/MT [OLL_73], mais cette augmentation va provoquer des surtensions lors de l'élimination du défaut.

Pour les autres courants de court-circuit (triphase et biphasé), on ne peut les minimiser que si une étude approfondie sur l'interface entre la production décentralisée et le réseau électrique est mise au point.

CHAPITRE V :
ETUDE DE LA COMMANDE DE LA
GENERATION DISPERSÉE



I. INTRODUCTION

En général, pour les productions décentralisées utilisant des interfaces basées sur l'électronique de puissance, ces interfaces sont constituées de deux blocs [ION_03] (figure V-1). Le 1^{er} bloc est un hacheur qui nous permet un contrôle sur la valeur moyenne de la tension continue délivrée au 2^{ème} bloc qui est un onduleur triphasé.

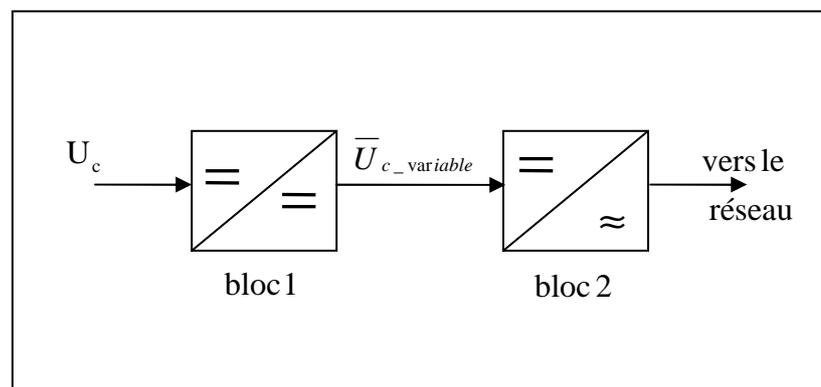


Figure V-1 : schéma bloc de la production décentralisée

L'étude détaillée du fonctionnement du hacheur et de l'onduleur ne sera pas abordée dans ce travail, mais un rappel sera nécessaire.



1) Rappel sur le Hacheur et l'Onduleur [SEG 99]

2-1 le Hacheur

Dans la littérature on trouve plusieurs types de hacheurs dont le fonctionnement diffère. Le tableau V-1 donne la tension moyenne de différents montages en fonction du rapport cyclique (α).

Type de hacheur	Valeur moyenne en fonction de (α)	
Hacheur dévolteur	$U_{moy} = \alpha.E$	$0 \leq \alpha \leq 1$
Hacheur survolteur	$U_{moy} = (1 - \alpha).E$	$0 \leq \alpha \leq 1$

Tableau V-1 : tension moyenne en fonction de (α)

2-2 l'Onduleur

Comme l'indique son nom, l'onduleur a pour but de créer une tension alternative à partir d'une tension continue. Ainsi la tension alternative créée sera le siège de plusieurs harmoniques.

En général, l'onduleur se divise entre deux parties principales :

- ✓ partie puissance
- ✓ partie commande

La partie puissance représente tous les éléments traversés par le courant électrique pour atteindre la charge.

La partie commande représente les signaux déterminant les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs.

Selon la technique de commande utilisée, et pour un onduleur à trois niveaux, le tableau V-2 donne la valeur efficace du fondamentale de la tension.



Technique	valeur efficace
Onde carrée	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} U_c$
MLI scalaire	$\frac{1}{2\sqrt{2}} U_c$
MLI vectorielle MLI scalaire + 3 ^{ème} harmonique	$\frac{1}{\sqrt{3}} U_c$

Tableau V-2 : valeur efficace du fondamentale de la tension.

II. ECHANGE DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE AVEC LE RESEAU

Pour simplifier le calcul, on considère le schéma équivalent de la (figure V-2) où V_n et V_{ond} présentent successivement la tension du réseau et la tension générée par l'onduleur. Les deux sources de tension sont interconnectées via une inductance L_n dans laquelle circule un courant I_n . D'après le diagramme de la (figure V-2), la puissance active et réactive peut être écrite en fonction des paramètres du système selon l'équation suivante :

$$\begin{cases} P_G = 3.V_n I_n \cos \varphi = \frac{3}{X_n} V_n V_{ond} \sin \theta_n \\ Q_G = 3.V_n I_n \sin \varphi = \frac{3}{X_n} V_n (V_n - V_{ond} \cos \theta_n) \end{cases} \quad (V-1)$$

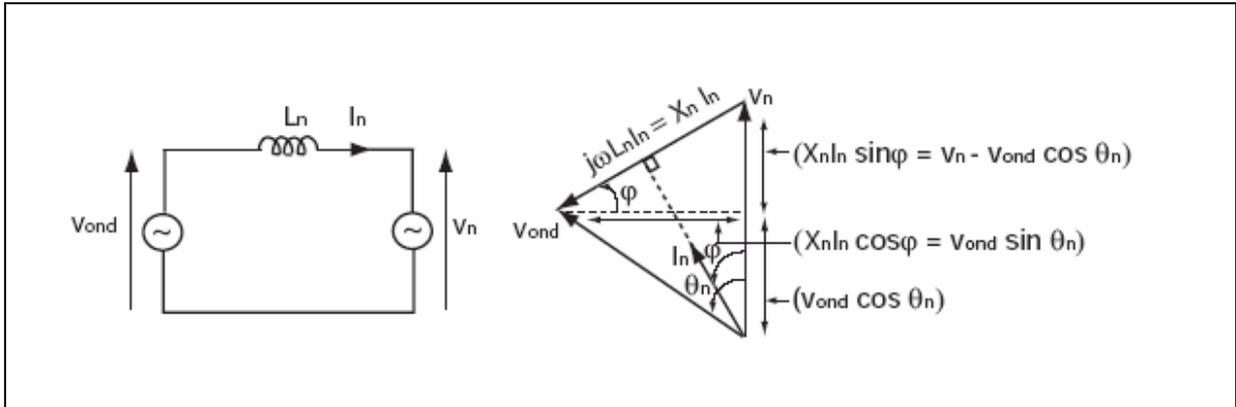


Figure V-2 Schéma équivalent et diagramme des tensions pour un circuit simple.

D'autre part, pour un onduleur à trois niveaux avec une commande MLI scalaire, l'onde fondamentale de la tension à la sortie de l'onduleur est proportionnelle selon la relation V-2 à la tension continue U_c .

$$V_{ond} = \frac{1}{2\sqrt{2}} U_c \quad (V-2)$$

A partir des deux équations V-1, V-2 et le tableau V-1, et pour un hacheur dévolteur, le rapport cyclique (α) du hachage et l'angle de décalage θ_n entre la tension du réseau et la tension de l'onduleur peuvent être exprimées selon la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_n = \arctan\left(\frac{P_G}{\frac{3 \cdot V_n^2}{X_n} - Q_G}\right) \\ \alpha = \frac{2\sqrt{2}}{E} \sqrt{\left(V_n - \frac{X_n}{3 \cdot V_n} Q_G\right)^2 + \left(\frac{X_n}{3 \cdot V_n} P_G\right)^2} \end{array} \right. \quad (V-3)$$

Comme on l'a déjà mentionné dans la l'introduction générale, l'insertion d'une nouvelle source de tension dans le réseau a une influence sur le plan de tension. Ainsi, la nouvelle source doit être contrôlée (ou pilotée) d'une façon à ne pas infecter le plan de tension, ou bien elle doit participer au contrôle de la tension.

La figure V-3 représente une portion d'un réseau radial, où la tension U_1 est réglée par action sur le transformateur régleur en charge.

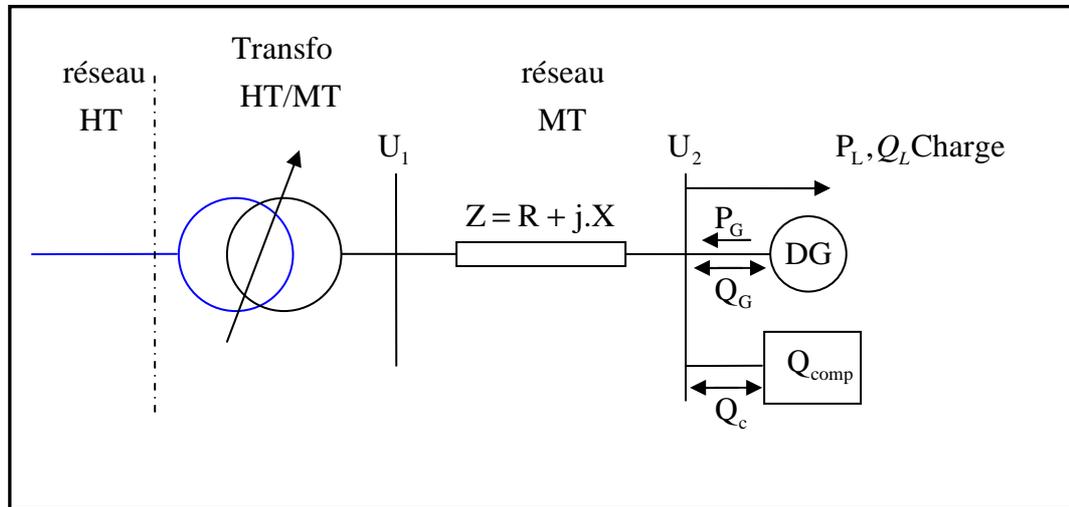


Figure V-3 : portion d'un réseau radial

D'autre part, l'expression de la chute de tension sur la ligne est donnée par la formule V-4 [EMA_05]:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R.(P_L - P_G) + X.(Q_L - Q_C - Q_G)}{U_2} \quad (V-4)$$

Dans le reste de l'étude, on confondra le compensateur de la puissance réactive (Q_{comp}) avec la consommation/injection de la puissance réactive (Q_G) de la source décentralisée.

La formule V-4 devient :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R.(P_L - P_G) + X.(Q_L - Q_G)}{U_2} \quad (V-5)$$

En examinant la formule (V-5), et pour des valeurs données des puissances actives et réactives injectées par la source décentralisée, on constate que la chute de tension peut être positive comme elle peut être négative. Dans le dernier cas, l'augmentation de la tension U_2 au delà de la valeur limite (+10%) est due essentiellement à la diminution de la



consommation (P_L, Q_L). Cette augmentation de la tension entraîne un courant circulant dans la ligne dans le sens inverse, qui peut infecter le fonctionnement du transformateur régulateur en charge basé sur la mesure du courant [YAN_04].

La valeur approximative de la tension au nœud 2 (U_2) peut être calculée à l'aide de la relation suivante [EMA_05]:

$$U_2 = \frac{1}{2}U_1 + \frac{1}{2}\sqrt{U_1^2 + 4.R.(P_L - P_G) - 4.X.(Q_L - Q_G)} \quad (V-6)$$

On peut donc déduire les moyens principaux disponibles pour régler la tension U_2 :

- action sur la puissance active fournie par la source de production (P_G) ;
- action sur la puissance réactive fournie/consommée par la source (Q_G).

III. REGLAGE DE LA TENSION PAR LE CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE

La figure V-4 montre la source de production décentralisée caractérisée par la puissance apparente nominale S_{GN} et par les facteurs de puissance minimaux en régime inductif et $\cos \varphi_{\min}^{ind}$ capacitif $\cos \varphi_{\min}^{cap}$, et munie d'un système de régulation de la tension au nœud de connexion (U_2) qui peut agir, dans le cas général, sur les consignes de puissance réactive (Q_{GREF}) voir de puissance active (P_{GREF}).

A priori, la consigne de la puissance active (P_{GREF_EXT}) est fixée par le gestionnaire de la source de production en fonction d'un programme de production basé sur des critères technico-économique destinés à optimiser la rentabilité de l'installation [CAL_02].

