



REPUBLIQUE ALGERIENNE  
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

## MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

**Electrotechnique industrielle**

### THEME

**Régulation de la tension par DVR commandé en tension par  
régulateur fractionnel**

Présenté par le binôme :

- CHACHOUA Sofiane
- GHENAIET Meriem

Devant le jury :

- |                            |           |
|----------------------------|-----------|
| - Dr. BOUGUERNE Abla       | Président |
| - Dr. BENDAKIR Abd Elhakim | Encadreur |
| - Dr. NEHAL Ouassila       | Examineur |

Année Universitaire 2019 / 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Remerciement

*Nous remercions, Dieu, le tout puissant pour nous avoir donné  
la foi qui nous a guidés jusqu'à la réalisation et  
l'aboutissement de ce projet.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus distingués :*

*À notre promoteur Mr Bendakir Abd Flhakim , de nous  
avoir fait l'honneur d'assurer l'encadrement de notre travail,  
nous vous sommes très reconnaissants d'avoir veillé à son  
élaboration en ne ménageant aucunement votre temps et vos  
précieux et judicieux conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement les membres du jury d'avoir  
consacré de leur temps à la lecture de ce manuscrit, d'accepter  
de juger et d'évaluer ce travail.*

*Par le biais de ce travail, nous exprimons notre profonde  
gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont  
aidées à accompagner notre travail.*

*Nous voudrions remercier nos familles qui nous ont soutenus  
dans nos études*

## إهداء

❖ أحمذك الهي فانه لا يطيب الليل إلا بشكرك ... ولا يطيب النهار إلا بطاعتك ... ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك ... ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك ... ولا تطيب الجنة إلا برويتك.

❖ إلى من كلله الله بالهيبية والوقار ... إلى من احمل اسمه بكل افتخار ... أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم اهتدي بها اليوم وفي الغد والى الأبد" والدي العزيز"

❖ إلى ملاكي في الحياة ... إلى معنى الحب ... وإلى معنى الحنان والتفاني ... إلى بسملة الحياة  
وسر

الوجود ... الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي ... إلى أغلى الحبايب " أمي الحبيبة."

❖ إلى من بها اكبر وعليها اعتمد ... إلى شمعة متقدة تنير ظلمة حياتي ... إلى من بوجودها اكتسب قوة و محبة لا حدود لها ... إلى من عرفت معها معنى الحياة ... إلى توأم روحي "بسملة."

❖ إلى إخوتي ورفقاء دربي , وهذه الحياة دونكم لا شيء معكم أكون أنا ودونكم أكون مثل أي شيء

... وفي نهاية مشواري أريد ان أشكركم على موافقكم النبيلة والى تطلعكم إلى نجاحي بنظرات الأمل " أيمن عبد العزيز الطاهر رفيق."

❖ إلى صاحبتني القلب الطيب والروح الحنونة الى اختاي " احلام اميرة. "

❖ إلى براعم قلبي ... إلى شعلة الذكاء و النور ... إلى الوجه المفعم بالبراءة ... يا من بمحبتهم أزهرت أيامي " ريتاج إسماعيل روميساء ألاء الرحمان محمد عبيدة."

❖ إلى من انارت لي السبيل وكانت لي به دوما دليل الى من كانت قدوة ونورا وضاءا الى استاذتي

الغالية " نادية."

❖ إلى من تحلين بالإخاء وتميزن بالوفاء والعطاء ... إلى من معهن سعدت وبرفقتهن في دروب الحياة سرت ... إلى من كن معي على طريق النجاح صديقاتي "شهرة شيماء رحمة بثينة ايمان وفاء"



غنيات مريم

# إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم  
و الصلاة و السلام على أشرف المرسلين سيد الخلق أجمعين سيدنا محمد صل الله عليه و سلم.  
الحمد لله و الشكر لله نطوي سهر الليالي و تعب الأيام و خلاصة مشوارنا بين دفتي هذا العمل  
المتواضع.

## إلى أبي الغالي

إلى رمز التضحية و الوفاء ...إلى الذي ساندني و كان بجانبني و تعب لأجلي وقاصى مرارة الحياة  
و صبر عليها لأصل إلى ما أنا عليه الآن ...ليتة بجانبني الآن لأرى الفرحة في عينيه كما كان يفرح  
عند رؤيتي و أرى بريق حبه لي.  
رحمه الله و أسكنه فسيح جنانه.

## إلى أمي العزيزة

إلى رمز الحنان و الإخلاص ...إلى التي تفضلني على نفسها لتسعدني ...إلى التي تحرم نفسها  
لترضييني ...إلى التي تسهر لياليها لراحتي ...إلى جنتي ....حفظها الله لي.

## إلى إخوتي الأعزاء

إلى الذين كبرت بينهم....وأسير على الدرب معهم.... إلى عزوتي و أحبتي....

## إلى أساتذتي الكرام

إلى من علموني حرفا و ملكوني عبدا...

إلى أستاذي العزيز الدكتور : بن دكير عبدالحكيم  
الذي كان خير حكيم و أحسن وجيه في رسالتنا.



شعشوع سفيان



***Sommaire***

# Sommaire

---

Liste de Figure .....	
Liste de Tableau.....	
Liste de l'abréviation et Symbole.....	
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'Amélioration de la Qualité d'Energie Electrique</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.2.1. Qualité de la tension.....	3
I.2.1.1. Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz.....	4
I.2.1.2. Les variations de l'amplitude.....	4
I.2.1.3. La modification de la forme d'onde de la tension.....	4
I.2.1.4. La dissymétrie du système triphasé.....	4
I.2.2 Qualité du courant.....	4
I.3. Classification des perturbations électriques.....	5
I.3.1. Creux de tension et coupures brèves.....	5
I.3.2. Les surtensions.....	6
I.3.3. Variation rapides de la tension-Flicker.....	6
I.3.4. Déséquilibre de système triphasé de tensions.....	7
I.3.5. Les harmoniques.....	8
I.3.6. Inter-Harmoniques.....	8
I.3.7. Variation de fréquence d'alimentation.....	9
I.4. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	10
I.4.1. Non symétrie (Déséquilibres) de la tension.....	12
I.4.2. Creux de tension et coupures.....	12
I.4.3. Harmoniques.....	13
I.4.4. Surtensions.....	14
I.4.4.1. Surtensions à fréquence industrielle.....	14

---

---

# Sommaire

---

I.4.4.2. Surtensions de manœuvre.....	14
I.4.4.3. Surtensions atmosphériques.....	14
I.4.5. Fluctuations de la tension.....	14
I.5. Filtrage actif.....	15
I.5.1. Classification des filtres actifs.....	15
I.5.2. Filtrage série.....	16
I.6. Système de transmission flexible en courant alternatif (FACT).....	16
I.6.1. Définition de l'acronyme « FACTS ».....	17
I.6.2. Nécessité des dispositifs FACTS.....	17
I.6.3. Les principaux dispositifs FACTS.....	17
I.6.3.1. Dispositifs Séries.....	18
I.6.3.1.1. DVR (restaurateur dynamique de tension).....	18
I.7. Conclusion.....	19

## **Chapitre II : Étude de Régulateur fractionnel**

II.1. Introduction.....	20
II.2. Définitions.....	20
II.2.1. Définition de Riemann-Liouville.....	21
II.2.2 Définition de Grünwald-Letnikov.....	21
II.2.3 Définition de Caputo.....	22
II.3 Méthodes d'approximation des opérateurs d'ordre fractionnaire.....	23
II.3.1. Méthode générale d'approximation des opérateurs intégral-différentiel fractionnaire.....	23
II.3.2 La méthode de Charef : Fonction de singularité.....	23
II.3.2.1 Approximation de l'opérateur intégrateur d'ordre fractionnaire.....	23
• Exemple Illustratif.....	25
II.4. Correcteur PID.....	25
II.4.1. Correcteur PID classique.....	25

---



---

## Sommaire

---

II.4.2 Correcteur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$ .....	26
II.4.2.1. Approximation d'un $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire par une fonction rationnelle.....	27
• Exemple Illustratif .....	27
II.4.2.2. La méthode d'optimisation des paramètres $PI^\lambda D^\mu$ fractionnel.....	28
II.4.2.2.1. Optimisation par Essaim Particulaire(PSO).....	29
II.4.2.2.2. Principe de fonctionnement de PSO.....	29
II.4.2.2.3.Mécanisme de confinement.....	31
II.5 Conclusion.....	32

### **Chapitre III : Etude et modélisation d'un DVR.**

III.1. Introduction.....	33
III.2. Structure d'un DVR.....	33
III.3. Principe de fonctionnement du DVR.....	33
III.4. Modélisation de DVR.....	35
III.4.1. Identification des tensions perturbatrices.....	35
III.4.2. Schéma de circuit équivalent de DVR.....	36
III.4.3. Modèle mathématique du DVR.....	37
III.4.4. Stratégie de contrôle de DVR.....	38
III.4.5 Modélisation de VSC.....	38
III.4.5.1 Amplitude de la tension de référence.....	38
III.4.5.2 Transformation de Park.....	39
III.4.5.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	40
III.4.5.3.1 Structure de base d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	40
III.4.5.3.2 Fonction de commutation.....	41
III.4.5.3.3 Tension de sortie.....	41
III.4.5.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion.....	42
III.4.5.4.1 Principe de base de MLI.....	43

---

# Sommaire

---

III.4.5.4.2 Caractéristiques de la modulation.....	43
III.4.5.5. Contrôle de la commande par $PI^\lambda D^\mu$ fractionnel.....	44
III.5. Conclusion.....	44

## Chapitre IV : Simulation et résultat de DVR au raccordement de réseau

IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Réseau étudié.....	45
IV.3 État de Fonctionnement du réseau.....	46
IV.3.1.Fonctionnement en régime normal.....	46
• Résultat de simulation.....	46
• Interprétation des résultats.....	47
IV.3.2. Etude de réseau perturbé.....	47
IV.3.2.1. Cas d'un creux de tension.....	47
IV.3.2.1.1. Réseaux sans DVR.....	48
• Résultat de simulation.....	48
IV.3.2.1.2. Réseaux avec DVR.....	49
➤ Application de $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire sur DVR .....	49
➤ Réglage par PSO .....	50
➤ Stratégie de control de DVR par régulateur fractionnaire .....	50
• Résultat de simulation.....	51
• Interprétation des résultats.....	53
IV.3.2.2. Cas d'un défaut surtension.....	53
➤ Schéma bloc d'un défaut surtension.....	54
• Explication de bloc.....	54
IV.3.2.2.1.Réseaux sans DVR.....	55
• Résultat de simulation.....	55
IV.3.2.2.2.Réseaux avec DVR.....	56
• Résultat de simulation.....	56

---

# Sommaire

---

• Interprétation des résultats.....	57
IV.3.2.3. Cas d'un défaut déséquilibre.....	58
➤ Schéma bloc d'un défaut déséquilibre.....	58
• Explication de bloc.....	59
IV.3.2.3.1. Réseaux sans DVR.....	60
• Résultat de simulation.....	60
IV.3.2.3.2. Réseaux avec DVR.....	61
• Résultat de simulation.....	61
• Interprétation des résultats.....	63
IV.4. Analyse comparative des harmoniques dans le réseau.....	63
IV.4.1. Réseau sans DVR.....	64
• Résultat de simulation.....	64
IV.4.2. Réseau avec DVR.....	65
• Résultat de simulation.....	65
• Interprétation des résultats.....	66
IV.5. Conclusion.....	66
Conclusion Générale.....	67

---



*Liste de figure*

## Liste des figures

### Chapitre I

**Figure I.1 :** Exemple de perturbation réseau basse tension (BT).

**Figure I.2 :** Creux et coupures de tension.

**Figure I.3 :** Exemple de surtension.

**Figure I.4 :** Variation rapide de tension.

**Figure I.5 :** Déséquilibre de systèmes triphasés.

**Figure I.6 :** Harmoniques.

**Figure I.7 :** Variation de la fréquence.

**Figure I.8 :** Filtrage actif série.

**Figure I.9 :** Schéma de la structure d'un DVR.

### Chapitre II

**Figure II.1 :** Tracé de Bode amplitude et phase de  $P^{0.7}$  et son approximé.

**Figure II.2.** Système de commande à retour unitaire classique.

**Figure II.3 :** Disposition du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  dans le plan  $(\lambda, \mu)$ .

**Figure II.4 :** Tracé de Bode de la fonction de transfert du  $PI^{1.7}D^{1.7}$  et son approximation.

**Figure II.5.** Schéma de principe du comportement des particules d'un essaime.

### Chapitre III

**Figure III.1 :** Diagramme vectoriel en cas d'affaissement de tension.

**Figure III.2 :** Modèle d'un système ayant un DVR pour mesurer le défaut de tension.

**Figure III.3 :** Schéma de circuit équivalent du DVR.

**Figure III.4 :** Modèle mathématique d'un restaurateur dynamique pour injection de tension.

**Figure III.5 :** Schéma synoptique de commande de DVR.

**Figure III.6 :** Passage du système triphasé au système biphasé et inversement.

---

## Liste des figures

---

**Figure III.7 :** Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

**Figure III.8 :** Schéma synoptique de la MLI.

**Figure III.9.** Schéma block de  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnel

## Chapitre IV

**Figure IV.1 :** Schéma unifilaire du réseau étudié.

**Figure IV.2 :** Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement en régime normal.

**Figure IV. 3.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 4.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV.5.** Schéma bloc d'un réseau au fonctionnement perturbé (Creux de tension)