La théorie de réglage est basée sur une loi linéaire [YAN_04] avec une bande morte (ε), la valeur de la référence pour la puissance réactive de la source (Q_{GREF}) est calculée en fonction de la tension au point de connexion (U_2) en employant l'algorithme V-7 :

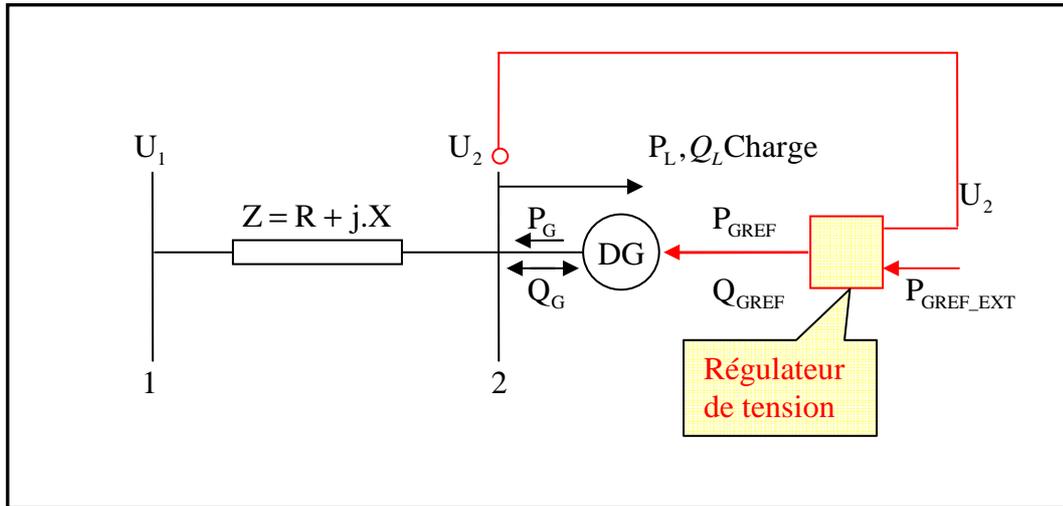


Figure V-4 : Régulation par action sur le réactif

$$Q_{GREF} = \begin{cases} Q_{max}^{ind} ; & \text{pour } U_2 > U_{max} \\ Q_{init} + (U - U_{max}^Q) \cdot KQ_1 ; & \text{pour } U_{max} \geq U_2 \geq U_{max}^Q \\ Q_{init} ; & \text{pour } U_{max}^Q > U_2 > U_{min}^Q \\ Q_{init} + (U_{min}^Q - U) \cdot KQ_2 ; & \text{pour } U_{min}^Q \geq U_2 \geq U_{min} \\ Q_{max}^{cqp} ; & \text{pour } U_2 < U_{min} \end{cases} \quad (V-7)$$

Pour ce type de commande, on identifie plusieurs paramètres de réglage (figure V-5)

- $U_0, \varepsilon, Q_{init}$: paramètres qui caractérisent la bande morte ;
- KQ_1, KQ_2 : pentes de réglage du réactif avec $KQ_1 = \tan(\alpha_1)$, $KQ_2 = \tan(\alpha_2)$;
- U_{min}, U_{max} : limites du domaine de réglage.

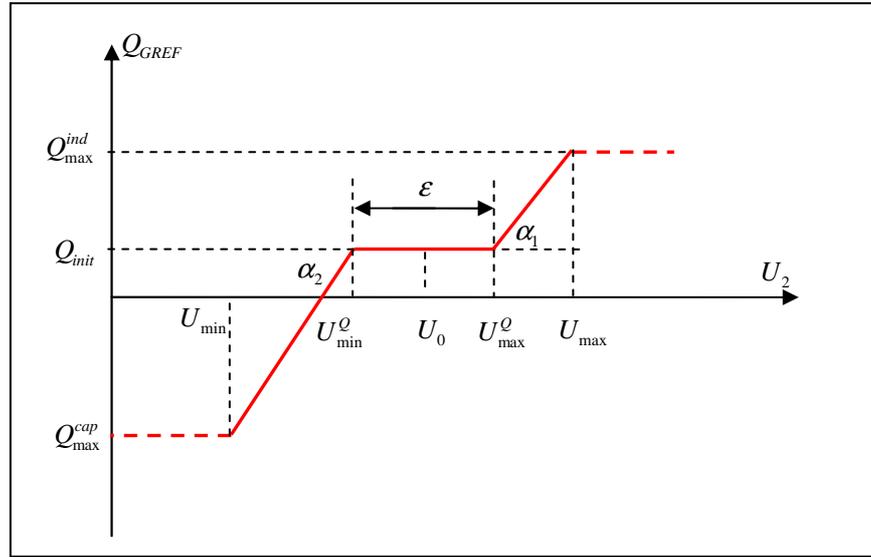


Figure V-5 : principe de réglage

Les deux pentes de réglage sont données par :

$$\begin{cases} KQ_1 = \frac{Q_{\max}^{ind} - Q_{init}}{U_{\max} - U_{\max}^Q} \\ KQ_2 = \frac{Q_{init} - Q_{\max}^{cap}}{U_{\min}^Q - U_{\min}} \end{cases} \quad (V-8)$$

Les valeurs maximales de la puissance réactive (Q_{\max}^{cap} , Q_{\max}^{ind}) peuvent être fixées de manière définitive ou varier avec la puissance active de la source selon différentes lois.

• **Réglage à puissance réactive constante :**

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = \sqrt{S_{GN}^2 - P_{GN}^2} \quad (V-9)$$

ou

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -\sqrt{S_{GN}^2 - P_{GN}^2} \quad (V-10)$$



- **Réglage à puissance apparente constante :**

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = \sqrt{S_{GN}^2 - P_{GREF}^2} \quad (V-11)$$

ou

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -\sqrt{S_{GN}^2 - P_{GN}^2} \quad (V-12)$$

- **Réglage à facteur de puissance constant :**

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = |P_{GREF}| \cdot \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_{\min}^{cap})^2} - 1} \quad (V-13)$$

ou

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -|P_{GREF}| \cdot \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_{\min}^{ind})^2} - 1} \quad (V-14)$$

Dans les deux derniers cas de figure les bornes sont variables en fonction de la consigne de puissance active à un instant donné (P_{GREF}) et non seulement en fonction de la puissance active nominale de la source.

Pour sélectionner une des trois stratégies de réglage, on fait appel à un paramètre supplémentaire : S qui prend les valeurs mentionnées dans le tableau suivant :

Paramètre (S)	Stratégie de contrôle du réactif
1	Réglage à puissance réactive constante
2	Réglage à puissance apparente constante
3	Réglage à facteur de puissance constant

Ainsi, on peut regrouper le principe de réglage de la tension par action sur la puissance réactive en deux parties. La figure V-6 montre le principe :

- Calcul des bornes : selon les équations (V-9) jusqu'à (V-14)
- Calcul de la consigne de la puissance réactive : selon l'équation (V-7).

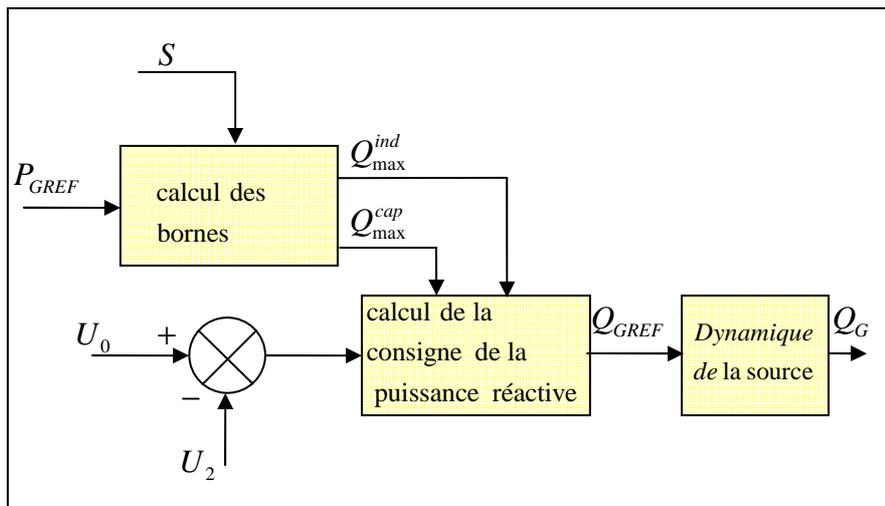


Figure V-6 : diagramme bloc du système de réglage

IV. REGLAGE DE LA TENSION PAR LE CONTROLE DE LA PUISSANCE ACTIVE

Lorsqu'on arrive en limitation de puissance réactive, la source est en général déconnectée purement et simplement. La méthode consiste à maintenir la production de puissance active au maximum possible tout en respectant les limites de tension.

Le principe de la pente de réglage utilisé précédemment n'est plus applicable dans ce contexte puisque la tension doit alors être contrôlée de manière précise afin de ne pas dépasser la limite supérieure de tension (U_{\max}). On met alors en œuvre une boucle de régulation avec un correcteur comprenant une action intégrale. La sortie du correcteur définit alors une référence pour la puissance active ($P_{GREF} = P_{REF_CONT}$).

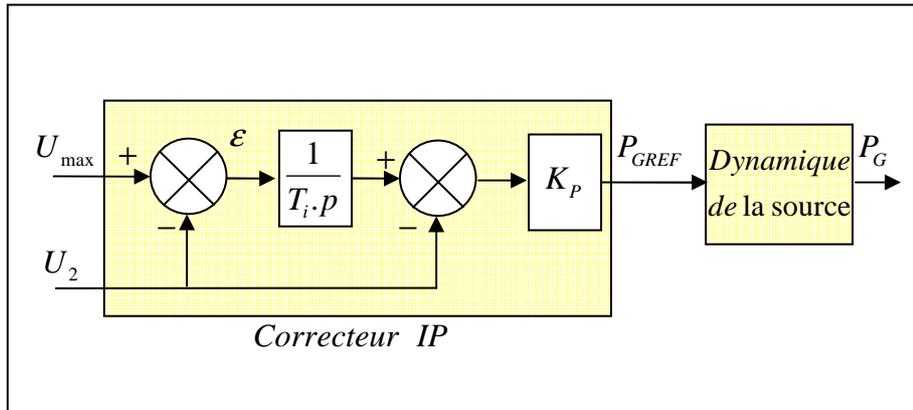


Figure V-7 : Système de réglage de la tension par contrôle de la puissance active

1) Synthèse du correcteur [EMA_05]

La synthèse du correcteur est faite dans le domaine continu sur la base du modèle simplifié du réseau présenté en Figure V-4.

On rappelle l'expression de la chute de tension sur la ligne :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R.(P_L - P_G) + X.(Q_L - Q_C - Q_G)}{U_2} \quad (V-15)$$

Hypothèses :

- P_L, P_G et Q_L, Q_G varient indépendamment ;
- R et X sont constants

L'expression approchée de la tension U_2 peut se décomposer en 4 termes :

$$\Delta U = U_1 - \frac{R.P + X.Q}{U_{20}} = U_1 + U_{PL} + U_{PG} + U_{QL} + U_{QG} \quad (V-16)$$

$$\text{Avec : } U_{PL} = -\frac{R.P_L}{U_{20}}, \quad U_{PG} = \frac{R.P_G}{U_{20}}, \quad U_{QL} = -\frac{X.Q_L}{U_{20}}, \quad U_{QG} = \frac{X.Q_G}{U_{20}}$$



où U_{20} est la tension au nœud 2, autour de laquelle on réalise la linéarisation.