**Figure IV. 6.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 7.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV.8.** Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement perturbé en présence de DVR

**Figure IV.9.** Schéma bloc de DVR

**Figure IV. 10.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 11.** Tension injecté par DVR

**Figure IV. 12.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 13.** Courant injecté par DVR

**Figure IV. 14.** Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement perturbé (surtension)

**Figure IV.15.** Schéma bloc d'un défaut surtension

**Figure IV. 16.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 17.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 18.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 19.** Tension injecté par DVR

**Figure IV. 20.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

**Figure IV. 21.** Courant injecté par DVR

**Figure IV. 22.** Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement perturbé (Déséquilibre)

---

## Liste des figures

---

- Figure IV.23.** Schéma bloc d'un défaut déséquilibre
- Figure IV. 24.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV. 25.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV. 26.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV. 27.** Tension injecté par DVR
- Figure IV. 28.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV. 29.** Courant injecté par DVR
- Figure IV. 30.** Schéma bloc d'un réseau
- Figure IV. 31.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV.32.** Analyse des harmoniques de réseau sans DVR
- Figure IV. 33.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2
- Figure IV.34.** Analyse des harmoniques de réseau avec DVR
-



***Liste de tableaux***



# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

### Chapitre I

**Tableau I.1** : Vue d'ensemble des principales perturbations électriques

### Chapitre IV

**Tableau IV.1** Performances obtenues par PSO

---



*Liste  
d'abréviation et  
symbole*

---

# Liste des Symboles et abréviations

---

## Liste des Symboles et abréviations

<b>ASI</b>	(Alimentation Sans Interruption)
<b>IGBT</b>	(Insulated Gate Bipolar Transistors)
<b>GTO</b>	(Gate Turn-Off Thyristor, ou Thyristors à Ouverture par Gâchette)
<b>FACTS</b>	(Flexible Alternating Current Transmission System)
<b>IEEE</b>	(Institute of Electrical and Electronics Engineers)
<b>DVR</b>	(restaurateur dynamique de tension)
<b>SSSC</b>	(Compensateur série synchrone statique)
<b>SVC</b>	(Compensateur statique de l'énergie réactive)
<b>STATCOM</b>	(Static Synchronous Compensator)
<b>UPFC</b>	(Unified Power Flow Controller)
<b>PCC</b>	(point d'accouplement commun)
<b>VSC</b>	(Voltage Source Converter)
<b>MOSFET</b>	(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
<b>MLI</b>	(Modulation de largeur d'impulsion)
<b>PSO</b>	(Optimisation pas essaim particulaire)
<b>GL</b>	(Grunwald-Letnikov)
<b>RL</b>	( Riemann-Liouville )
<b>PPF</b>	(pôle à puissance fractionnaire)
<b>PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup></b>	(proportionnel intégrales dérivées)
<b>TR</b>	(transformateurs)

---

---

# Liste des Symboles et abréviations

---

## Notions et symboles

<b>PU</b>	La grandeur en unité relative (grandeur réduite).
<b><math>V_{dvr}</math></b>	Tension injecte par DVR
<b><math>\emptyset</math></b>	L'angle de facteur de charge
<b><math>\delta</math></b>	L'angle de phase
<b><math>V_s</math></b>	Tension d'alimentation de la source
<b><math>Z_d</math></b>	Impédances de défaut
<b><math>Z_s</math></b>	Impédances de la Source
<b><math>P_s</math></b>	La puissance active d'entrée de la source
<b><math>P_{ch}</math></b>	La puissance active de charge
<b><math>Q_s</math></b>	La puissance réactive d'entrée de la source
<b><math>Q_{ch}</math></b>	La puissance réactive de charge
<b><math>P_{dvr}</math></b>	Puissance active de DVR
<b><math>Q_{dvr}</math></b>	Puissance réactive de DVR
<b><math>V_{INJ}</math></b>	La tension injectée en série du DVR
<b><math>V_L</math></b>	Amplitude de tension de charge souhaitée
<b><math>I_L</math></b>	Le courant de charge
<b>d (indice)</b>	La composante sur l'axe d du repère (d-q)
<b>q (indice)</b>	La composante sur l'axe q du repère (d-q)
<b><math>M_R</math></b>	Le coefficient de réglage
<b><math>M_I</math></b>	L'indice de modulation
<b><math>N_P</math></b>	Nombre de particules de l'essaim
<b><math>N_d</math></b>	Nombre de variables du problème(c-à-d la dimension d'une particule)
<b><math>k_{max}</math></b>	Nombre maximal d'itération
<b>w</b>	Coefficient d'inertie
<b><math>c_1</math> et <math>c_2</math></b>	Coefficients d'accélération

---

## Liste des Symboles et abréviations

---

$\mathcal{D}_t^\alpha$  Opérateur intégral-différentiel continu.

$c$  et  $t$  limites de l'opération.

$N$  Le nombre de pôles d'approximation

$\lambda, \mu$  ordres fractionnaires

---



***Introduction  
générale***

## **Introduction générale**

Les défauts sur les réseaux provoquent des perturbations affectant leur fonctionnement et la qualité d'alimentation de la clientèle. Par exemple, un défaut mal éliminé sur le réseau THT de transport et d'interconnexion peut conduire à un incident de grande ampleur privant d'alimentation une partie importante du territoire alors que les défauts sur les réseaux de répartition HT entraînent des creux de tension ou des coupures brèves, voire des coupures longues, chez les clients.

En effet, pour les industriels, une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut entraîner un dysfonctionnement ou même l'arrêt des outils de production. Le coût des perturbations peut donc être très élevé car il doit tenir compte du manque à production, des retards de livraison... Ces problèmes sont devenus d'autant plus importants que les équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations se sont généralisés.

Les principales perturbations susceptibles d'altérer le fonctionnement optimal des équipements et procédés industriels sont : creux de tension, harmoniques et inter-harmoniques, fluctuations de tension ou Flickers, déséquilibres de tension et surtensions [1].

Une des solutions possibles pour faire face à ces problèmes est l'utilisation de composants FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems, ou système de transmission Flexible à courant alternatif) qui peuvent contribuer à atténuer les problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Ces sont des dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent de commander une ou plusieurs variables électriques : tension, courant et déphasage.

Plusieurs types de FACTS, différents sur les plans architectural et technologique, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive), le TCSC (compensateur série contrôlé par Thyristor), le STATCOM (compensateur Synchrone statique), UPFC (Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance), IPFC (Contrôleur de flux de puissance d'interligne) et SSSC (Compensateur série synchrone statique), et DVR (restaurateur dynamique de tension). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre [2].

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions offertes par le DVR dans la qualité de l'énergie électrique. Il peut être utilisé, particulièrement pour régler la tension.

Le DVR est un dispositif de la qualité de l'énergie qui possède un circuit de commande pour contrôler et surveiller la tension au point d'accouplement commun PCC, et un système de stockage d'énergie ayant des capacités maximale pour injecter des tension compensatrices à travers un transformateur d'injection qui relié cet dispositif en série avec

le réseau. Le DVR peut avoir une excellente exécution dynamique et capable d'une protection critique d'une charge sensible contre les différentes perturbations de tension.

Pour réaliser ce travail, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique » et présente les principaux types de perturbations ainsi que leurs origines, ses conséquences, ainsi présente le filtrage actif et les différents systèmes FACT.

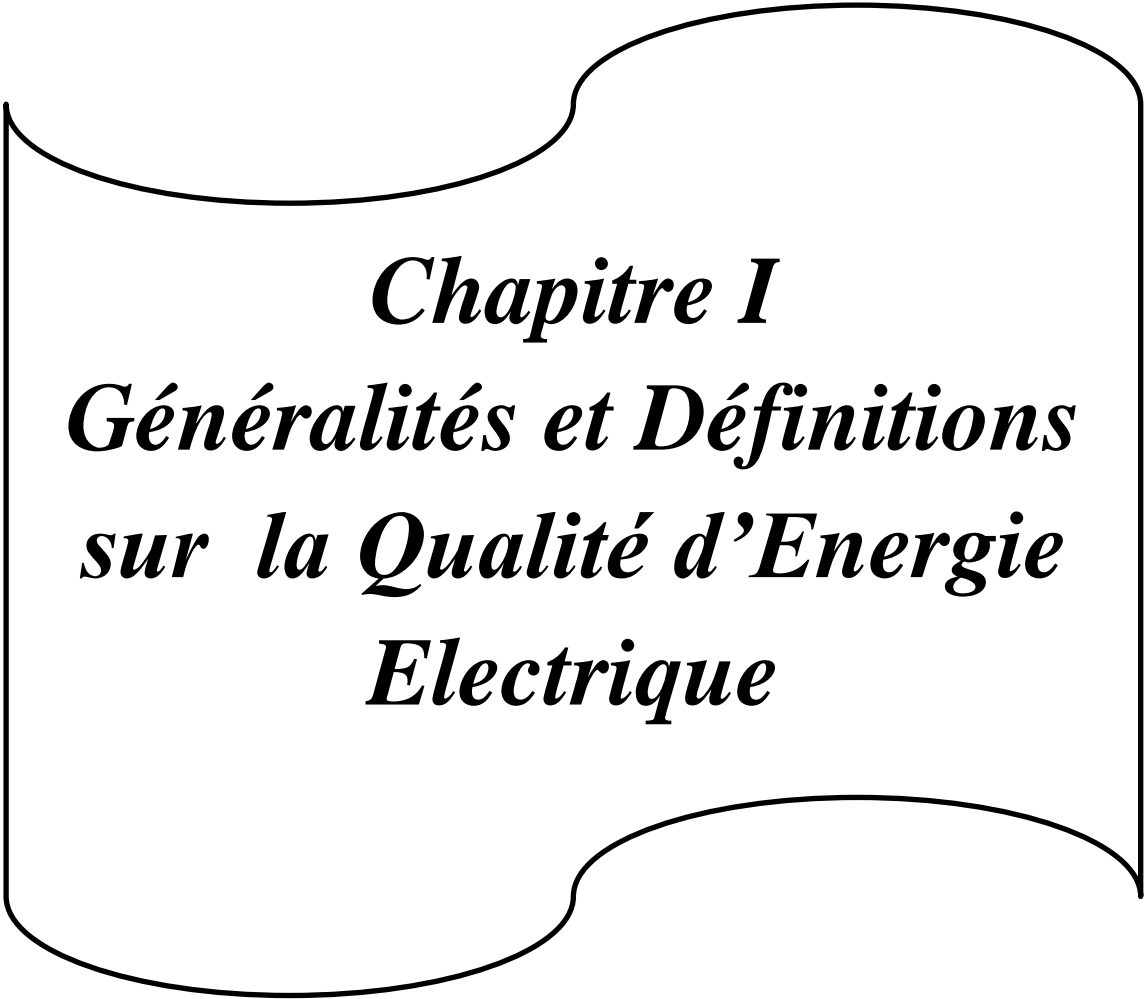
Le deuxième chapitre contiendra une introduction aux éléments de base du calcul d'ordre fractionnaire avec quelques notions essentielles sur celui-ci, nous citerons les méthodes d'approximation rationnelles existantes dans la littérature. Par la suite, ces approximations seront utilisées pour la mise en œuvre du nouveau correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire.

Dans le troisième chapitre, on présentera la structure et le Principe de fonctionnement d'un DVR ainsi que la modélisation de chaque partie de DVR.

Dans le quatrième chapitre, nous étudierons par différentes simulations numériques à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK le comportement d'un DVR inséré dans un réseau électrique soumis à des perturbations. Ce chapitre sera clôturé par des interprétations des résultats obtenus.

Enfin notre travail sera clôturé par une conclusion générale.





***Chapitre I***  
***Généralités et Définitions***  
***sur la Qualité d'Énergie***  
***Électrique***

## **I.1. Introduction**

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions de poche équilibrées aux clients et aux consommateurs, qui constituent le réseau électrique que nous utilisons actuellement.

Cependant, cette tension est sujette aux perturbations et aux changements qui surviennent lors de sa transmission aux clients et consommateurs. Les causes de ces perturbations sont nombreuses, outre les accidents liés à la nature et aux conditions environnementales, ainsi que les matériaux pour la formation du réseau électrique

Pour éviter ces perturbations qui affectent négativement le réseau électrique, ces perturbations doivent être étudiées et comprises, et nous en trouverons les solutions appropriées pour les éliminer. [3].

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles. Nous discuterons ensuite des solutions utilisés pour pallier aux problèmes.