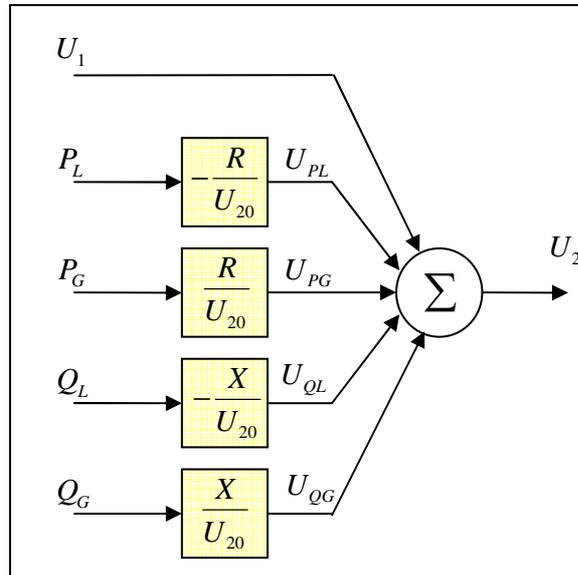


Figure V-8 : Modèle simplifié du réseau

Nous pouvons maintenant présenter le schéma fonctionnel du système bouclé ((figure V-9) qui est utilisé pour la synthèse du correcteur.

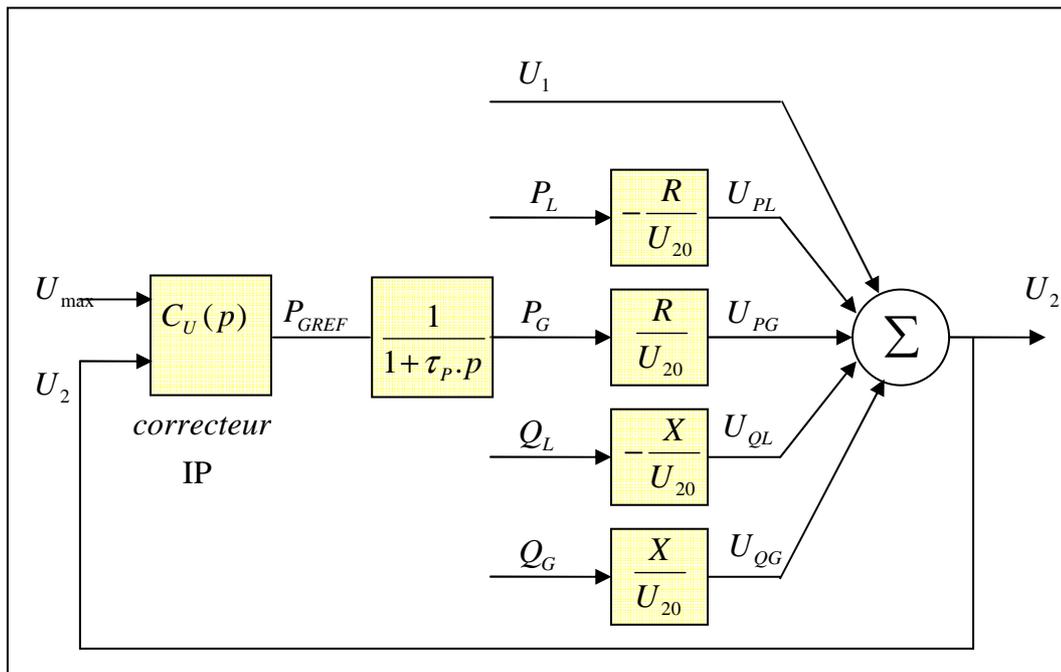


Figure V-9 : Boucle de réglage de la tension par le contrôle de la puissance active



Les valeurs des paramètres du correcteur (K_p , T_i) sont calculées ainsi en fonction de la dynamique de la source de production τ_p et tiennent compte des caractéristiques du réseau.

La fonction de transfert de la boucle de réglage est la suivante :

$$F(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \right) \frac{1}{1 + \tau_p p} \frac{R}{U_{20}} = \frac{K_p (T_i p + 1) R}{U_{20} T_i p (1 + \tau_p p)} \quad (\text{V-17})$$

On a donc pour le polynôme caractéristique :

$$P_C(p) = 1 + p \left(\frac{R \cdot K_p \cdot T_i + U_{20} \cdot T_i}{R \cdot K_p} \right) + p^2 \left(\frac{U_{20} \cdot T_i \cdot \tau_p}{R \cdot K_p} \right) \quad (\text{V-18})$$

Celui-ci est identifié à un polynôme de référence du 2^{ème} ordre de paramètres :

- ξ : coefficient d'amortissement,
- ω_n : pulsation naturelle.

On en déduit l'expression des coefficients du correcteur [EMA_05] :

$$\begin{cases} K_p = \frac{(-1 + 2\xi\omega_n\tau_p)}{R} U_{20} \\ T_i = \frac{-1 + 2\xi\omega_n\tau_p}{\omega_n^2\tau_p} \end{cases} \quad (\text{V-19})$$

V. SUPERVISION DE LA REGULATION DE TENSION

Nous définissons deux modes de fonctionnement pour le régulateur de tension :

- **Mode 1 : Réglage de la tension seulement par l'action sur le réactif**

Dans ce mode de fonctionnement, seul le réglage de la tension par le contrôle du réactif est activé. La valeur de la tension U_2 reste dans les limites imposées [U_{\min} , U_{\max}] et la consigne du réactif Q_{GREF} est fournie en fonction de cette valeur selon la caractéristique statique présentée dans la figure V-10.



La valeur de consigne de la puissance active, qui est envoyée à la source de production par le régulateur de tension, est la valeur $P_{GREF} = P_{GREF_EXT}$, imposé par le gestionnaire de l'installation de production.

- **Mode 2 : Régulation de la tension par le contrôle de l'actif et du réactif**

La tension atteint son seuil haut U_{max} (ou le seuil bas U_{min}), on doit passer dans un mode de régulation de tension avec l'action sur la puissance active.

Ce mode de fonctionnement implique l'activation de la boucle de tension avec une action intégrale, de manière à contrôler précisément la tension et éviter de dépasser les valeurs imposées par les normes. La valeur de consigne de la puissance active envoyée à la source de production sera alors celle imposée par le correcteur **IP** :

$$P_{GREF} = P_{GREF_CONT}$$

Nous allons nous intéresser à la transition entre le mode de fonctionnement du régulateur.

1) Première solution

Une première solution pour passer d'un mode de fonctionnement à un autre consiste à faire un test sur la valeur de la tension et à valider une commande ou une autre suivant le niveau de cette tension. Le franchissement du seuil (δ) du comparateur à hystérésis (Figure V-10) induit le passage du mode 1 au mode 2, la consigne de puissance active P_{GREF} est alors fixée par la sortie du correcteur P_{GREF_CONT} . Afin d'éviter toute discontinuité au moment de la transition entre les modes, la sortie du correcteur est, en mode 1, initialisée à la valeur de la consigne externe de la puissance active (P_{GREF_EXT}) à chaque instant :

$$P_{GREF_EXT} = P_{GREF_CONT} \quad (V-20)$$

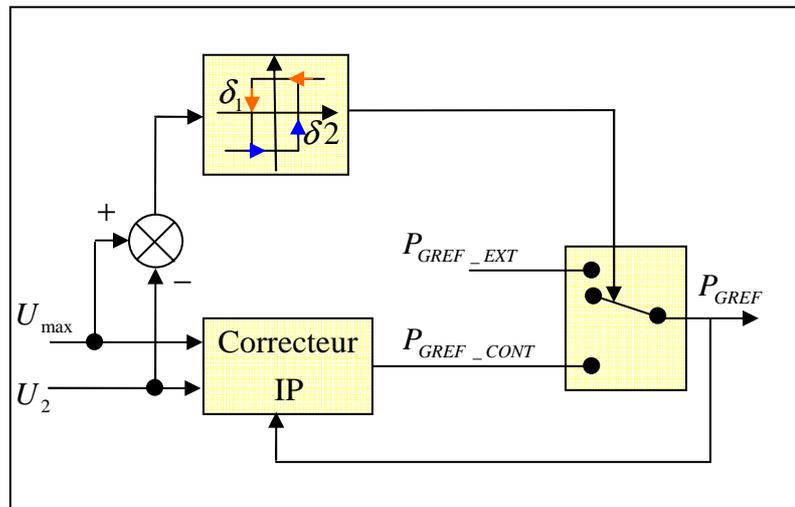


Figure V-10 : Principe de passage entre les deux modes de fonctionnement

Lorsque la tension diminue en dessous du seuil bas (δ_1) du comparateur à hystérésis, le mode 1 est validé : la puissance active de la source est imposée par la consigne externe :

$$P_{GREF} = P_{GREF_EXT} \quad (V-21)$$

Il est alors possible d'avoir une discontinuité au niveau de la puissance de référence envoyée vers la source de production, ce qui peut induire des oscillations au moment de la commutation.

Toute la difficulté de cette méthode résulte dans la détermination de la largeur de l'hystérésis (le choix des seuils) pour éviter des battements entre les deux modes de fonctionnement. Cette solution, à priori assez intuitive, se révèle complexe à mettre en œuvre. C'est la raison pour laquelle nous préférons une deuxième méthode présentée après.

2) Deuxième solution

Afin d'éviter les problèmes liés au réglage de comparateur à hystérésis, on souhaite trouver une manière indirecte de détecter le changement de mode.

L'idée consiste à comparer à chaque instant, la sortie du correcteur avec la consigne de puissance externe (Figure V-11).

Si $P_{GREF_CONT} > P_{GREF_EXT}$, ceci signifie qu'il faudrait augmenter la consigne de puissance active pour atteindre le niveau de tension maxi U_{max} . Dans ces conditions, la génération d'une puissance active plus faible (P_{GREF_EXT}) induira une tension inférieure à U_{max} : le système peut rester en mode 1.

Si $P_{GREF_CONT} < P_{GREF_EXT}$, le correcteur de tension tend à diminuer le niveau de la puissance active générée. Il est donc nécessaire de passer en mode 2.

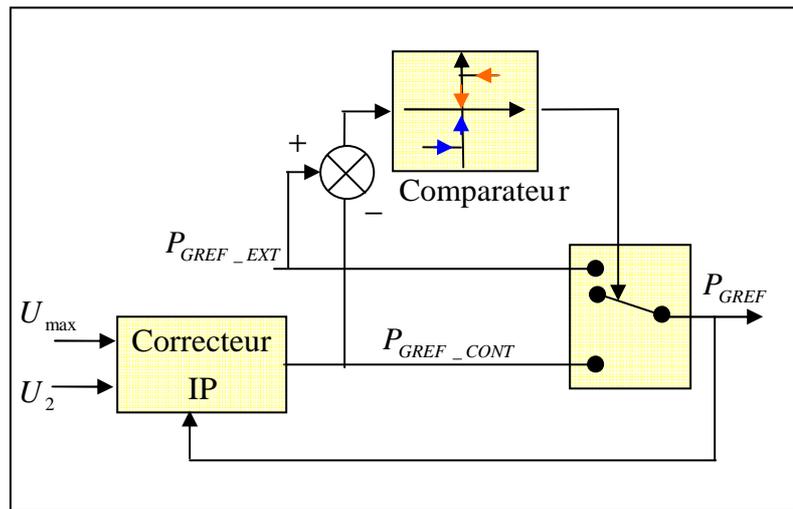


Figure V-11 : Principe de passage entre les modes de fonctionnement

VI. SIMULATION EN MATLAB

La simulation consiste à tester le système de régulation de tension comme une première étape. Ensuite, un court-circuit triphasé est provoqué pour voir le comportement du système de régulation

1) Essai du système de régulation

Dans cette partie, on va tester le système de régulation de tension de la production décentralisée sur une variation des puissances active et réactive demandées par la charge. La variation des puissances est représentée dans l'annexe B figure 2.

A l'instant $t=0,04s$ la source de production décentralisée est connectée au réseau électrique.

A l'instant $t=0,12s$ les puissances demandées par la charge augmente (annexe B figure 2).