## **I.2. Qualité de l'énergie électrique**

La qualité de l'énergie est certainement une préoccupation majeure dans le présent ; cela devient particulièrement important avec l'introduction de dispositifs sophistiqués, dont les performances sont très sensibles à la qualité de l'alimentation. Les procédés industriels modernes reposent sur un grand dispositif électroniques tels que les contrôleurs logiques programmables et entraînements à vitesse réglable. Les appareils électroniques sont très sensible aux perturbations [4] et donc aux charges industrielles devenir moins tolérants aux problèmes de qualité de l'énergie tels que creux de tension, surtensions et harmoniques.

### **I.2.1. Qualité de la tension**

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales: fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit de la nature non

linéaire de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations, dont les principales sont les suivantes :

#### **I.2.1.1. Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz**

Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.

#### **I.2.1.2. Les variations de l'amplitude**

Il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.

#### **I.2.1.3. La modification de la forme d'onde de la tension**

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

#### **I.2.1.4. La dissymétrie du système triphasé**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. Lorsque cette symétrie n'est plus assurée pour une quelconque raison, on dit que le système est dissymétrique ou déséquilibré.

### **I.2.2 Qualité du courant**

La qualité du courant est relative à une dérive des courant de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme «qualité du courant» est d'usage rare, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, «la qualité de l'énergie électrique» sera souvent réduite à celle de « qualité de tension ». C'est l'hypothèse que nous retiendrons dans la suite de ce mémoire, où le terme de «qualité de l'énergie» s'appliquera uniquement à celle de la tension [5].

### I.3. Classification des perturbations électriques

Les perturbations de la qualité de l'énergie électrique distribuée sont principalement provoquées par les phénomènes suivants :

- Creux de tension et coupures brèves
- Surtensions
- Variations rapides de la tension - Flicker
- Déséquilibre du système triphasé de tension
- Harmoniques et inter-harmoniques
- Variation de fréquence d'alimentation

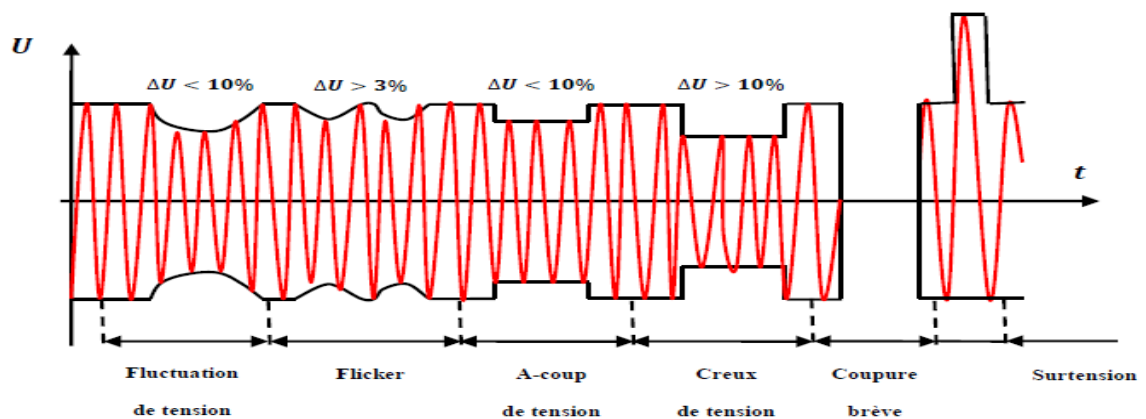


Figure I.1: Exemple de perturbation réseau basse tension (BT)

#### I.3.1. Creux de tension et coupures brèves

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 (ms) jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension [6].

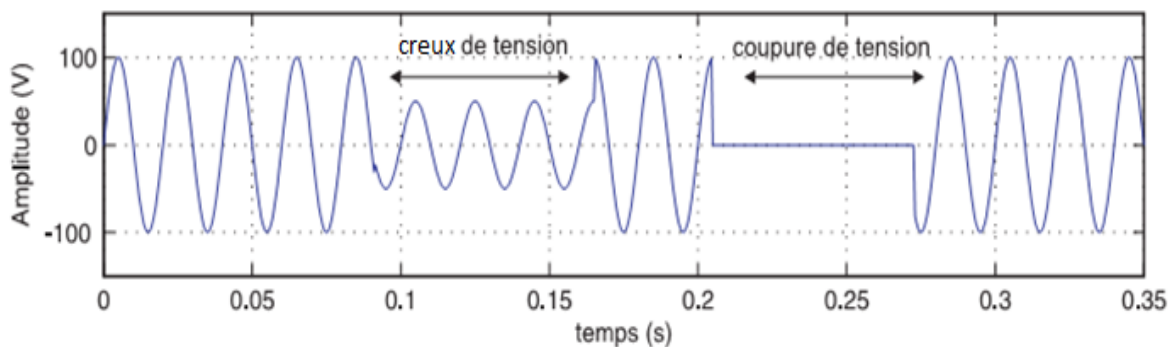


Figure I.2. Creux et coupures de tension.

### I.3.2. Les surtensions

On qualifie de surtension toute augmentation de tension, simple ou composée en fonction du temps, dépassant la valeur crête de 0.1 pu à 0.8 pu. Autrement dit, ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale du réseau illustré sur la figure I.3. Elles peuvent apparaître:

- Entre phase ou différents circuits, dit mode différentiel
- Entre conducteurs actifs et la masse ou la terre, dit mode commun

Les surtension peuvent être principalement d'origine externe (coup de foudre et propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau interne d'usine) ou interne (manœuvres de coupure ou de fermeture d'appareils de protection ou de commandes)[7].

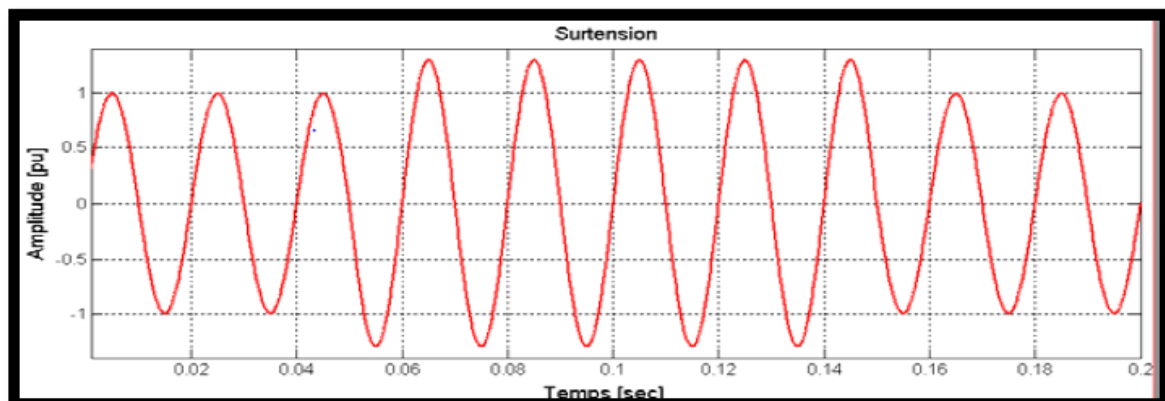
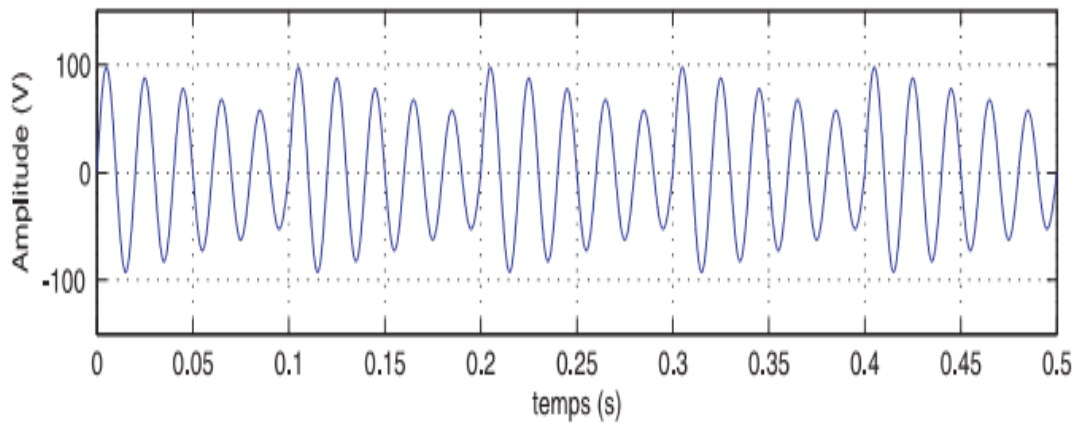


Figure I.3. Exemple de surtension.

### I.3.3. Variation rapides de la tension-Flicker

Les variations d'intensité lumineuse de l'éclairage à incandescence provoquent un papillonnement qui est ressenti comme une gêne par le système visuel humain dès que la tension varie de 1%. Cette gêne se concrétise par des maux de tête, une irritabilité et peut même parfois déclencher des crises d'épilepsie. Ce papillonnement est mesure des variations de tension, défini dans la norme IEC 61000-4-15.

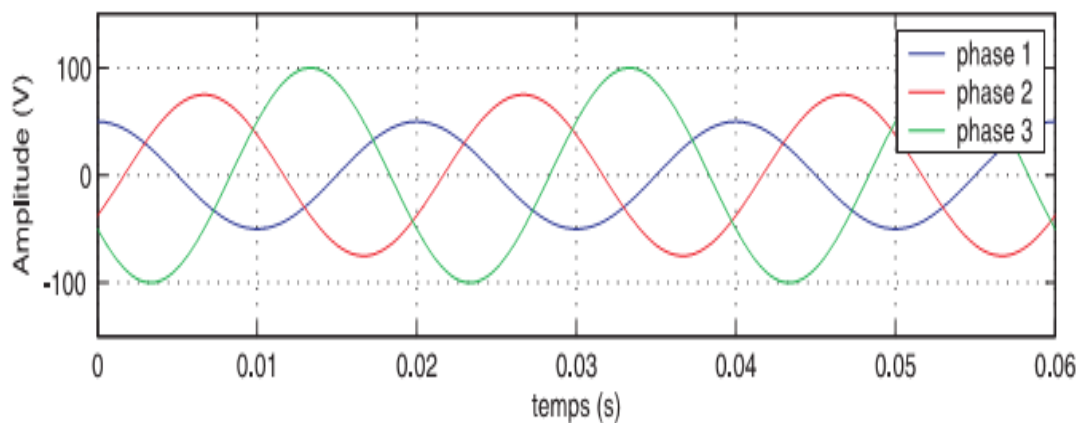
De telles variation de la tension sont en général causées par la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide : fours à arcs, machine à souder, moteurs à démarrages fréquents, imprimantes laser, micro-ondes, système d'air conditionné, etc. [8].



**Figure I.4.** Variation rapide de tension

### I.3.4. Déséquilibre de système triphasé de tensions

Le déséquilibre de récepteurs électriques (triphases ou monophasés) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou lorsqu'elles sont déphasées de  $120^\circ$  les unes rapport aux autres, comme illustré par la figure (I.5).



**Figure I.5.** Déséquilibre de systèmes triphasés.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et ont pour conséquence des couples de freinage parasites et des échauffements qui conduisent à une dégradation prématurée des équipements tels que des moteurs ou toute autre machines asynchrone.

La norme EN 50160 fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2% sur les valeurs efficaces calculées sur dix minutes pour 95% du temps d'une semaine. Il est généralement convenu qu'un déséquilibre inférieur à 2% ne suscite au problème.

La quantification du phénomène fait appel à une méthode dite des composantes symétriques directes, inverse ou homopolaires [8].

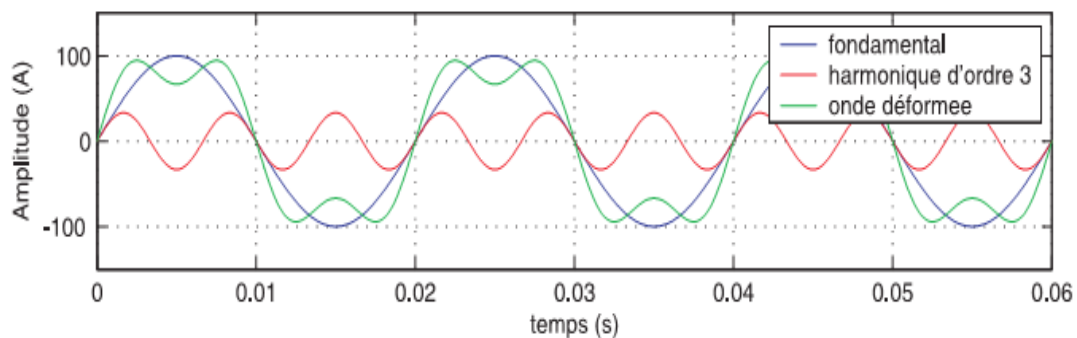
### **I.3.5. Les harmoniques**

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.) [9]

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [10].

### **I.3.6. Inter-Harmoniques**

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau [11]. Les inter-harmoniques sont souvent produites par des convertisseurs statiques de fréquence, les cyclo-convertisseurs, les moteurs asynchrones et les dispositifs à arc électrique [12].