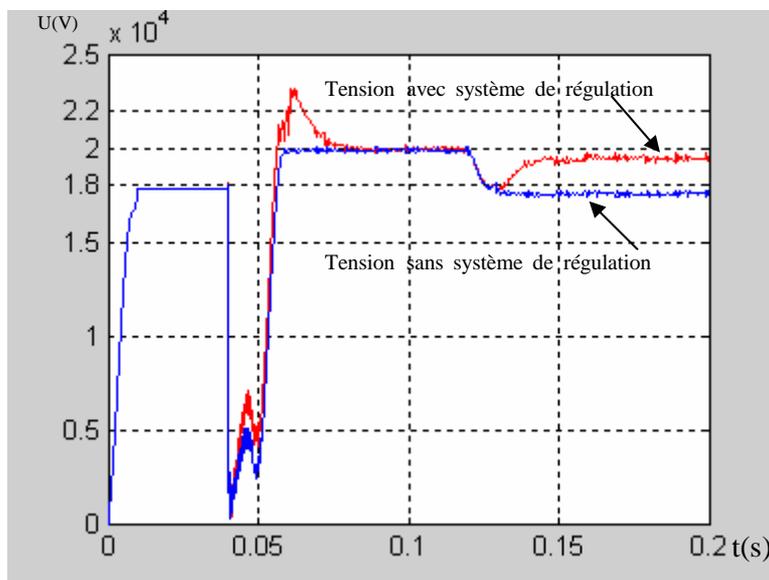


Figure V-12 tension à la barre de connexion

La figure V-12 montre que si la production décentralisée n'est pas munie d'un système de régulation, l'augmentation des puissances demandées par la charge sera traduite par une chute de tension qui sort de les limites autorisées (courbe en bleu figure V-12). Par contre, si la production décentralisée est munie d'un système de régulation expliqué précédemment, la chute de tension reste dans les limites autorisée (courbe en rouge figure V-12).

Remarque: dans les figures V-12 et V-15 on remarque qu'à l'instant de connexion de la production décentralisée au réseau électrique que la tension chute vers une valeur presque nulle. Cette chute de tension n'a pas de réalité physique ; elle est due au bloc utilisé dans la simulation pour mesurer la valeur efficace de la tension. Ce problème n'a pas été rencontré dans la simulation de la partie II (chapitre IV, figure IV-16-b. p 69).

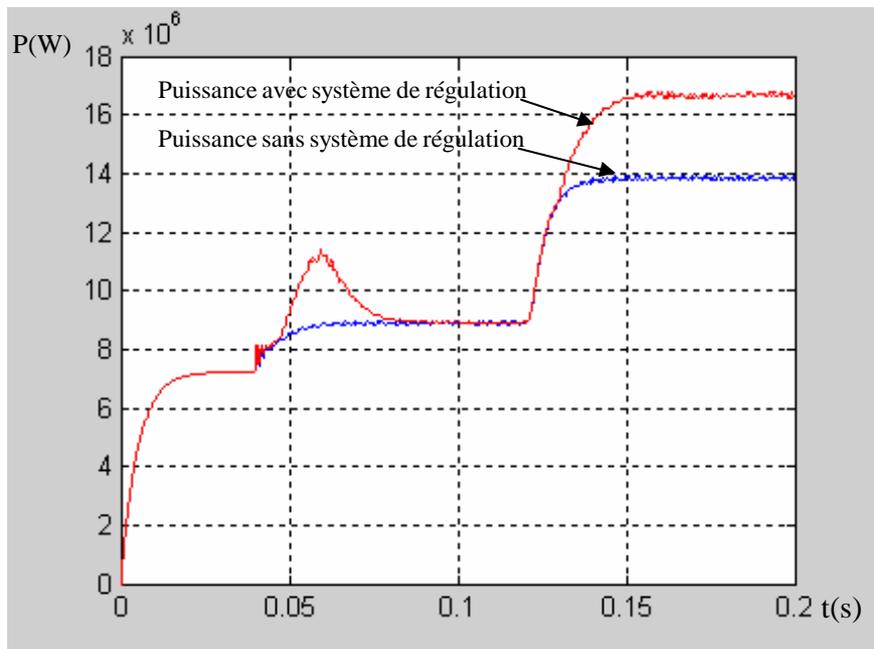


Figure V-13 puissance active à la barre de connexion

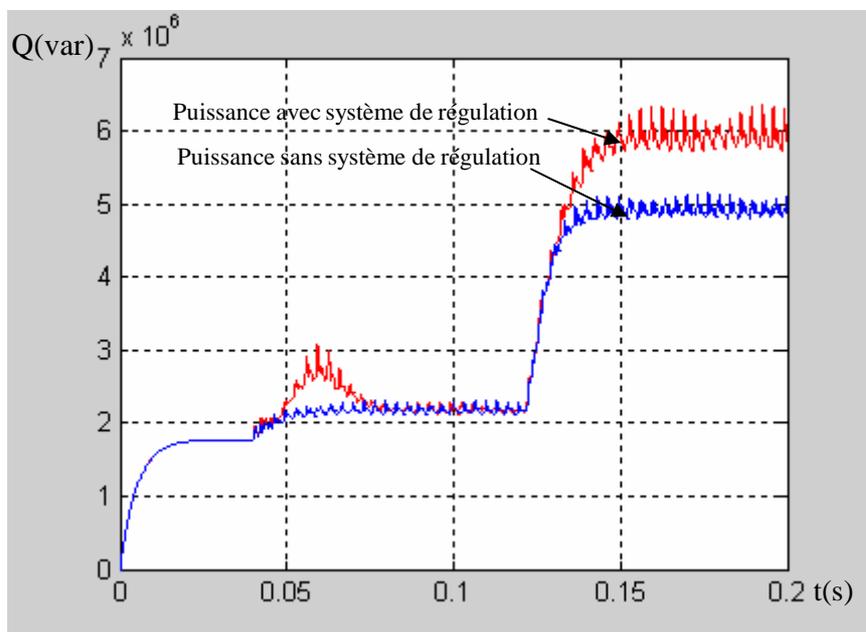


Figure V-14 puissance réactive à la barre de connexion

Le système de régulation augmente la puissance active (figure V-13) et la puissance réactive (figure V-14) injectée dans le réseau électrique d'une façon à limiter la chute de tension.



2) Essai du court circuit

La simulation de la partie II (court-circuit avec la génération dispersée), a montrée que la contribution en courant de court-circuit par la génération dispersé est similaire pour un court-circuit dans la barre 1 ou dans la barre 3. Ainsi, le calcul de court-circuit a montré que cette contribution est presque la même pour les quatre types de court-circuit.

Ainsi, dans cette partie de simulation on va seulement traiter le cas d'un court-circuit triphasé (la durée est de 0,08s, de 0,08s à 0,16s) dans la barre 3 avec une source décentralisée munie d'un système de régulation de tension présenté précédemment.

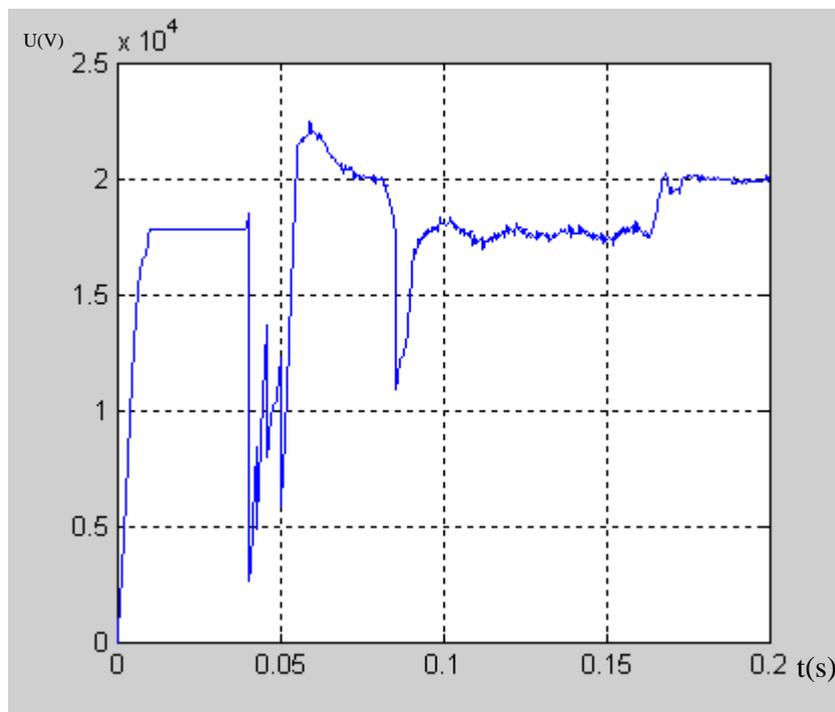


Figure V-15 : tension à la barre de connexion

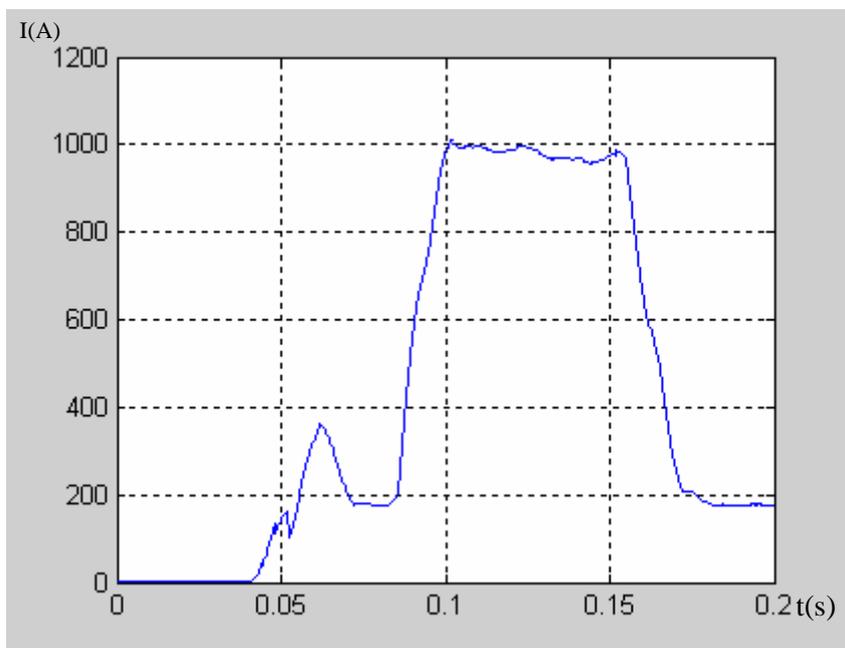


Figure V-16 : courant de contribution par la GD

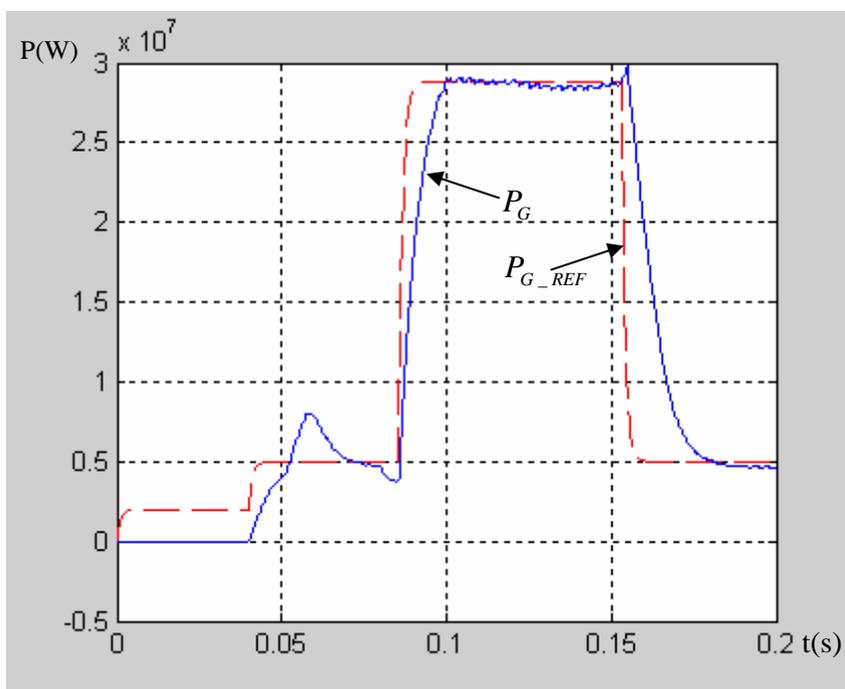
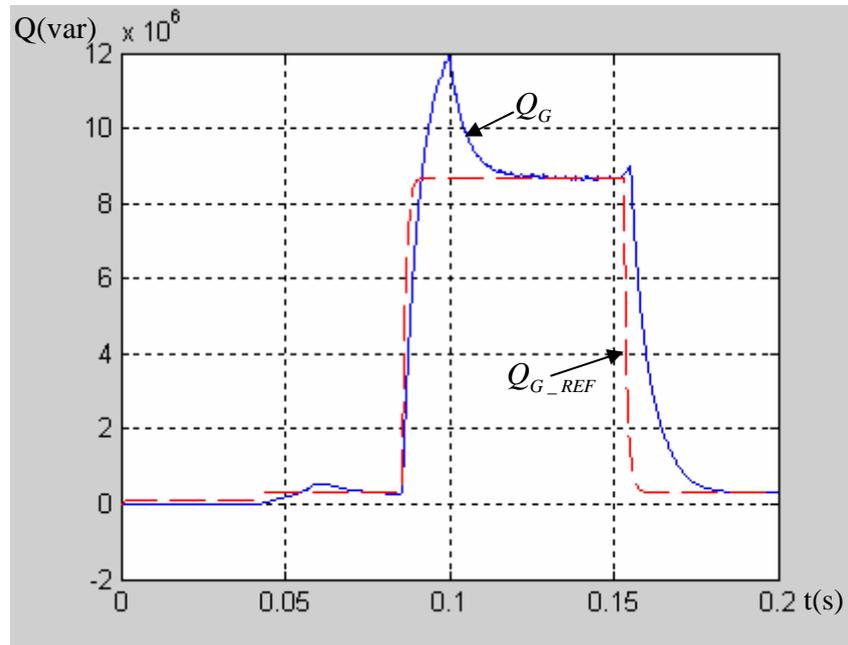


Figure V-17 : puissance active injectée dans le réseau

**Figure V-18** : puissance réactive injectée dans le réseau

Le système de régulation se comporte pour le cas d'un court-circuit comme pour le cas d'une augmentation des puissances demandée par la charge. La chute de tension à la barre de connexion sera compensée (figure V-15) par une augmentation de l'injection de puissance active (figure V-17) et réactive (figure V-18)

3) Conclusion

La partie 1 de la simulation a montré que le système de régulation de tension agit sur la puissance active et réactive pour stabiliser la tension au point de connexion dans les limites voulues (figure V-13 et V-14).

Pour la deuxième partie concernant l'essai d'un court-circuit, le système de régulation agit à nouveau sur la puissance active et réactive injectée dans le réseau en augmentant la consigne de référence (figure V-17 et V-18). Cette augmentation est la seule responsable de l'augmentation du courant pendant le court-circuit (figure V-16).

Ainsi, en limitant la puissance active et réactive pendant la durée de court-circuit on peut minimiser la contribution en courant de court-circuit par la génération dispersée.



VII. LIMITATION DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE

Comme on l'a vu dans la simulation précédente, la seule cause de l'élévation de courant de court-circuit est l'augmentation de la puissance active et réactive pour compenser la chute de tension provoquée par le court-circuit. Ainsi, une minimisation ou une limitation de la consigne de la puissance active et réactive va limiter la contribution de la source décentralisée en courant de court-circuit.

Mais, il faut répondre à deux questions :

1. *comment choisir la limite de puissance ;*
2. *quelles sont les conséquences pour un faux choix.*

1) Choix de la limite des puissances :

Rappelons que la variation de la demande de puissance électrique dans les réseaux électrique est presque similaire pendant les jours où le réglage de la puissance injectée dans le réseau par les centrales classiques est basée sur une prédétermination de la charge. Cette prédétermination est le fruit d'une statistique effectuée pendant une année sur la puissance demandée par la charge connectée au réseau électrique.

Ainsi, le choix de la consigne de puissance active et réactive doit répondre à deux critères :

- 1- *le choix de la consigne ne doit pas être inférieur à la puissance demandée par la charge.*
- 2- *le choix de la consigne doit être calculé d'une façon à rendre la contribution en courant de court-circuit minimale pour ne pas perturber le fonctionnement des disjoncteurs. Cette minimisation sera donc reporter sur une valeur de $0,3.I_{cc3\phi}$.*

2) Conséquences d'un faux choix :

Un faux choix de la consigne est un choix supérieur ou inférieur à la puissance demandée par la charge. Pour le premier cas (choix supérieur), la contribution en courant de



court-circuit par la source décentralisée vas être supérieure à $0,3.I_{cc3\phi}$, ce qui va perturber le fonctionnement des disjoncteurs. Pour le deuxième cas (choix inférieur), la source décentralisée ne peut effectuer sa tâche essentielle qui est la compensation de la chute de tension provoquée par la surcharge du réseau électrique.

3) Simulation et résultats :

la simulation de la partie II sans la source décentralisée montre que le courant de court-circuit triphasé dans la barre 3 est égale a 1124 A, ainsi le pouvoir de coupure du disjoncteur situé en tête de ligne alimentant le réseau aval est fixé a une valeur 1462 A.

Pour le bon fonctionnement du disjoncteur, le courant de contribution de la source décentralisée ne doit pas dépasser les 338 A. ainsi la puissance de court-circuit ne doit pas dépasser les 6,76 MVA.

Avec un facteur de puissance de court-circuit égale a 0,88, on peut déterminer la consigne de la puissance active et réactive en cas de court-circuit.

$$P_{cc} = 5,99 \text{ MW} \approx 6 \text{ MW}$$

$$Q_{cc} = 3,21 \text{ Mvar} \approx 3 \text{ Mvar}$$

Pour limiter la consigne de la puissance active et réactive, on va utiliser pour la simulation un limiteur à hystérésis incorporé dans le système de régulation comme le montre la figure suivante :

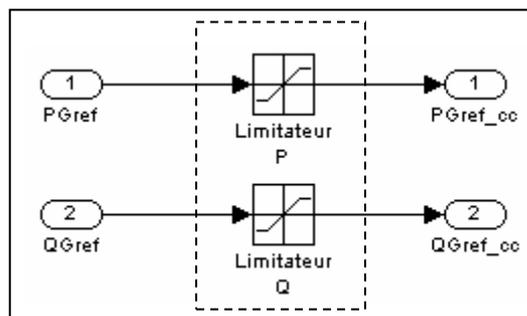


Figure V-19 : Limitation de la puissance active et réactive

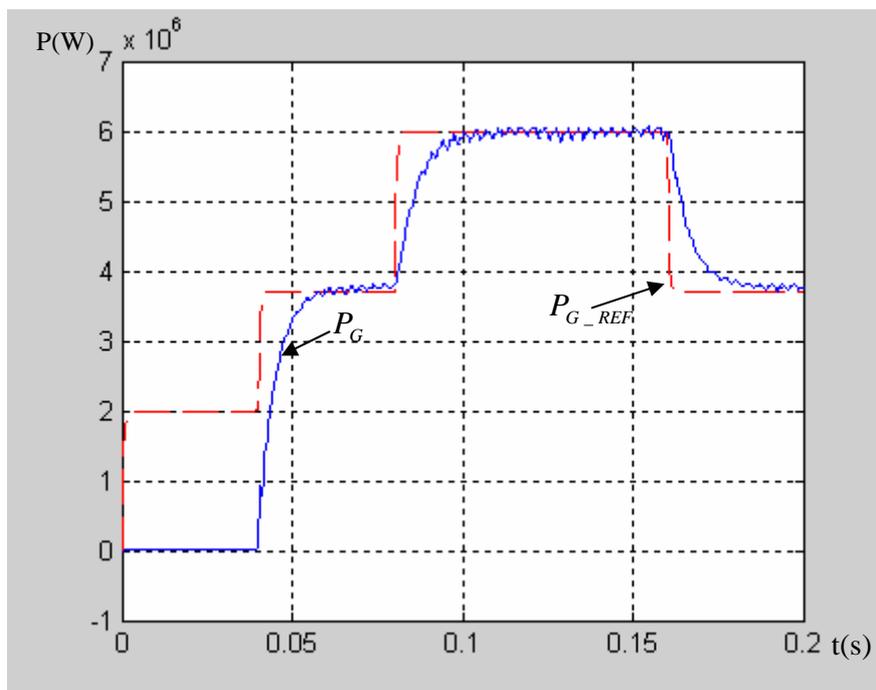


Figure V-20 : puissance active injectée dans le réseau

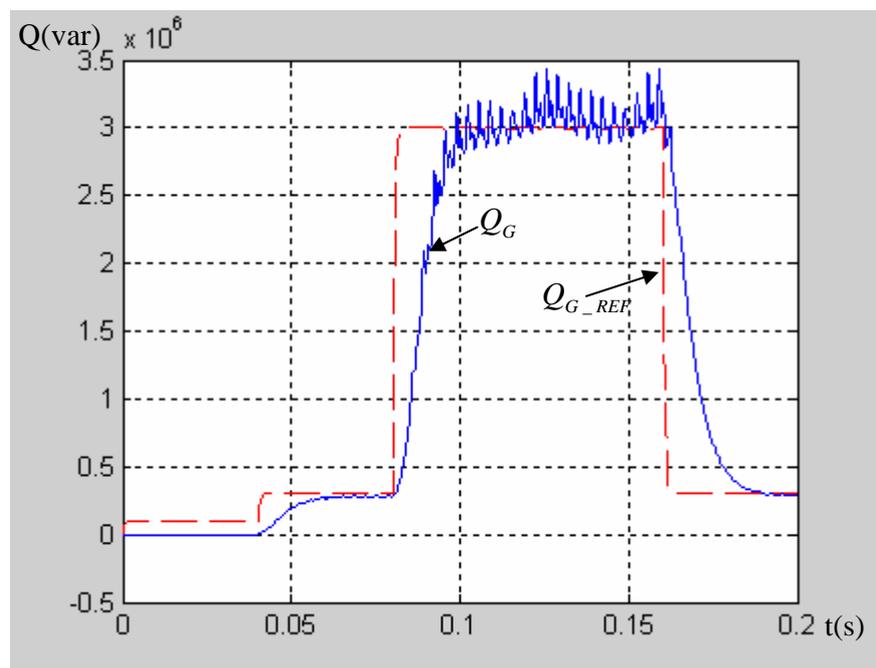


Figure V-21 : puissance réactive injectée dans le réseau

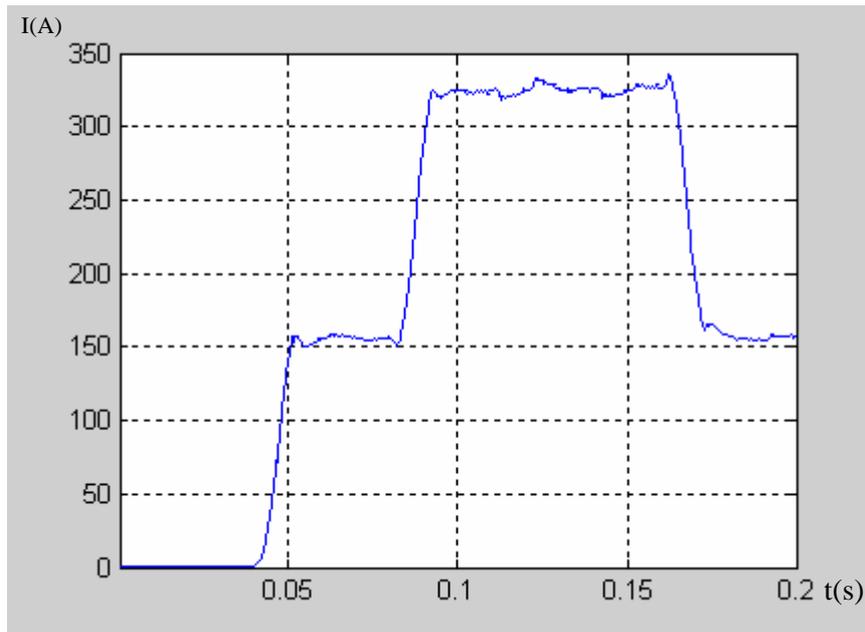


Figure V-22 : courant de contribution par la GD

4) Conclusion :

L'essai en court-circuit pour une production décentralisée munie d'un système de régulation de tension a montré qu'un court-circuit est considéré comme une brusque augmentation de la puissance demandée par la charge raccordée au réseau électrique. Ainsi, le système de régulation tend à éliminer la chute de tension (figure V-15) qui accompagne le court-circuit. En effet, les figures V-17 et V-18 montrent la contribution de la GD en puissances active et réactive pendant la durée de court-circuit, et dont la conséquence immédiate est une augmentation du courant injecté dans le réseau électrique (figures V-16).