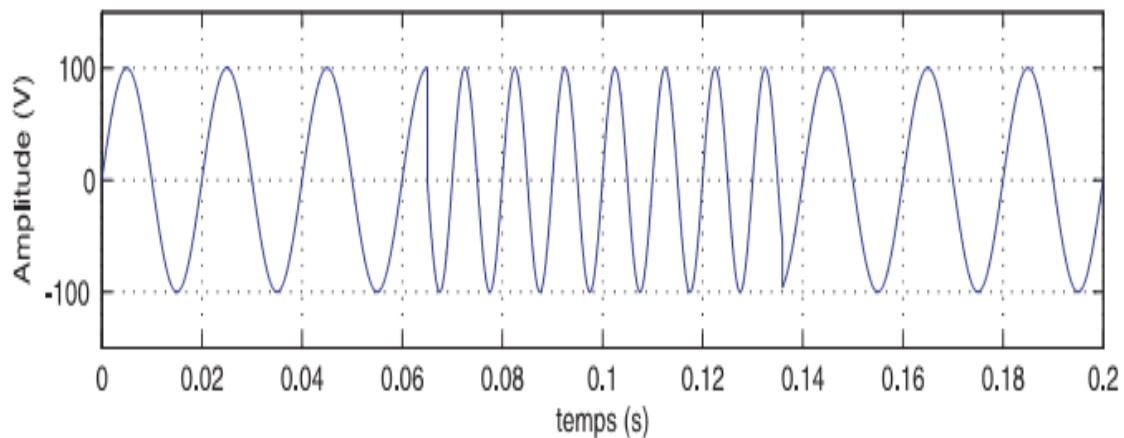


**Figure I.6.** Harmoniques

### I.3.7. Variation de fréquence d'alimentation

La fréquence d'un réseau alternatif est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs. La fréquence dépend de l'équilibre dynamique entre la charge et la puissance des usines de production. Ainsi lorsque le point d'équilibre change, de petites variations de fréquence surgissent.

Dans les réseaux publics d'alimentation, la capacité de production est normalement excédentaire par rapport à la consommation. Cela permet de maintenir les variations de fréquence à l'intérieur de la plage de fréquences désirées. Toutefois, il peut arriver qu'une partie importante de la production ou de la consommation disparaisse. Il s'ensuit des variations de fréquence qui sortent de la plage normalement tolérée. Dans de tels cas, une partie de la production ou de la consommation doit être déconnectée pour rétablir l'équilibre aussi vite que possible [13].



**Figure I.7.** Variation de la fréquence



Duré	Types de perturbations	Amplitude	Origine	Conséquence
10ms-1min	Creux de tension	0.1 - 0.9 pu	Court-circuit, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs.	Arrêts d'équipement, pertes de production.
	Coupures brèves	<0.1 pu	Court-circuit	Arrêts d'équipement, pertes de production.
	Surtensions	1.1 - 1.8 pu	Court-circuit, débranchement des charges importantes.	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Fluctuation de tension	0.1 - 7 %	Charges fluctuantes (fours à arc ,moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes )	Papillotements de l'éclairage
	Déséquilibre		Charges asymétriques ou monophasées.	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Harmoniques	0 - 20 %	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc soudeuses, éoliennes)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels.
	Inter-harmoniques	0 - 2 %	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Variations de la fréquence		Déséquilibres entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Tableau I.1 Vue d'ensemble des principales perturbations électriques

#### I.4. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Ceci suppose trois éléments:

- un ou plusieurs générateurs de perturbations,
- un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations,
- entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations.

Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en KVA, réduction de la consommation).

Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée, en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de qualité de l'énergie électrique sur mesure et adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des perturbations contre lesquelles il faut se prémunir (par ex. les remèdes sont différents selon la durée d'une coupure), est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue. L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend:

- Du niveau de performance souhaité:

Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...)

- Des conséquences financières du dysfonctionnement:

Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.

- Du temps de retour sur investissement souhaité:

C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

D'autres critères tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur sont aussi à prendre en compte.

#### **I.4.1. Non symétrie (Déséquilibres) de la tension**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, les solutions sont:

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases,
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles,
- Prévoir une protection adaptée des machines.
- Augmentation de la puissance de court-circuit,
- Dispositif de rééquilibrage,
- Modification de l'architecture du réseau
- Compensation de la puissance réactive,

#### **I.4.2. Creux de tension et coupures**

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

La solution moderne pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

### **I.4.3. Harmoniques**

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence:

a- Réduction des courants harmoniques générés:

- Inductance de ligne;
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés;
- Appareils à prélèvement sinusoïdal.

Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.

b- Modification de l'installation:

- Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres;
- Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation;
- Déclasser des équipements;
- Confiner les charges polluantes.

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation. Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

- Protections et surdimensionnement des condensateurs.

c- Filtrage:

- Le filtrage passif;
- Le filtrage actif;
- Le filtrage hybride.

-Cas particulier des disjoncteurs:

Les harmoniques peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des dispositifs de protection, pour les éviter il convient de bien choisir ces appareils.

- Le déclassement:

Cette solution, applicable à certains équipements, est une réponse facile et souvent suffisante à la gêne occasionnée par les harmoniques.

#### **I.4.4. Surtensions**

Obtenir une bonne coordination d’isolement c’est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique. Elle nécessite de:

- Connaître le niveau et l’énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau;
- Choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes;
- Utiliser des protections quand cela est nécessaire.

En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrés.

##### **I.4.4.1. Surtensions à fréquence industrielle**

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge ;
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de Ferro résonance ou introduire des pertes (résistances d’amortissement) qui amortissent le phénomène.

##### **I.4.4.2. Surtensions de manœuvre**

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l’installation de self de choc, résistances de pré insertion;
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires;
- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiels et sélectif

##### **I.4.4.3. Surtensions atmosphériques**

- Protection primaire: elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu);
- Protection secondaire: elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre.

Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés et à l’entrée des postes MT/BT.

#### **I.4.5. Fluctuations de la tension**

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L’amplitude de la fluctuation dépend du

rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à :

- Changer de mode d'éclairage: Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence;
- Installer une alimentation sans interruption: Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés ;
- Modifier le perturbateur: Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités;
- Modifier le réseau:  
Augmenter la puissance de court-circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point d'alimentation;  
Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant
- Utiliser un compensateur automatique: Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le flicker peut être réduit de 25 % à 50 %;
- Placer une réactance série : En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30 % le taux de flicker [11].

## **I.5. Filtrage actif**

Les inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution ont conduit à concevoir une nouvelle structure plus flexible de filtrage moderne et efficace appelée filtrage actif, capable de s'adapter avec l'évolution de la charge. Ceci est rendu possible grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, notamment en ce qui concerne les semi-conducteurs de puissance, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT [14][15]. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

### **I.5.1. Classification des filtres actifs**

On peut classer les filtres actifs selon plusieurs critères, comme ses configurations par rapport au réseau, le type d'onduleur qu'il utilise, le nombre de fils. Concernant la configuration par rapport au réseau, on distingue le filtre actif shunt, filtre actif série, ou encore le filtre universel.

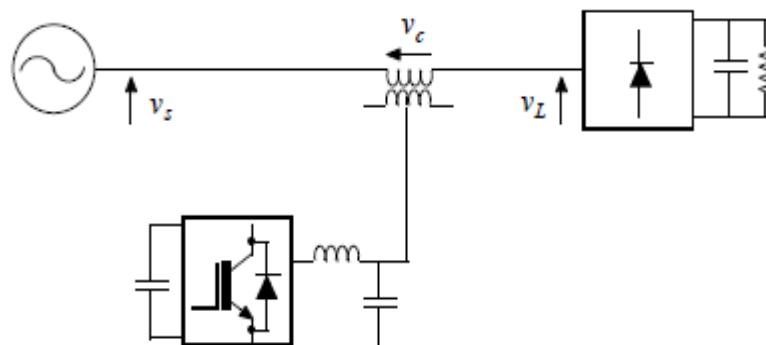
Ce qui nous intéresse dans ce mémoire, c'est le filtre série.

### **I.5. 2. Filtrage série**

Cette configuration est utilisée pour garantir une onde de tension de qualité. Le schéma de principe de ce type de filtre est montré sur la figure I.7, où l'onduleur de tension est cette fois-ci connecté au réseau à travers un filtre passif de type LC et un transformateur série.

Le filtre actif doit injecter une certaine tension  $v_c$  à l'onde de tension  $v_L$ , perturbée par des distorsions harmoniques, d'déséquilibres [16]...etc.

Cette topologie peut jouer aussi le rôle d'un restaurateur dynamique de tension (Dynamic Voltage Restorer DVR) pour protéger la charge contre d'éventuels creux ou coupure de tension [16].



**Figure I.8.** Filtrage actif série.

### **I.6. Système de transmission flexible en courant alternatif (FACT)**

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par Electric Power Research Institute (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides. Ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques. [17]

### **I.6.1. Définition de l'acronyme « FACTS »**

D'après l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), FACTS qui est l'abréviation de «Flexible Alternating Current Transmission Systems» est défini comme suit: « Les systèmes de transmission en courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes électriques »

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: (tension, impédance, déphasage ...etc.). Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie [18]

### **I.6.2. Nécessité des dispositifs FACTS**

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quel que soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs est diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [19].

### **I.6.3. Les principaux dispositifs FACTS**

Les dispositifs FACTS peuvent être divisés en trois catégories:

- Les dispositifs Shunts (SVC , STATCOM ).
- Les dispositifs série (SSSC, DVR).
- Les dispositifs combinés série – parallèle (UPFC).



### I.6.3.1. Dispositifs Série

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive [20].

#### I.6.3.1.1. DVR (restaurateur dynamique de tension)

Le DVR est un dispositif de la qualité d'énergie qui possède un circuit de commande pour contrôler la tension au point d'accouplement commun PCC. Le DVR est un système déstockage d'énergie ayant des capacités maximales pour injecter des tensions compensatrices à travers un transformateur d'injection qui relie ce dispositif en série avec le réseau (voir figure I.8).

Le DVR peut avoir une excellente exécution dynamique et capable d'une protection critique d'une charge sensible contre les différentes perturbations de tension

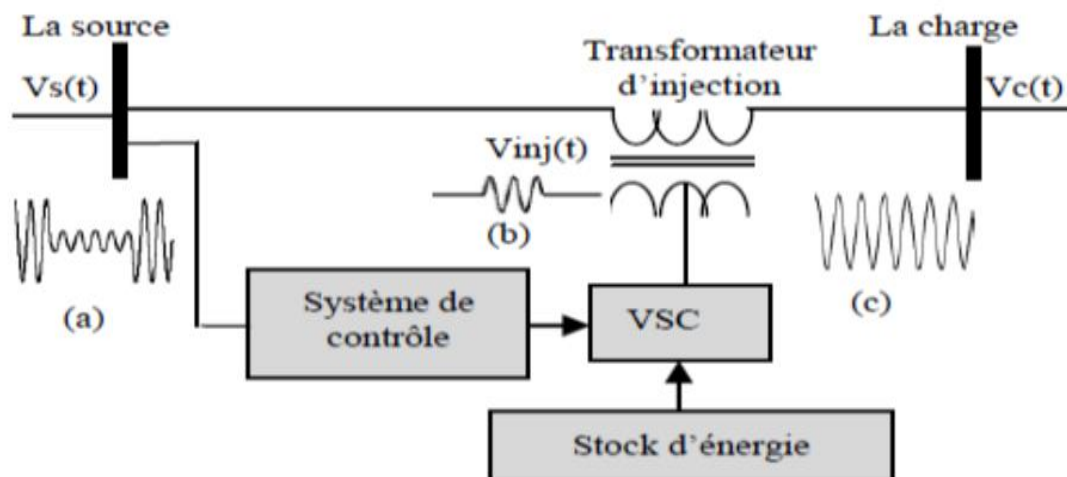


Figure I.9. Schéma de la structure d'un DVR

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons essayé de faire la lumière sur les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans les réseaux de distribution, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiels existant dans le réseau, et les installations industrielles. Nous avons vu que la dégradation de la qualité de l'énergie peut conduire à une modification du comportement des performances ou même de la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.



***CHAPITRE II***  
***Étude de Régulateur***  
***fractionnel***

## II.1. Introduction

Ce chapitre nous le consacrons à l'étude de la commande de DVR, qu'à fait l'objet de plusieurs aspect, notamment pour pouvoir confronter les calculs aux résultats expérimentaux. Nous proposons dans ce qui va suivre une méthode de régulation basé sur le régulateur PID fractionnaire [34]. Pour réaliser le calcul des paramètres de régulateur nous utilisons une méthode d'optimisation appelle Optimisation par Essaim Particulaire(PSO) [38].

## II.2. Aperçu sur le calcul fractionnaire

Le calcul fractionnaire est une généralisation du calcul régulier (ordre entier). Il est considéré comme un sujet ancien et encore nouveau.

Durant les dernières décennies, le calcul fractionnaire s'est développé et a pris de l'importance aussi bien dans le domaine des mathématiques que dans des applications scientifiques. Mais il serait tout à fait erroné de classifier le calcul fractionnaire comme une science nouvelle. La question des dérivées fractionnaires fut abordée dès 1695 par Leibniz dans une lettre adressée à l'Hôpital, mais lorsque celui-ci lui demande quelle pourrait être la dérivée d'ordre un demi de la fonction  $x(t)$  par rapport à la variable  $t$ , Leibniz répond que cela mène à un paradoxe dont un jour on tirera profit d'utiles conséquences : le calcul fractionnaire est alors né.

Ces dernières années l'intérêt considérable pour le calcul fractionnaire a été stimulé par les applications que ce calcul trouve dans les différents domaines de la physique et de l'ingénierie. Le premier livre dédié au calcul d'ordre fractionnaire a été publié en 1974, il revient à K.B. Oldham et J. Spanier [21], après un travail de collaboration entamé depuis 1968. Sur le plan mathématique, il faut citer l'ouvrage russe de Samko, Kilbas et Marichev [22] paru en 1993, qui regroupe un ensemble de définitions et de théories importantes sur le calcul d'ordre fractionnaire.

Dans le domaine des systèmes, des travaux intéressants ont été réalisés dans l'union soviétique [23] et plus tard plusieurs mathématiciens et physiciens théoriciens ont étudié les opérateurs différentiels et les systèmes d'ordre fractionnaire [21,24-25]. Aujourd'hui, l'intérêt du calcul d'ordre fractionnaire et ses applications ne cesse de grandir dans plusieurs domaines. A partir de 2004, un workshop, qui se déroule tous les deux ans, spécialement dédié au calcul d'ordre fractionnaire et ses applications, a été créé.

**II.2.1 Définitions**

Le calcul fractionnaire est une généralisation de l'intégration et de la différentiation à l'opérateur fondamental d'ordre non entier  ${}_c D_t^\alpha$  où c et t sont des limites de l'opération. L'opérateur intégro-différentiel continu est défini comme :

$${}_c D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \Re(\alpha) > 0 \\ 1 & \Re(\alpha) = 0 \\ \int_c^t (d\tau)^{-\alpha} & \Re(\alpha) < 0 \end{cases} \tag{II.1}$$

où  $\alpha$ , généralement  $\alpha \in \mathbb{R}$ , est l'ordre de l'opération. Les deux définitions les plus utilisées pour l'opérateur intégro-différentiel (Spanier et Oldham) d'ordre fractionnaire général sont celles de Grunwald-Letnikov (GL) et de Riemann-Liouville (RL) [26]. Les autres définitions bien connues sont ceux de Caputo, Weyl et Furier.

**II.2.2. Définition de Riemann-Liouville**

La dérivée d'ordre fractionnaire  $\alpha > 0$  d'une fonction  $f(t)$  localement intégrable définie sur  $[t_0, \infty]$  est donnée comme suit [1]

$${}_{RL} D_{t_0}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_{t_0}^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau \tag{II.2}$$

où le nombre entier n est tel que :  $(n-1) < \alpha < n$ . La transformée de Laplace de la dérivée d'ordre  $\alpha$  de la fonction  $f(t)$  causale selon cette définition est donnée par [26].

$$L[{}_{RL} D_{t_0}^\alpha f(t)] = s^\alpha L[f(t)] - \sum_{i=0}^{n-1} s^i D^{\alpha-i-1} f(t) \Big|_{t_0} \tag{II.3}$$

Où  $\sum_{i=0}^{n-1} s^i D^{\alpha-i-1} f(t) \Big|_{t_0}$  représente la dérivée  $(\alpha-i-1)^{\text{ème}}$  de  $f(t)$  lorsque  $t = t_0$ . Alors, les conditions initiales s'expriment par les valeurs des dérivées  $D^{\alpha-i-1} f(t)$  de  $f(t)$  (pour  $i=0, 1, \dots, n-1$ ) en  $t = t_0$ .

**II.2.3 Définition de Grünwald-Letnikov**

La dérivée généralisée d'une fonction  $f(t)$ , peut également être obtenue de façon plus naturelle en utilisant la définition entière usuelle. C'est la définition proposée par

Grunwald [26]. Elle est plus adéquate au calcul numérique de la dérivation fractionnaire.

En effet, partant de la dérivée première :

$$D^1 f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t-h)}{h} \quad (\text{II.4})$$

h : étant la période d'échantillonnage. La dérivée seconde donne :

$$D^2 f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t) - 2f(t-h) + f(t-2h)}{h^2} \quad (\text{II.5})$$

Un premier niveau de généralisation à l'ordre entier n donne :

$$D^n f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{j=0}^n \left( (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \right) \quad (\text{II.6})$$

n: étant un nombre entier,

La notation  $\binom{n}{j}$  représente la combinaison de j élément parmi n dont l'expression est

$$\text{donnée par : } \binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (\text{II.7})$$

L'extension de l'équation (II.6) à des valeurs fractionnaires  $\alpha \in \mathfrak{R}_+$  de l'ordre de dérivation étant immédiate soit [6] :

$$D^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^n \left( (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t - jh) \right) \quad (\text{II.8})$$

La notation  $\binom{\alpha}{j}$  désigne le binôme de Newton généralisé à des ordres réels :

$$\binom{\alpha}{j} = \frac{\Gamma(\alpha+1)}{j! \Gamma(\alpha-j+1)} \quad (\text{II.9})$$

Pour des ordres de dérivation entiers  $\alpha = n$ , la somme de l'équation (II.8) est limitée à  $n + 1$  termes. La valeur de la dérivée à un instant t est alors une combinaison linéaire des  $n+1$  valeurs de la fonction  $f(t-jh)$ ,  $j = 0, \dots, n$ . La dérivation entière donne ainsi une caractérisation locale de la fonction. Par contre, pour des ordres de dérivation fractionnaires, les coefficients de  $\left[ (-1)^j \binom{\alpha}{j} \right]$  ne s'annulent pas. La valeur de la dérivée à un instant donné est alors une combinaison linéaire de toutes les valeurs de la fonction  $f(t - jh)$ ,  $j = 0, \dots, \infty$ . Cela montre qu'à l'inverse de la dérivation entière, la dérivation fractionnaire donne une caractérisation globale de la fonction.

#### II.2.4. Définition de Caputo

Caputo a introduit une autre formulation de la dérivée d'ordre fractionnaire définie par [27] :

$${}_c D_{t_0}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_{t_0}^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (\text{II.10})$$

Avec  $n$  est un entier positif vérifiant l'inégalité  $(n - 1) < \alpha < n$ . Cette définition peut être formulée également en fonction de la définition de Riemann-Liouville comme suit :

$$D^\mu f(t) = {}_cD^\mu f(t) + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{t^{k-\mu}}{\Gamma(k-\mu+1)} f^{(k)}(0^+) \quad (\text{II.11})$$

Ce qui peut être décrit autrement par :

$${}_cD^\mu f(t) = {}_{\text{RL}}D^\mu \left( f(t) - \sum_{k=0}^{n-1} f^{(k)}(0^+) \frac{t^k}{k!} \right) \quad (\text{II.12})$$

### II.3. Méthodes d'approximation des opérateurs d'ordre fractionnaire

#### II.3.1. Méthode générale d'approximation des opérateurs intègro-différentiel fractionnaire

En général, une approximation rationnelle de la fonction  $G(p) = p^{-m}$ ,  $0 < m < 1$  (Intégration d'ordre fractionnaire dans le domaine de Laplace) peut être obtenue en utilisant l'expansion des fractions continues des fonctions [28] :

$$p^{-m} = \begin{cases} G_h(p) = \frac{1}{(1+T p)^m} \\ G_l(p) = \left(1 + \frac{1}{p}\right)^m \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Où  $G_h(p)$  est l'approximation pour les hautes fréquences ( $\omega T \gg 1$ ), et  $G_l(p)$  l'approximation pour les basses fréquences ( $\omega T \ll 1$ ). Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'approximation des opérateurs d'ordre fractionnaire, parmi les qu'elles la méthode de Carlson [28], Oustaloup [29], Mastuda [28] et Charef [30].

Dans ce qui suit nous allons présenter une méthode d'approximation de l'opérateur d'ordre fractionnaire qui sera utilisé plus tard, cette méthode est développée par Charef en 1992 et nommé la méthode de la fonction singulière [30].

#### II.3.2 La méthode de Charef : Fonction de singularité

##### II.3.2.1 Approximation de l'opérateur intégrateur d'ordre fractionnaire

La fonction de transfert de l'opérateur intégrale d'ordre fractionnaire est représentée dans le domaine fréquentiel par la fonction irrationnelle suivante :

$$G_l(p) = \frac{1}{p^m} \quad (\text{II.14})$$

Avec  $p = j\omega$  la fréquence complexe et  $m$  est un nombre positif tel que  $0 < m < 1$ .

Dans une bande de fréquence donnée [  $\omega_b$  ,  $\omega_h$  ], cet opérateur d'ordre fractionnaire peut être Modélisé par un pôle à puissance fractionnaire (PPF) comme suit :

$$G(p) = \frac{K_I}{(1+\frac{p}{\omega_c})^m} \quad (II.15)$$

Si on suppose que pour  $\omega \in [ \omega_b , \omega_h ]$  on a  $\omega \gg \omega_c$  , on peut écrire :

$$G(p) = \frac{K_I}{(\frac{p}{\omega_c})^m} = \frac{K_I \omega_c^m}{p^m} = \frac{1}{p^m} = G_I(p) \quad (II.16)$$

Avec  $K_I = (1/\omega_c^m)$  et  $\omega_c$  est la fréquence de coupure du PPF, qui est obtenue à partir de la basse fréquence  $\omega_b$  par la relation  $\omega_c = \sqrt{10^{(\varepsilon/10m)} - 1}$ . Avec  $\varepsilon$  est l'erreur maximale permise entre la pente de la réponse fréquentielle de l'opérateur de l'équation (II.14) et le PPF de l'équation (II.15).

Dans le but de représenter le PPF de l'équation (II.15), et par conséquent l'intégrateur d'ordre fractionnaire, par un système linéaire invariant dans le temps il est nécessaire d'approximer sa fonction de transfert irrationnelle par une fonction rationnelle [30], [31]. La méthode d'approximation consiste à approximer la pente de -20m dB/dec sur le tracé de Bode du PPF par un nombre de lignes en de zig-zag produisant une alternance de pente -20 dB/dec et 0 dB/dec. Correspondant à une alternance de pôles et de zéros sur l'axe réel négative du plan p tel que  $p_0 < z_0 < p_1 < z_1 < \dots < z_{N-1} < p_N$ . D'où l'approximation suivante :

$$G(p) = \frac{K_I}{(1+\frac{p}{\omega_c})^m} \cong K_I \frac{\prod_{i=0}^{N-1} (1+\frac{p}{z_i})}{\prod_{i=0}^N (1+\frac{p}{p_i})} \quad (II.17)$$

Les  $P_i$  et les  $Z_i$  sont les pôles et les zéros de l'approximation. En utilisant une méthode graphique [30], les pôles et les zéros de l'approximation s'avèrent sous une forme d'une progression géométrique. Cette méthode graphique d'approximation commence par une erreur d'approximation y en dB et une bande de fréquence d'approximation  $W_{max} = 100\omega_h$ . Le nombre de pôles d'approximation N est donné par:

$$N = \text{partie entier} \left[ \frac{\log(\frac{\omega_{max}}{P_0})}{\log(ab)} \right] + 1 \quad (II.18)$$

L'arrangement des singularités (pôles-zéros) est établi selon les deux progressions géométriques suivantes :



$$P_i = (ab)^i P_0, \text{ pour } i = 0, 1, \dots, N$$

$$Z_i = (ab)^i Z_0, \text{ pour } i = 0, 1, \dots, N-1$$

Où a et b sont appelés les rapports de position, leurs expressions en fonction de y et m sont données par :

$$a = 10^{\left(\frac{y}{10(1-m)}\right)}, b = 10^{\left(\frac{-y}{10m}\right)} \tag{II.19}$$

Et le premier pôle  $P_0$  et le premier zéro  $Z_0$  sont donnés par :

$$P_0 = \omega_c \sqrt{b}, Z_0 = a P_0 \tag{II.20}$$

Par conséquent, la fonction rationnelle d'approximation dans une bande de fréquence donnée sera :

$$G_I(p) = \frac{K_I}{\left(1 + \frac{P}{\omega_c}\right)^m} \cong K_I \frac{\prod_{i=0}^{N-1} \left(1 + \frac{P}{Z_0 (ab)^i}\right)}{\prod_{i=0}^N \left(1 + \frac{P}{P_0 (ab)^i}\right)} \tag{II.21}$$

• Exemple illustratif

Considérons l'intégrateur d'ordre 0.7, on veut l'approximer sur la bande  $[10^{-2}, 10^2]$  et pour  $(y=1\text{dB}, \varepsilon = 10^{-5})$ . L'approximation est donnée par l'équation suivante :

$$G_I(p) = \frac{1}{p^{0.7}} \cong \hat{G}(p) = 2.0845 \frac{\prod_{i=0}^{18} \left(1 + \frac{P}{(4.6060 \cdot 10^{-5} (2.9936)^i)}\right)}{\prod_{i=0}^{19} \left(1 + \frac{P}{(2.1379 \cdot 10^{-5} (2.9936)^i)}\right)}$$