En limitant les puissances active et réactive injectées dans le réseau pendant la durée du court-circuit à des valeurs bien déterminées, on peut limiter le courant de court-circuit. En effet, les figures V-20 et V-21 montrent que les puissances active et réactive sont limitées pendant la durée du court-circuit. Ainsi le courant de contribution par la production décentralisée en cas de court-circuit est limité à une valeur non perturbatrice pour le système de protection du réseau électrique (figure V-22).

CONCLUSION GENERALE

L'insertion massive d'une nouvelle source d'énergie électrique dans un réseau HTA qui est généralement non dimensionné pour accueillir des sources d'énergie a des conséquences sur l'exploitation du réseau électrique. Cette présence touche essentiellement le plan de tension et les courants de court-circuit. Ce travail de thèse a porté sur l'influence de la production décentralisée sur les courants de court-circuit dans les réseaux de distribution HTA

Dans la première partie du mémoire, nous avons caractérisé l'architecture du réseau de distribution HTA (chapitre I). Ce type de réseau a une exploitation arborescente, qui se traduit par un transit de puissance unidirectionnel et un disjoncteur pour chaque départ d'une ligne. Ce type de réseau n'est pas conçu pour être raccordé à des centrales électriques jusqu'à l'apparition de la génération dispersée qui a mis en cause cette philosophie. Le chapitre II donne une définition de la production décentralisée par rapport à la production de grosse taille (production centralisée) avec ses différentes catégories.

Dans la deuxième partie, on décrit (chapitre III) la particularité du courant de court-circuit et les conséquences. Une modélisation des éléments du réseau électrique est basée sur les composantes symétriques. Cette modélisation nous a permis d'utiliser la méthode de calcul des courants de court-circuit connue sous le nom de *norme CEI 60909*. Le chapitre IV est consacré au calcul et à la simulation des courants de court-circuit, sans, et avec la présence de la génération dispersée. Les résultats obtenus par le calcul ont mis en évidence le problème lié à la contribution de la nouvelle source d'énergie électrique en matière de court-circuit (tableau IV-2 et IV-5, p 51 et p 61). Par exemple, pour un court-circuit triphasé dans la barre 3, le courant de court-circuit est de 1124 A ; en présence de la génération dispersée raccordée à la barre 2, le courant de court-circuit augmente jusqu'à 2098 A, où cette valeur dépasse le pouvoir de coupure du disjoncteur.

La simulation sous MATLAB des différents courts-circuits, sans et avec la production décentralisée, a mis en évidence la méthode utilisée et, un court-circuit est toujours accompagné par une chute de tension (figure-b-IV-24, p 73) dans les barres voisines de la barre en court-circuit. La déconnexion de la production décentralisée en cas de court-circuit, pour ne pas modifier les courants de court-circuit, n'est pas une solution techniquement envisageable puisqu'elle assure une partie de puissance pour des charges raccordées au réseau électrique. En plus, la connexion ou la déconnexion de la source décentralisée engendre des creux de tension.

La troisième partie du mémoire est consacrée à l'étude de l'interface entre la nouvelle source d'énergie électrique et le réseau électrique. L'échange de la puissance active et réactive entre la production décentralisée et le réseau électrique peut être contrôlé. Le fonctionnement du système de contrôle est basé sur la mesure instantanée de la tension de la barre où la production décentralisée est connectée (barre 2, U_2) où le débit des puissances active et réactive est calculé d'une façon à ne pas avoir une tension (U_2) qui dépasse la limite ($\pm 5\%$). Ainsi, le problème de changement du plan de tension, suite à la connexion de la source dispersée, est résolu.

Suite à la chute de tension U_2 due au court-circuit, le système de contrôle considère le court-circuit comme une forte charge connecté au réseau, les consignes des puissances active et réactive augmentent (figure V-17 et V-18, p 98 et 99), cette augmentation engendre un fort courant (figure V-16, p 98). La simulation d'un court-circuit triphasé avec une production décentralisée munie d'un système de contrôle de puissance a montré que le système est incapable de contrôler le courant de contribution en cas de court-circuit.

Une limitation de l'injection de puissance active et réactive est basée sur les résultats obtenus par le calcul (tableau IV-5, p 61). Ces résultats nous ont permis de choisir les limites de consigne des puissances pour limiter le courant de court-circuit d'une façon à rendre la contribution minimale (figure V-22, p 103) pour ne pas perturber le fonctionnement du système de protection mais, cette limitation va limiter le taux de pénétration de la génération dispersée, c'est-à-dire qu'au-delà de cette puissance limite, la génération dispersée ne peut participer au réglage de tension.

ANNEXE A

- **Réseau amont** : [JEA_97]

$$U_n = 20 \text{ KV}, S_{cc} = 125 \text{ MVA}, X/R=3$$

$$Z_d = Z_i = 3Z_h$$

$$\text{Donc : } |Z_d| = |Z_i| = |Z_{cc}| = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{400}{125} = 3,2\Omega \Rightarrow Z_{cc} = 1,012 + j.3,036$$

$$Z_{d_{cc}} = 1,012 + j.3,036$$

$$Z_{h_{cc}} = 3,036 + j.9,108$$

- **Lignes** : [JEA_97]

Ligne 1 et 2 de 6 Km, R=0,46 Ω /Km, X=0,408 Ω /Km.

$$Z_d = Z_i = 3.Z_h.$$

$$Z_d = 2,76 + j.2,448$$

$$Z_h = 8,28 + j.7,344$$

- **Transformateur de séparation** : [JEA_97]

$$U_n = 20\text{KV}, S_n = 10 \text{ MVA}, X_{cc} = 1\%.$$

$$Z_d = Z_i = 3.Z_h. \Rightarrow j.X_{cc} = \frac{1}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = j.0,4$$

$$Z_d = j.0,4$$

$$Z_h = j.1,2$$

- **Production décentralisée** :

$$U_n = 20 \text{ KV}, S_{cc} = 50 \text{ MVA}, X/R=3$$

$$|Z_{d_{cc}}^{GD}| = |Z_{d_{cc}}^{GD}| = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{400}{50} = 8\Omega \Rightarrow Z_{cc} = 2,53 + j.7,59$$