La figure (II.1) représente le tracé de Bode de la fonction de transfert de l'intégrateur

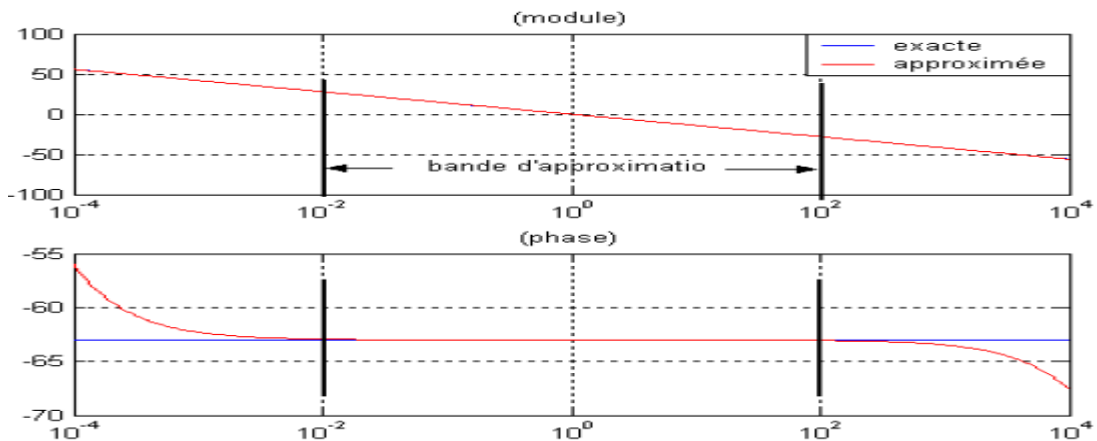


Figure II.1. Tracé de Bode amplitude et phase de  $P^{0.7}$  et son approximé.

d'ordre 0.7 et son approximée. Cette figure montre que la les tracé de Bode de la fonction  $\frac{1}{p^{0.7}}$  et son approximé sont superpose sur la bande d'approximation, en remarque que l'amplitude est une droite de pente  $-20 \times 0.7 = -14$  db/dec et la phase est une constante de  $-0.7 \times \frac{\pi}{2} = -63$  deg .

## II.4. Correcteur PID

### II.4.1. Correcteur PID classique

Aujourd'hui, le correcteur PID est la structure de commande la plus utilisée dans les boucles

de rétroaction. Plus de 90% des boucles d'asservissement sont des correcteurs PID.

Généralement, le correcteur PID classique est implémenté dans des systèmes de commande à retour unitaire classique donné par la (Figure II.2)

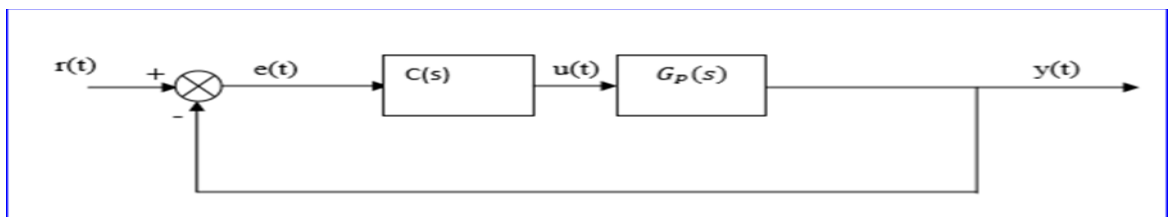


Figure II.2. Système de commande à retour unitaire classique.

Où :

U(t): Le signal de commande

e(t) : L'écart résultant de la différence entre la consigne r(t)

y(t): La grandeur à commander

C(t): La fonction de transfert du correcteur

Gp(s): Est la fonction de transfert de système

Le comportement du correcteur proportionnel intégral dérivé (PID) classique est décrit par l'équation suivante :

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (\text{II.22})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (IV.1) avec les conditions initiales nulles la fonction de transfère de ce correcteur peut être exprimé par :

$$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{s} + T_d s) \quad (\text{II.23})$$

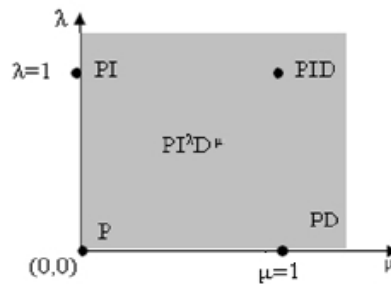
Les paramètres du correcteur associés à ces différents termes sont le gain proportionnel  $K_p$ , la constante d'intégration  $T_i$  et la constante de dérivation  $T_d$ . Les trois termes proportionnel, intégral et dérivé possèdent des caractéristiques différentes et agissent de manière complémentaire [32]

**II.4.2 Correcteur d'ordre fractionnaire  $PI^\lambda D^\mu$**

Le correcteur d'ordre fractionnaire  $PI^\lambda D^\mu$  une généralisation du correcteur PID classique a été proposé par Podlubny en 1999 [33]. Sa fonction de transfert est donnée par [33]:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \tag{II.24}$$

où  $K_p$ ,  $K_I$  et  $K_D$  sont des nombres réel et  $\lambda$  et  $\mu$  sont des nombres réels positives . De l'équation (II.24), on note que pour ;  $\lambda = \mu = 1$  le correcteur d'ordre fractionnaire  $PI^\lambda D^\mu$  devient le correcteur PID classique. Figure (II.3) montre la disposition du correcteur d'ordre fractionnaire  $PI^\lambda D^\mu$  dans le plan  $(\lambda, \mu)$ .



**Figure II.3.**Disposition du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  dans le plan  $(\lambda, \mu)$

En plus de  $K_p, K_I$  et  $K_D$ , le correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  possédé deux autre paramétré de réglage  $\lambda$  et  $\mu$ . Ceci le rend plus flexible et donc une opportunité pour mieux ajuster les propriétés dynamiques des systèmes de commande d'ordre fractionnaire. S'inspirant de l'idée du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$ ; plusieurs travaux sur les technique de réglage sont actuellement publiés [34].

L'avantage le plus important du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre fractionnaire est sa possibilité de bien commander la dynamique des systèmes d'ordre fractionnaire. Un autre avantage se trouve dans le fait que les correcteurs  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre fractionnaire sont moins sensibles aux changements des paramètres d'un système commandé, ce qui donne une amélioration de la robustesse. Ceci est parce que les correcteurs  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre

fractionnaire possèdent deux degrés de liberté supplémentaires pour mieux ajuster les propriétés dynamiques de systèmes de commande. Puisque les ordres  $\lambda$  et  $\mu$  sont des nombres réels arbitraires, le correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre fractionnaire est plus flexible et donne l'avantage de mieux régler les propriétés dynamiques des systèmes [35, 36].

### II.4.2.1. Approximation d'un $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire par une fonction rationnelle

On peut obtenir l'approximation de la fonction de transfert du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre fractionnaire à l'aide d'une méthode d'approximation rationnelle des opérateurs fractionnaires (intégrateur, dérivée). Dans le cas de l'approximation de Charef, et pour une variations des paramètres  $\lambda$  et  $\mu$  dans l'intervalle  $[0,1]$ , l'approximation de la fonction  $G_c(s)$  de l'équation (II.25) dans une bande de fréquence donnée d'intérêt pratique  $[\omega_b, \omega_h]$  est calculée comme suit:

$$G_c(s) = K_P + K_I \left( K_{I_{apx}} \frac{\prod_{i=0}^{n_I-1} (1 + \frac{s}{Z_{I_i}})}{\prod_{i=0}^{n_I} (1 + \frac{s}{P_{I_i}}} \right) + K_D \left( K_{D_{apx}} \frac{\prod_{i=0}^{n_D} (1 + \frac{s}{Z_{D_i}})}{\prod_{i=0}^{n_D} (1 + \frac{s}{P_{D_i}}} \right) \quad (II.25)$$

- **Exemple Illustratif**

Considérons le correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  défini par sa fonction de transfert suivante :

$$C(s) = 2.4 + \left( \frac{0.18}{s^{1.7}} \right) + 6(S^{1.7})$$

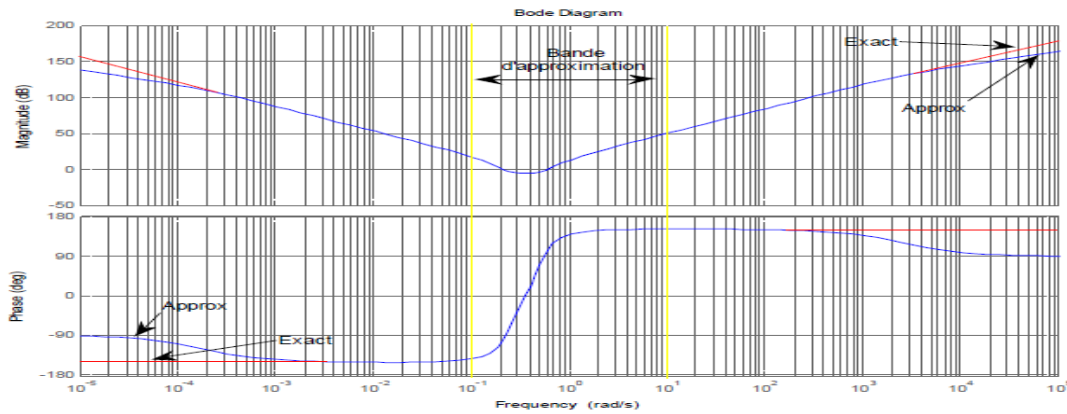
Et qui s'écrit donc :

$$C(s) = 2.4 + \frac{0.18}{s} \left( \frac{1}{s^{0.7}} \right) + 6S(S^{0.7})$$

En utilisant la formule (2.18), nous obtenons l'approximation rationnelle du  $PI^\lambda D^\mu$  en approximant les opérateurs  $\frac{1}{s^{0.7}}$  et  $S^{0.7}$  sur la même bande fréquentielle

$[\omega_b, \omega_h] = [0.1 \text{ rad/sec}, 10 \text{ rad/sec}]$ . Les paramètres d'approximation utilisés sont  $\varepsilon = 10^{-5}$  et  $y=1$ . Les pôles et zéros de l'approximation peuvent être calculés à partir de l'équation (II.25) D'où la fonction de transfert rationnelle suivante :

$$G_c(s) = 2.4 + \frac{0.18}{s} \left( 4156.9188 \frac{\prod_{i=0}^{14} [1 + (\frac{s}{4.6060 \times 10^{-4} (2.9936)^i} )]}{\prod_{i=0}^{15} [1 + (\frac{s}{2.1379 \times 10^{-4}})]} \right) 6S \left( 0.0024 \frac{\prod_{i=0}^{15} [1 + (\frac{s}{2.1379 \times 10^{-4} (2.9936)^i} )]}{\prod_{i=0}^{15} [1 + (\frac{s}{4.6060 \times 10^{-4} (2.9936)^i} )]} \right).$$



**Figure II.4** Tracé de Bode de la fonction de transfert du  $PI^{1.7}D^{1.7}$  et son approximation

La figure (II.4) représente le tracé de Bode, amplitude et phase, de la fonction de transfert du  $PI^{1.7}D^{1.7}$  et son approximation rationnelle, on remarque la bonne approximation sur la bande  $[0.1, 10\text{rad/s}]$ .

#### II.4.2.2. La méthode d'optimisation des paramètres $PI^\lambda D^\mu$ fractionnel

L'algorithme d'optimisation fait partie des moyens que nous proposons aux professionnels qui souhaitent mettre en place une stratégie efficace pour l'amélioration de leurs résultats. Ce type de procédé est particulièrement recommandé pour la conception de solutions sur mesure destinées à des projets délicats dont les problématiques sont aussi nombreuses que complexes. L'algorithme d'optimisation est adapté à tous les secteurs d'activité.

Plusieurs méthodes d'optimisations ont été proposées dans la littérature, et ont prouvé leur efficacité dans différent domaines d'application. Nous nous intéressons dans ce mémoire à la méthode d'optimisation pas essaim particulaire (PSO) [37]

##### II.4.2.2.1. Optimisation par Essaim Particulaire(PSO)

Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy(socio-psychologue)en 1995 [38], L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de REYNOLD, HEPPNER et GRENANDER [39]. Les individus observés sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire. Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche

d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.

#### II.4.2.2.2. Principe de fonctionnement de PSO

L'optimisation par essaim particulaire repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'hyper-espace de recherche et constituent, chacune, une solution potentielle. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. À partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale ; est d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage. La figure (II.5) montre l'agissement des particules d'un essaim. À partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, normalement, converger vers la solution optimale globale du problème traité.



Figure II.5. Schéma de principe du comportement des particules d'un essaim.

Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes [40]:

- **Une composante d'inertie** : permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode et la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- **Une composante cognitive** : la particule tend à se fier à sa propre expérience et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- **Une composante sociale** : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint collectivement par l'essaim.

Dans un espace de recherche de dimension  $D$  la particule  $i$  de l'essaim est modélisée par son vecteur position  $\vec{x}_{ij} = (x_{ij} \ x_{ij} \dots \ x_{iD})^T$  et par son vecteur vitesse  $\vec{v}_{ij} = (v_{i1} \ v_{i2} \dots \ v_{iD})^T$ .

La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective (cout) en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on  $\vec{p}_{ij} = (p_{i1} \ p_{i2} \dots \ p_{iD})$  La meilleure position atteinte par ses particules voisines est notée  $\vec{g}_{ij} = (g_{i1} \ g_{i2} \dots \ g_{iD})^T$

Le vecteur vitesse est calculé à partir de l'équation (II.26) suivante [40]:

$$\vec{v}_{ij} = w \cdot v_{ij}(k-1) + c_1 r_1 (p_{ij}(k-1) - x_{ij}(k-1)) + c_2 r_2 (g_{ij}(k-1) - x_{ij}(k-1)) \quad (\text{II.26})$$

La position à l'itération de la particule est alors définie par l'équation (II.27)

$$x_{ij}(k) = x_{ij}(k-1) + v_{ij}(k) \quad (\text{II.27})$$

Avec  $i=1,2,3 \dots N_p$ ,  $j=1,2,3 \dots k_{max}$ , et sachant que :

$N_p$  : Nombre de particules de l'essaim

$N_d$  : Nombre de variables du problème(c-à-d la dimension d'une particule)

$k_{max}$  : Nombre maximal d'itération.

$v_{ij}(k)$ :vitesse de la  $j^{ème}$  Composante de la  $i^{ème}$  particule de l'essaim, à la  $k^{ème}$  itération

$p_{ij}$  :  $j^{ème}$  composante de la meilleur position occupée par la  $i^{ème}$  particule de l'essaim enregistrée dans les itérations précédentes (local best)

$g_{ij}$  :  $j^{ème}$  Composante de la meilleure position occupée par la  $i^{ème}$  particule globale de l'essaim (global best)

$x_{ij}(k)$  :  $j^{ème}$  Coordonnée de la position actuelle de particule  $i$  à la  $k^{ème}$

$w$  : Constant appelée coefficient d'inertie,  $c_1$  et  $c_2$  : sont deux constantes appelées coefficients d'accélération,  $r_1$  et  $r_2$  :sont deux nombre aléatoires tirés uniformément dans  $[0 \ 1]$  à chaque itération et pour chaque dimension

$w \cdot v_{ij}(k-1)$  : Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre  $w$  contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.

$c_1 r_1 (p_{ij} \text{ best} - x_{ij}(k-1))$  Correspond à la composante cognitive du déplacement où  $c_1$  contrôle le comportement cognitif de la particule

$c_2 r_2 (g_{ij} best - x_{ij}(k - 1))$  Correspond à la composante sociale du déplacement ; ou contrôle l'aptitude sociale de la particule.

#### II.4.2.2.3. Mécanisme de confinement

Il arrive parfois que la position courante et la vitesse courante d'une particule, avoir cette dernière une tendance à sortir de son espace de recherche lors de son déplacement. Lorsque c'est le cas, l'algorithme fait intervenir un mécanisme de confinement, dit confinement d'intervalle, afin de gérer le déplacement de la particule, qui leurs amènent dans un nouveau point qui appartenant à l'espace de recherche. De manière générale, ce mécanisme consiste à ramener la particule dans le point admissible qui est le plus proche [40][41].

$$\begin{cases} \text{si } x_{ij} > x_{jmax} & \text{alors } x_{ij} = x_{jmax} \\ \text{si } x_{ij} < x_{jmin} & \text{alors } x_{ij} = x_{jmin} \end{cases} \quad v_{ij} = 0 \quad (II.28)$$

Où  $x_{jmax}$  et  $x_{jmin}$  sont les valeurs limites du paramètre  $x_{ij}$

Dans une autre part, le coefficient d'inertie joue un rôle important dans la procédure de recherche car elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale , en 2002 M. Clerc et J.Kennedy [42] ont présenté une autre approche de calcul qui introduit un coefficient de construction  $\chi$  qui permet de contrôler la vitesse au cours de itération et donc au pallier de convergence et de nouveaux paramètre relatifs aux composantes cognitive et sociale  $\phi_1$  et  $\phi_2$  ont ainsi été introduit selon l'équation (II.30)

$$\chi = \frac{2.k}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4.\phi}|} \quad \text{Avec } 0 \leq k \leq 1 \quad (II.29)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \geq 4 ; \text{ et } \phi_1 = \phi_2 = 2.05 \quad (II.30)$$

Et les paramètres de l'équation (III.26) deviennent

$$\begin{cases} w = \chi \\ c_1 = \chi \phi_1 \\ c_2 = \chi \phi_2 \end{cases} \quad (II.31)$$

A partir de l'équation (II.29) on peut éliminer la vitesse  $v_{max}$

L'algorithme PSO se déroule suivant les étapes suivantes [40]:

1. initialiser une population de particules et de vitesses, uniformément réparties dans l'espace de recherche D, et fixer le critère d'arrêt.



2. évaluer la fonction objective, pour chaque particule.
3. mettre à jour la meilleure position  $P_{best}$  pour chaque particule et la meilleure position globale  $g_{best}$  dans la population
4. mettre à jour la position et la vitesse utilisant les équations (II.26) et (II.27)
5. si une particule, déplacée par l'algorithme vers la limite ou à l'extérieur de l'espace de recherche, le mécanisme de confinement des particules exprimé par les équations(II.28) intervient et ramène la particule à l'intérieur de l'espace de recherche.
6. vérifier le critère d'arrêt. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller vers l'étape 2; sinon, le programme se termine, et la solution optimale est produite.

## **II.5. Conclusion**

Ce chapitre est une introduction aux éléments de base du calcul d'ordre fractionnaire. Nous avons donné les définitions des opérateurs et des systèmes d'ordre fractionnaire. et présenté un méthode d'approximation de ces opérateurs de ces systèmes.et défini Le correcteur d'ordre fractionnaire  $PI^\lambda D^\mu$ .et l'approximation du correcteur  $PI^\lambda D^\mu$  d'ordre fractionnaire à l'aide d'une méthode d'approximation rationnelle et donné des Méthodes de réglage de cet correcteurs pour réaliser le meilleur compromis entre précision, stabilité et rapidité du système étudié.



***Chapitre III***  
***Etude et modélisation***  
***d'un DVR.***

### III.1. Introduction

Le réseau électrique peut être soumis à différentes perturbations qui se propagent vite et sur une partie étendue et qui peuvent avoir un impact critique sur tout le système électrique.

Dans notre travail, nous nous sommes particulièrement intéressés aux perturbations en tension provoquées principalement par des pannes électriques ou par l'amorçage des grandes charges qui exigent au démarrage un appel du courant très important. Pour compenser ces perturbations, on utilise un DVR basé sur le principe d'un convertisseur de source de tension.

Dans ce chapitre, une modélisation du DVR, de ses fonctions, configurations, composants, contrôle de la tension de sortie du DVR examiné avec les capacités et les limites du périphérique

### III.2. Structure d'un DVR

Lorsque le dispositif de compensation inséré en série est construit à base d'éléments passifs commutés, son action principale réside dans la modification de l'impédance des lignes. Ainsi, sur des lignes fortement inductives, une compensation de la chute de tension peut être réalisée par un fonctionnement capacitif. Avec un dispositif basé sur un onduleur, en plus de la fonction évoquée précédemment, la tension injectée en série sur la ligne pourra immuniser la charge des perturbations de type harmonique de tension, creux de tension... Ce fonctionnement est alors appelé DVR. Plus la compensation sera importante et plus le stockage de l'énergie dans la partie continue du convertisseur devra être élevé. Dans certains cas, si l'on souhaite pouvoir injecter de la puissance active, l'utilisation d'un système d'alimentation auxiliaire au niveau de la tension du bus continu devra être envisagée [43].

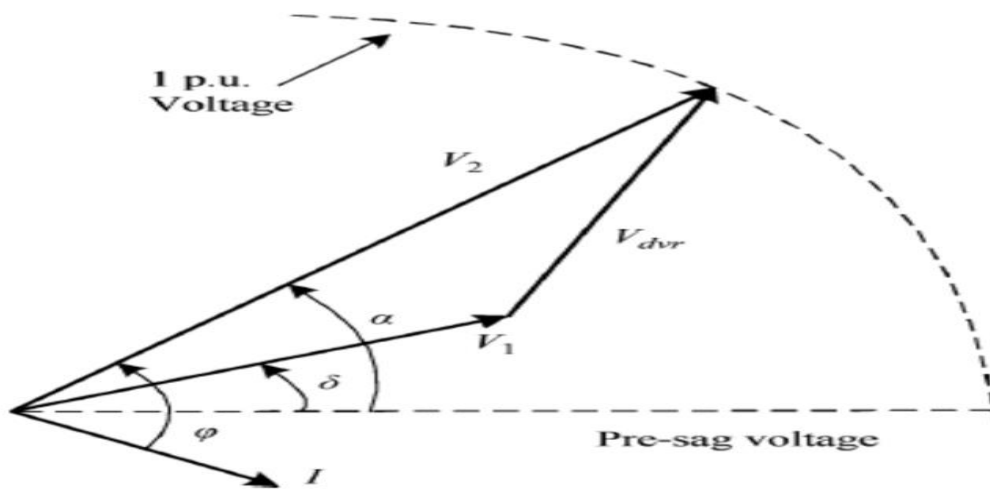
### III.3. Principe de fonctionnement du DVR

Dans les cas de chute de tension à la charge, le DVR injectera une tension série à travers le transformateur de sorte que la tension de charge peut être maintenue à sa valeur nominale, Leur l'équation peut être écrite comme suite :

$$V_{dvr} = V_l + Z_{thll} - V_{th} \quad (III.1)$$

$$I_l = [P_l + jQ_l / V_l]^* \quad (\text{III.2})$$

Dans la plupart des désagréables conditions, le DVR injecte une certaine puissance active au système, Généralement le fonctionnement du DVR peut être classé en deux catégories: 1) mode veille, 2) mode injection. Par conséquent, la capacité du dispositif de stockage peut être un facteur limitant en particulier lors de la diminution de tension à long terme. En mode veille, en mode court-circuit ou injection petite tension pour couvrir la chute de tension nécessitée aux pertes de réactance au transformateur. Le DVR passe en mode injection dès que la dégradation est détectée et injectée de la tension en série avec la charge avec l'amplitude et la phase requises pour compensation.



**Figure III.1.** Diagramme vectoriel en cas d'affaissement de tension.

Le diagramme vectoriel représente la condition électrique pendant la condition d'affaissement de tension pour une analyse facile qu'une phase est seulement considérée. Les tensions  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_{DVR}$  sont les tensions de source, une tension de charge et des tensions injectées de DVR, respectivement.  $I$ ,  $\phi$ ,  $\alpha$ ,  $\Delta$ , représente le courant de charge, l'angle de facteur de charge, la tension de phase source et l'angle de phase. L'avantage de la puissance proposée est transféré de l'unité de stockage dans le système de distribution. La référence est considérée comme la fréquence de la tension et la fréquence de support sont obtenues et les deux sont comparés à un comparateur et les signaux de garniture obtenus sont cotés à la tension nominale, c'est-à-dire 50 fois de la protection à Sag à 50% cqz'' des durées de jusqu'à 01Sc [44].

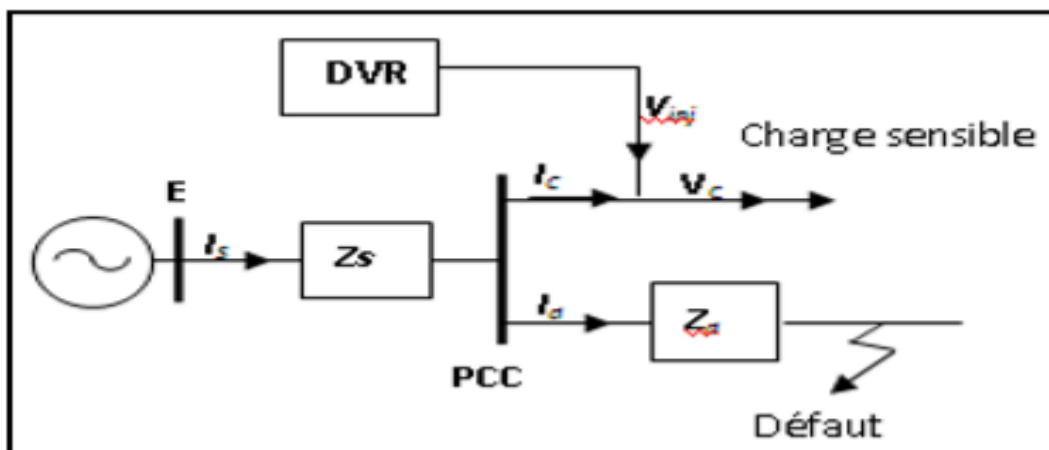
### III.4. Modélisation de DVR

#### III.4.1. Identification des tensions perturbatrices

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui seront injectées ensuite par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Cette méthode est basée dans le calcul sur des repères simplifiés comme le repère de Park, le passage de référentiel abc au référentiel dq de Park.