$$Z_{d_{cc}}^{GD} = 2,53 + j.7,59$$

$$Z_{h_{cc}} = 7,59 + j.22,77$$

ANNEXE B

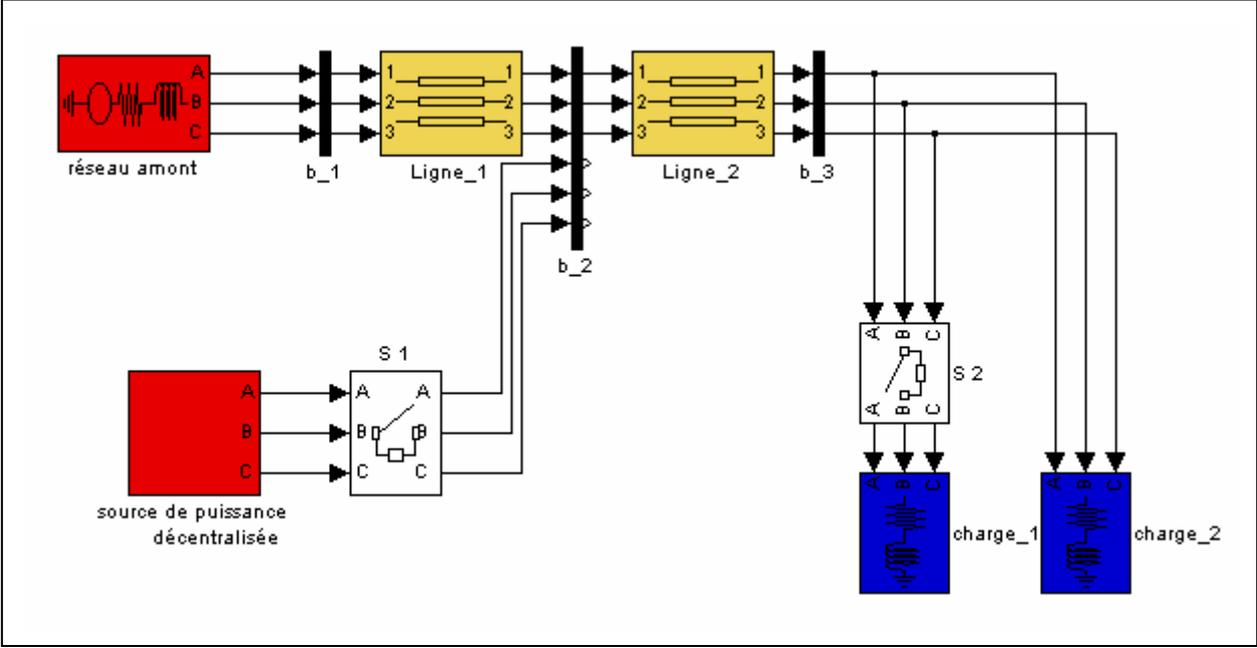


Figure 1 : réseau de simulation

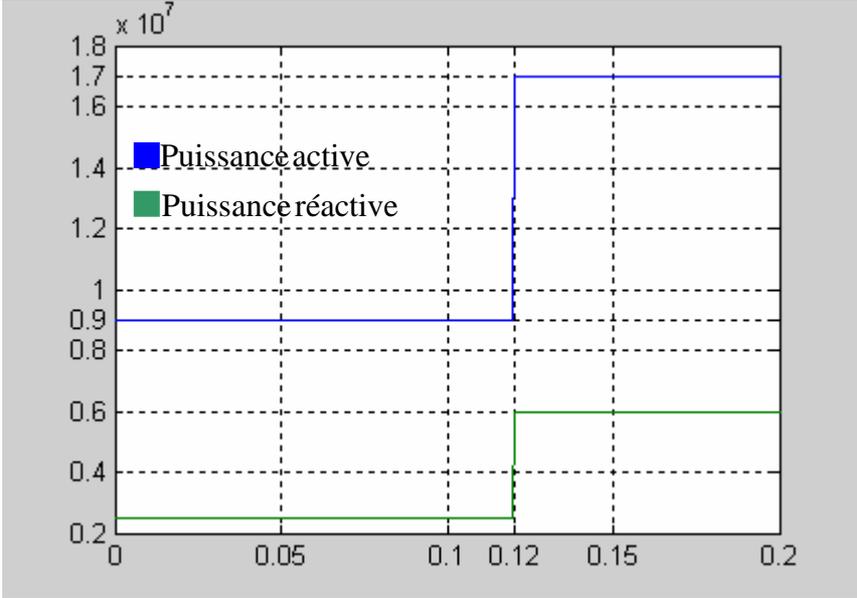


Figure 2 : profil de la demande des puissances par la charge

ANNEXE B

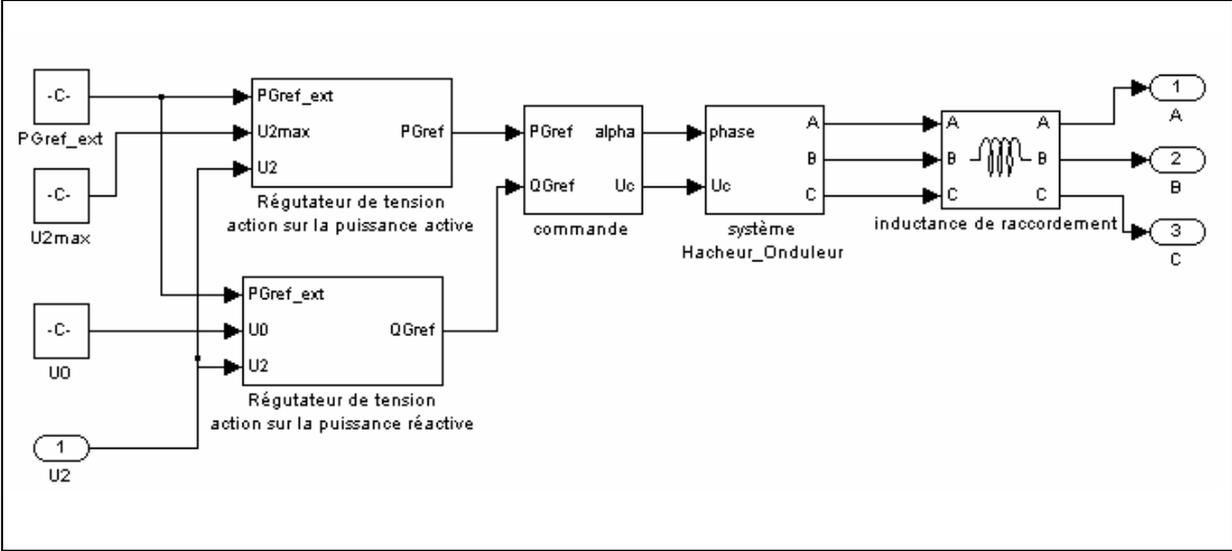


Figure 3 : Source de production décentralisée

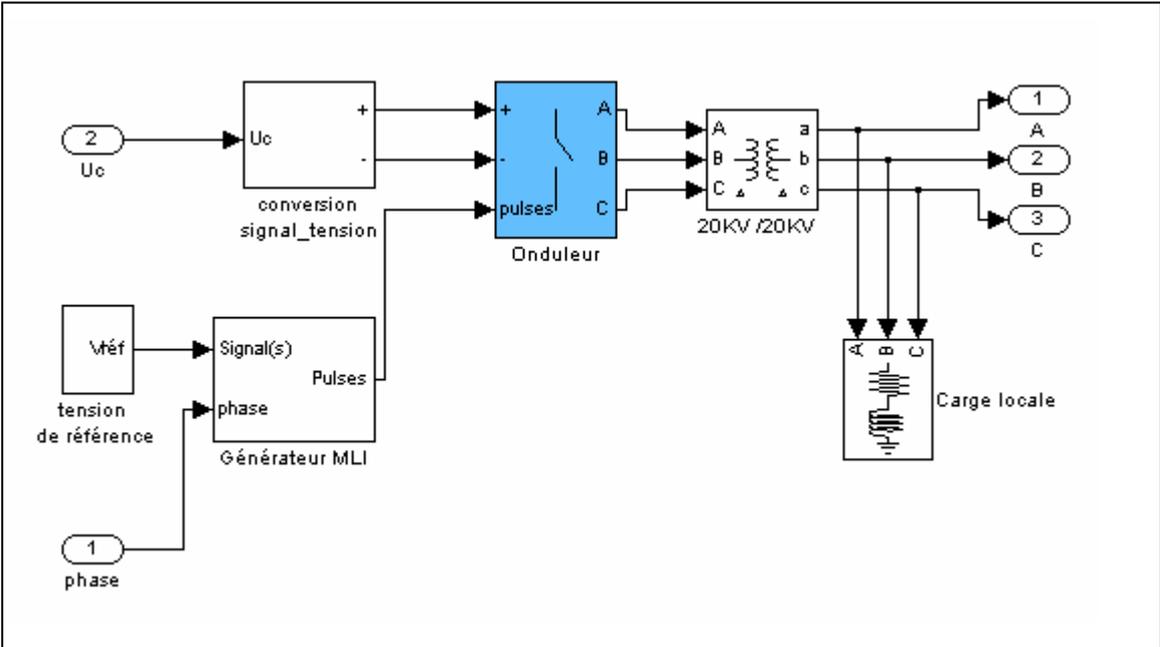


Figure 4 : système Hacheur / Onduleur

ANNEXE B

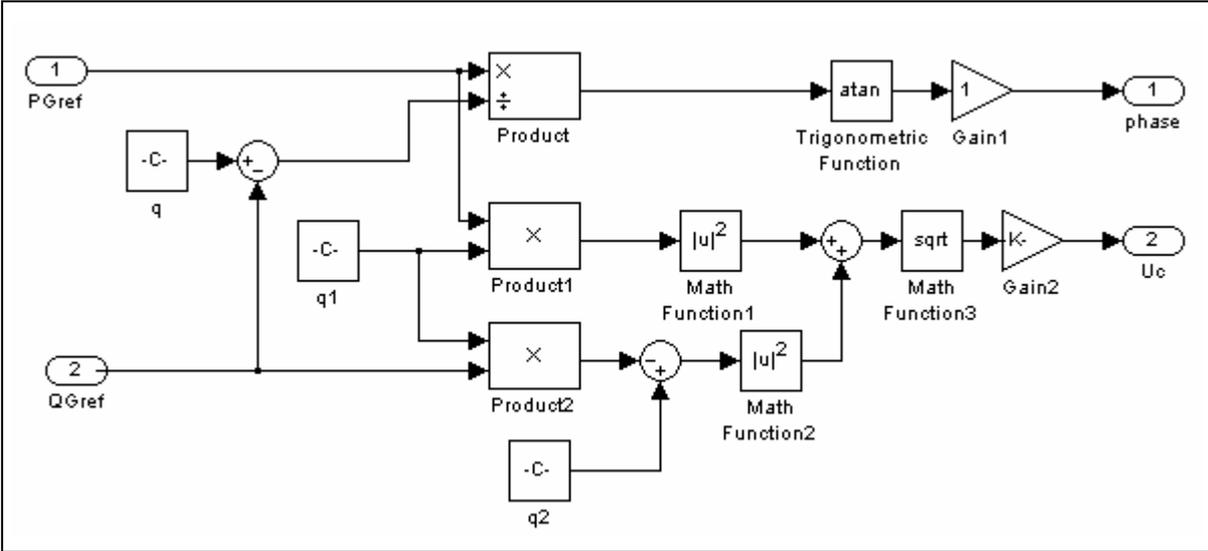


Figure 5 : Commande du système Hacheur / Onduleur

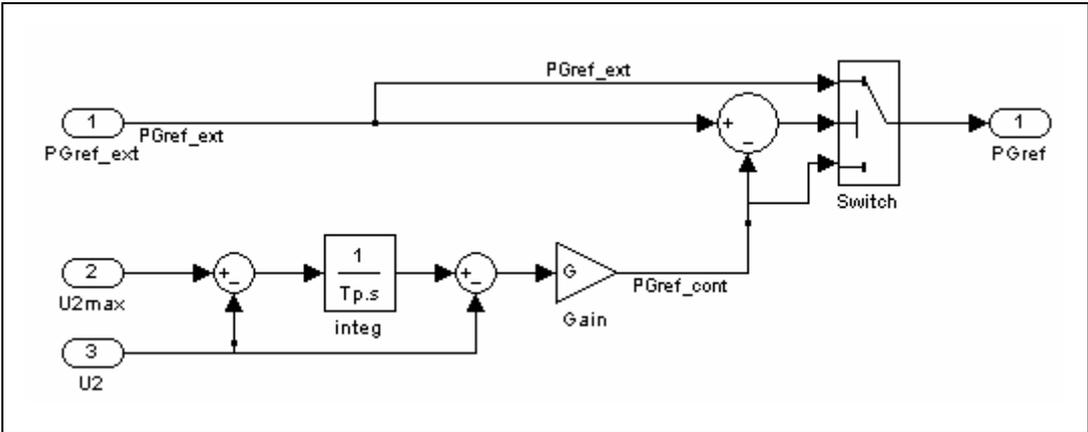


Figure 6 : Régulateur de tension par l'action sur la puissance active

ANNEXE B

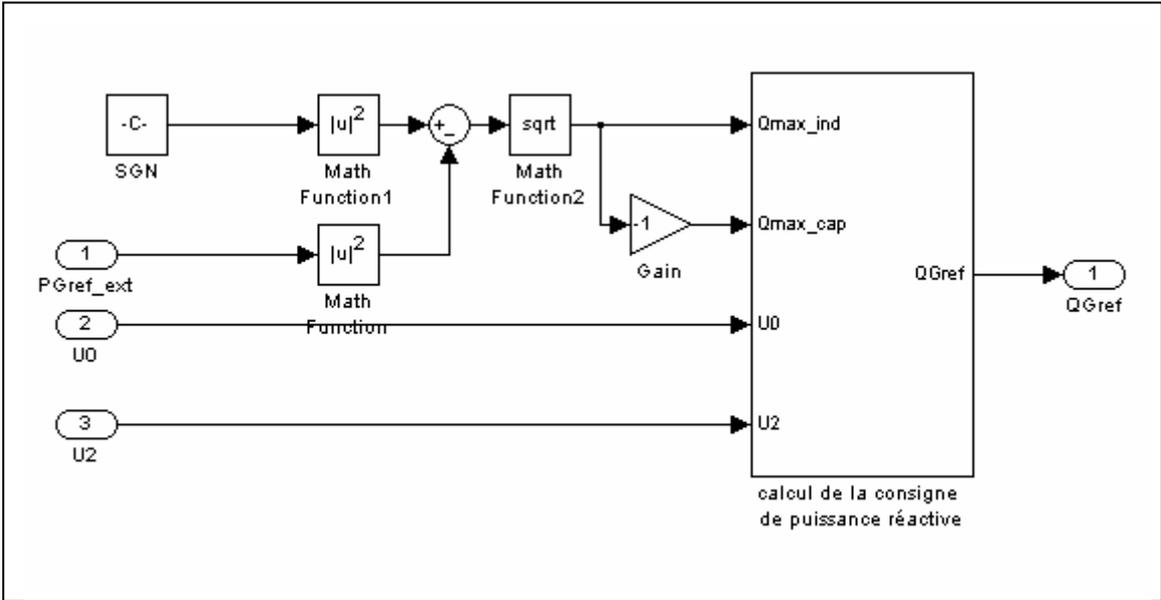


Figure 6 : Régulateur de tension par l'action sur la puissance réactive

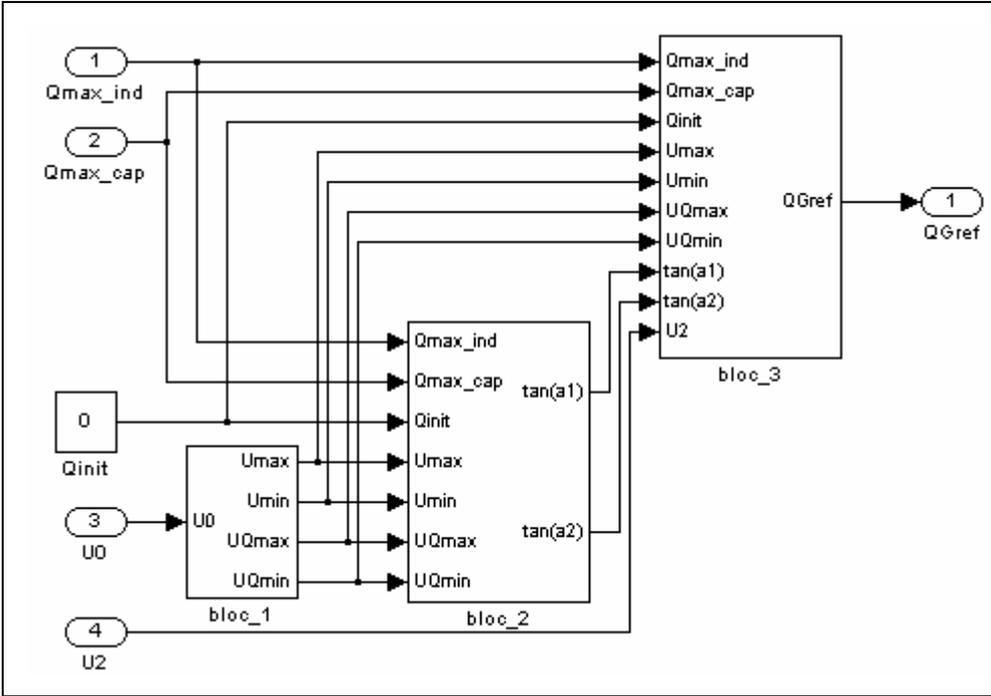


Figure7 : Calcul de la consigne de la puissance réactive

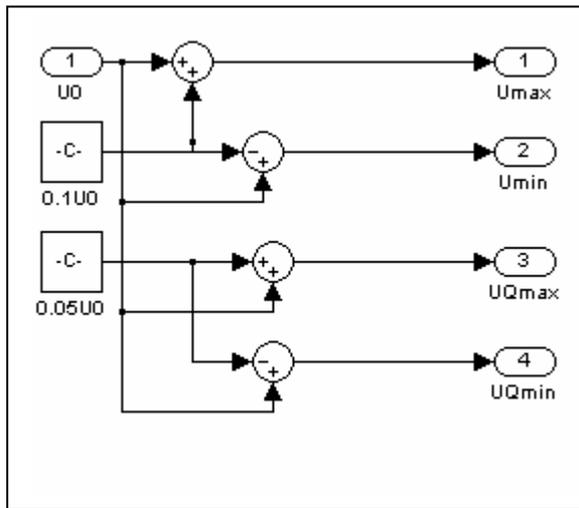


Figure 8 : Bloc 1

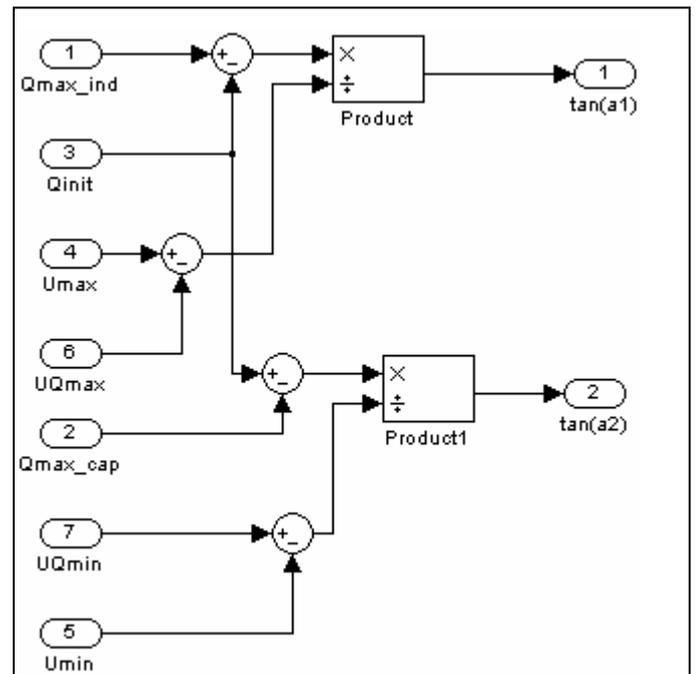


Figure 8 : Bloc 2

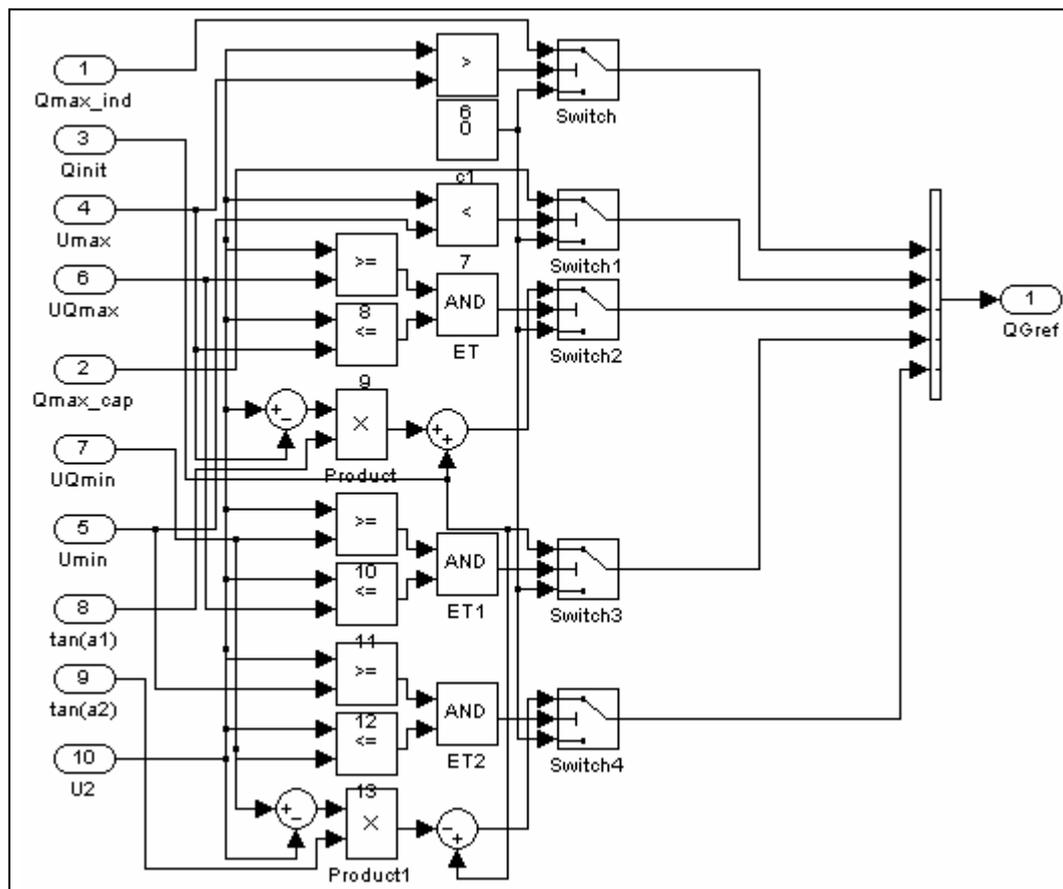


Figure 8 : Bloc 3

BIBLIOGRAPHIE

- [AZI_06] AZIZA BENABOUD. (Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe. Interface entre turbo-alternateur à haute vitesse et réseau électrique). Thèse de doctorat. Ecole polytechnique fédérale de LAUSANNE. 2006
- [CAL_02] R.CALDON. (Reactive power control in distribution network with dispersed generation generators). IEEE 0378-7796/02. 2002.
- [CHI_91] CHRISTIAN PURET. (Les réseaux de distribution publique MT dans le monde). Cahier technique Merlin Gerin No. 155. 1991.
- [CAR_90] P.CARRIVE. (Structure et planification, réseau de distribution. Technique de l'ingénieur), traité de l'électricité 1990.
- [CON_05] CONG DUC PHAM. (Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée). Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE. 2005
- [CRA_03] MICHEL CRAPPE. (Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques). Editeur Lavoisier, 2003.
- [EMA_05] E MANUEL FIORIN MOGOS. (Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources). Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE. 2005
- [ION_03] ION ETXEBERRIA-OTADUI. (Sur systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie). Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE. 2003

BIBLIOGRAPHIE

- [JUS_01] PH. JUSTON. (Outil d'étude de raccordement des producteurs sur les réseaux moyenne tension). CIDER2001 Conférence publication No. 482 IEE 2001.
- [JEA_97] JEAN-PAUL BARRET. (Simulation des réseaux électrique). EDITION EYROLLES 1997.
- [MER_03] MERLIN GERIN. (Protection des réseaux électrique). Guide de la protection 2002.
- [MIC_03] MICHEL CRAPPE. (Commande et régulation des réseaux électrique). LAVOISIER 2003
- [NED_06] NEDELCHO NEDELICHEV. (Analysis of short circuit in distribution networks with dispersed generation). IEEE 1-4244-0232-8/06. 2006
- [NOU_02] NOUREDINE HADJSAID. (Fault detection, analysis and diagnostics in high-DG distribution systems). Publication de l'CRISP ENK5-CT-2002-00673
- [OLL_73] OLLE ELGERD. (Electric energy systems). New York 1973.
- [OLI_06] OLIVIER RICHARDOT. (Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée). Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE. 2006
- [REN_71] RENE PELISSIER. (Calcul et réglage des réseaux). TOME 2 EDITION DUNOD 1971.
- [REN_71] RENE PELISSIER. (Les aspects techniques du service). TOME 1 EDITION DUNOD 1971.

BIBLIOGRAPHIE

- [SAL_04] SALMA EL AIMANI. (Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension). Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie de LILLE. 2004
- [SEG 99] SEGUIER G. (Electronique de puissance) : les fonctions de base et leurs principales applications, 7^{ème} édition, DUNOD, Paris, 1999.
- [RAI_01] B. RAISON M. CRAPPE, (Intégration de la production décentralisée dans les réseaux électriques). Cours pour une formation destinée à l'ADEME. Service d'électrotechnique, Faculté polytechnique de Mons, 5/7/2001.
- [YAN_04] YANN PANKOW. (Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque). Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie de LILLE. 2004

في هذه الأطروحة سوف نتطرق إلى دراسة الدارات القصيرة في الشبكات الكهربائية للتوزيع ذات توتر متوسط في حالة وجود منبع للطاقة الكهربائية غير مقيد.

الجزء الأول للأطروحة متعلق بكيفية استغلال و تقسيم الشبكات الكهربائية للتوزيع ذات توتر متوسط مع اعطاء تعريف لمنبع الطاقة الكهربائية الغير مقيد مما يمكننا التفريق بين منبع للطاقة الكهربائية المقيد و الغير مقيد.

الجزء الثاني للأطروحة متعلق بحساب التيار الكهربائي للدارات القصيرة مما سيمكننا باستنتاج القيمة المضافة من طرف المنبع الطاقة الكهربائية الغير مقيد.

الجزء الثالث للأطروحة متعلق بالجزء الوسيط بين المنبع للطاقة الكهربائية الغير مقيد و الشبكة الكهربائية للتوزيع ذات توتر متوسط، حيث ستمكننا من تقليص القيمة المضافة من طرف المنبع الطاقة الكهربائية الغير مقيد.

Ce travail porte sur l'étude des courant de court-circuit dans les réseaux de distribution HTA en présence de la génération dispersée.

La première partie du mémoire est consacrée à l'exploitation et la classification des réseaux de distribution HTA. Une définition de la production décentralisée a permis de distinguer le fonctionnement entre une centrale centralisée et une centrale décentralisée.

La deuxième partie du mémoire est consacrée au calcul du courant de court-circuit et la détermination de la contribution en courant de court-circuit de la génération décentralisée.

La troisième partie du mémoire est consacrée à l'étude de l'interface réseau électrique - production décentralisée. Cette étude nous a permis de minimiser la contribution de la source de production décentralisée en matière de courant de court-circuit

This work of thesis concerned the study of the currents of short-circuit in the distribution networks HTA in the presence of the dispersed generation.

The first part of the report devoted on the exploitation and the classification of the distribution networks HTA. A definition of the decentralized production will make it possible to distinguish operation between a centralized power station and a decentralized power station.

The second part of the report is devoted on calculation of the current of short-circuit and the determination of the contribution while running of short-circuit of the decentralized generation.

The third part of the report devoted on the interface between the electrical supply network and the decentralized production. This study we a makes it possible to minimize the contribution of the source of production decentralized as regards current of short-circuit.