Cette méthode d'identification offre l'avantage de compenser avec simplicité, précision, rapidité et faible retard de rétablissement toutes les perturbations en tension, et nécessite une bonne connaissance du réseau électrique qui est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel.

Le modèle de diviseur de tension montré dans la figure (III.2), peut être employé pour mesurer les tensions perturbées sur la prétention que le courant de défaut  $I_d$  est beaucoup plus grand que le courant de charge  $I_c$  pendant les défauts [45].



**Figure.III.2.**Modèle d'un système ayant un DVR pour mesurer le défaut de tension.

PCC est le point d'accouplement de défaut et de la charge, où la tension et l'angle de phase peuvent être obtenus instantanément.  $V_s$  est la tension d'alimentation de la source,  $Z_d$  et,  $Z_s$  sont des impédances respectivement de défaut et de la source [45]

$$V_d = \left( \frac{Z_d}{Z_s + Z_d} E \right) \quad (\text{III.3})$$

$$\Delta\delta = \arg(V_d) = \arctan\left(\frac{X_d}{R_d}\right) - \left(\frac{X_s X_d}{R_s R_d}\right) \quad (\text{III.4})$$

Si  $P_s$  et  $P_{ch}$  sont respectivement la puissance d'entrée de la source et la puissance de charge, et pareillement, si  $Q_s$  et  $Q_{ch}$  sont respectivement la puissance réactive d'entrée de la source et de charge [45], alors :

$$P_{dvr} = P_s - P_{ch} = 3V_s I \cos(\varphi) - \sum_i V_{ci} I_i \cos(\varphi - \alpha + \delta_i) \quad (III.5)$$

$$Q_{dvr} = Q_s - Q_{ch} = 3V_s I \sin(\varphi) - \sum_i V_{ci} I_i \sin(\varphi - \alpha + \delta_i) \quad (III.6)$$

Où  $i=1, 2, 3$  est une opération minimum de puissance.

### III.4.2. Schéma de circuit équivalent de DVR

Le schéma de circuit équivalent d'un DVR est illustré à la figure (III.3), lorsque la tension source baisse ou augmente, le DVR injecte une tension série  $V_{inj}$ , à travers le transformateur d'injection de sorte que la magnitude de tension de charge souhaitée  $V_L$  puisse être entretenu. La tension injectée en série du DVR peut s'écrire [46] :

$$V_{INJ} = V_L - V_s \quad (III.7)$$

Où,

$V_L$  = Amplitude de tension de charge souhaitée

$V_s$  = tension de la source pendant un affaissement /gonflement.

Et le courant de charge  $I_L$  est donné par :

$$I_L = \left( \frac{P_L \pm jQ_L}{V_L} \right) \quad (III.8)$$

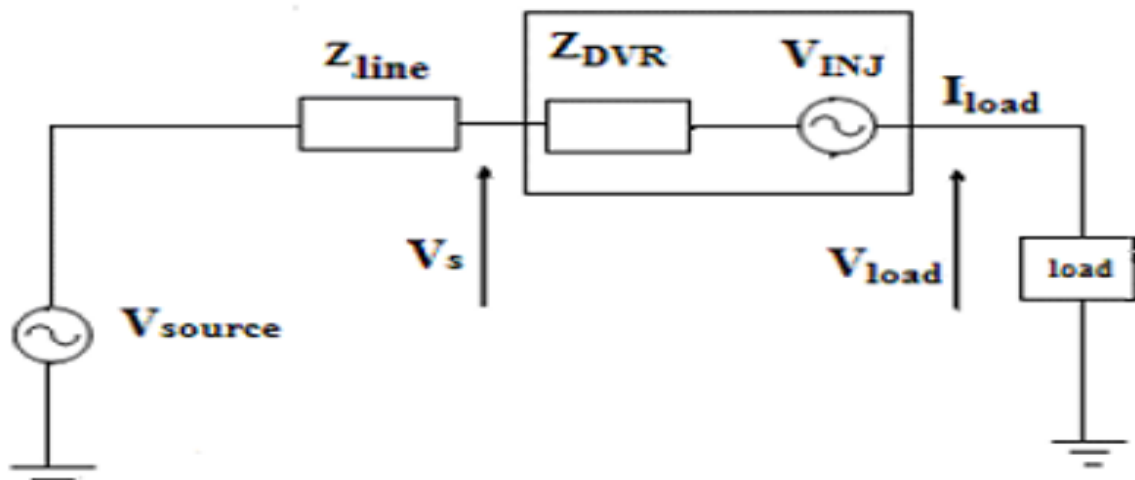
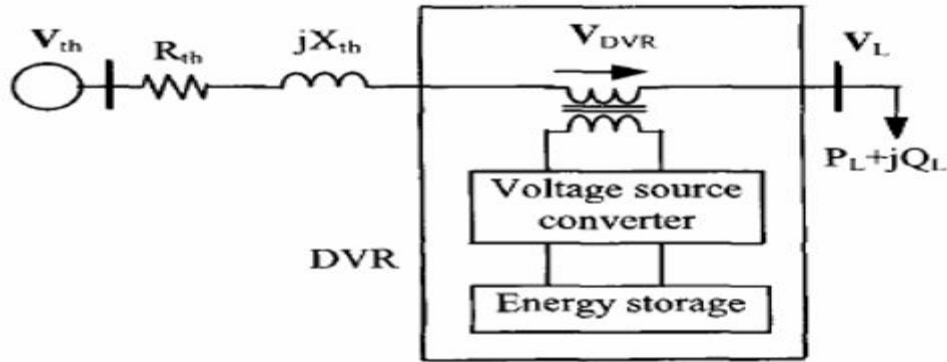


Figure. III.3. Schéma de circuit équivalent du DVR

### III.4.3. Modèle mathématique du DVR

Pour comprendre le modèle mathématique d'un restaurateur dynamique considéré comme la figure (III.4) [46].



**Figure.III.4.**Modèle mathématique d'un restaurateur dynamique pour injection de tension

À partir de la figure (III.4),

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (III.9)$$

Et,

$$V_{DVR} + V_{th} = V_L + Z_{th}I_L \quad (III.10)$$

Lorsque la tension chute à  $V_L$ , le DVR injectera une tension série  $V_{DVR}$  à travers le transformateur d'injection afin que l'amplitude de tension de charge  $V_L$  souhaitée peut être maintenue. Par conséquent :

$$V_{DVR} = V_L + Z_{th}I_L - V_{th} \quad (III.11)$$

Soit  $V_L$  considéré comme référence, donc

$$V_{DVR} \angle \alpha = V_L \angle 0^\circ + Z_{th}I_L \angle (\beta - \theta) - V_{th} \angle \delta \quad (III.12)$$

Ici,  $\alpha, \beta, \delta$  sont les angles de  $V_{DVR}, Z_{th}$  et  $V_{th}$  respectivement et  $\theta$  est l'angle du facteur de puissance de charge avec.

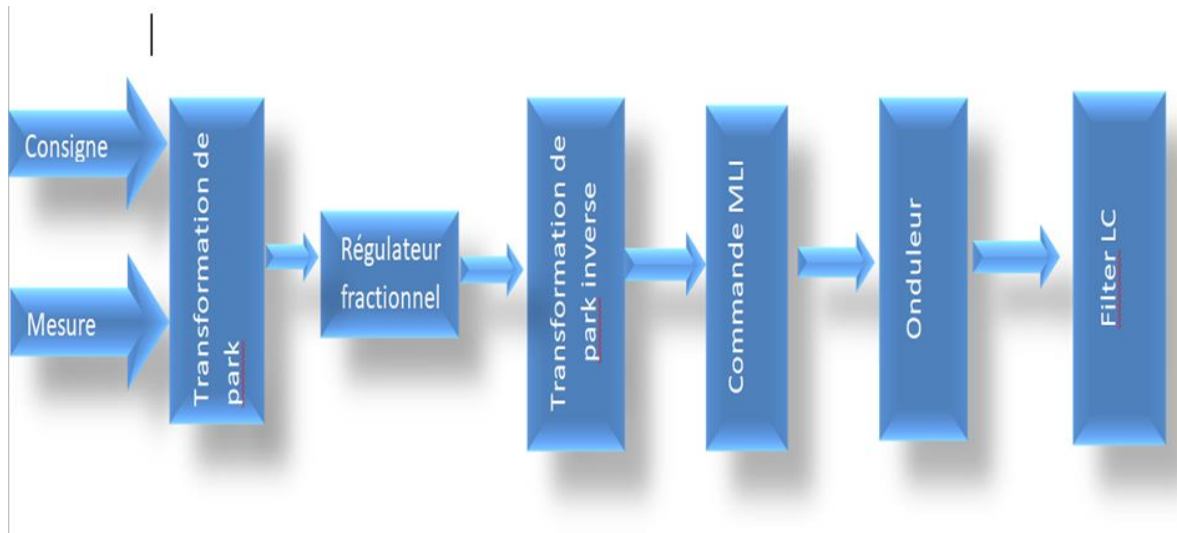
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q_L}{P_L}\right)$$

Et, l'injection de puissance vers le DVR est,

$$S_{DVR} = V_{DVR}I_L \quad (III.13)$$

### III.4.4. Stratégie de contrôle de DVR

La tension injectée par le DVR en série au réseau, commandé en tension, dépendra du type de perturbation à compenser afin d'obtenir la tension désirée aux bornes de la charge à protéger (figure III.4).



**Figure III.5.** Schéma synoptique de commande de DVR.

Le but visé de cette stratégie de commande est l'énergie mise en jeu par le DVR pour assurer la compensation. La plupart de ces méthodes utilisent comme entrée au système de commande la différence entre la tension de référence et la tension mesurée, et ce en passant par les transformations de Clark et/ou de Park. L'utilisation de la transformation de Park est, en principe, délicate dans le cas de systèmes perturbés. Ainsi, cette contrainte affecte de manière conséquente l'algorithme de commande et par conséquent, la précision des grandeurs de sortie de l'onduleur et, particulièrement, dans le cas d'un déséquilibre [43].

### III.4.5 Modélisation de VSC

#### III.4.5.1 Amplitude de la tension de référence

C'est considéré comme une tension source ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ). L'amplitude de la tension alternative aux sources peut être calculée comme suit :

$$V_A = U \sin(\omega t) \quad (\text{III.14})$$

$$V_B = U \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III.15})$$

$$V_C = U \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{III.16})$$

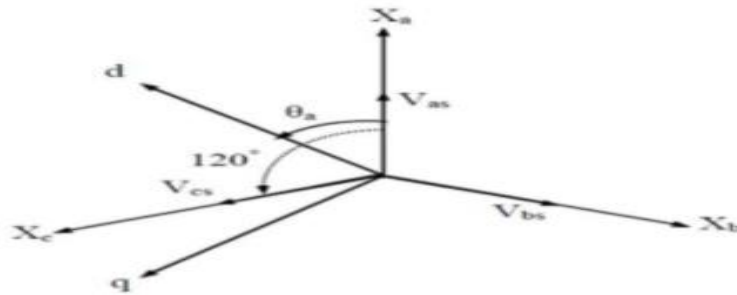


### III.4.5.2 Transformation de Park

La transformation de Park permet le passage du système triphasé au système biphasé. Elle s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directe et en quadrature [47]. Selon la figure (III.6) la projection du vecteur  $(V_{as}, V_{bs}, V_{cs})$  sur l'axe biphasé nous donne :

$$\begin{cases} V_{ds} = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_{as} \cos(\theta_a) + V_{bs} \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + V_{cs} \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3})) \\ V_{qs} = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_{as} \sin(\theta_a) + V_{bs} \sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + V_{cs} \sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3})) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Où  $\theta_a$ : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe  $X_a$  et l'axe d.



**Figure.III.6.** Passage du système triphasé au système biphasé et inversement.

On ajoute l'expression homolaire  $V_{os}$  à l'équation (III.18) pour équilibrer la transformation:

$$V_{os} = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) \quad (\text{III.18})$$

La composante homolaire  $V_{os}$  est nulle pour les systèmes triphasés équilibrés. D'après les équations (III.17) et (III.18) on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \end{bmatrix} = [p(\theta_a)] \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Le passage du système triphasé au système biphasé s'obtient à partir de la matrice de Transformation de Park  $[P(\theta_a)]$ .

$$[P(\theta_a)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Les variables triphasées réelles sont obtenues à partir des variables biphasées ( $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ) par la transformation inverse comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P(\theta_a)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{os} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

La matrice inverse de Park est donnée par :

$$[P(\theta_a)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & -\sin(\theta_a) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.22)$$

### III.4.5.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

#### III.4.5.3.1 Structure de base d'un onduleur triphasé à deux niveaux

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est représentée dans la Figure (III.7).

L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels commandable à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles, misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

Pour simplifier l'étude on crée un point milieu O par deux condensateurs fictives chacune Prend la moitié de la tension continue  $v_{dc}$  [48].

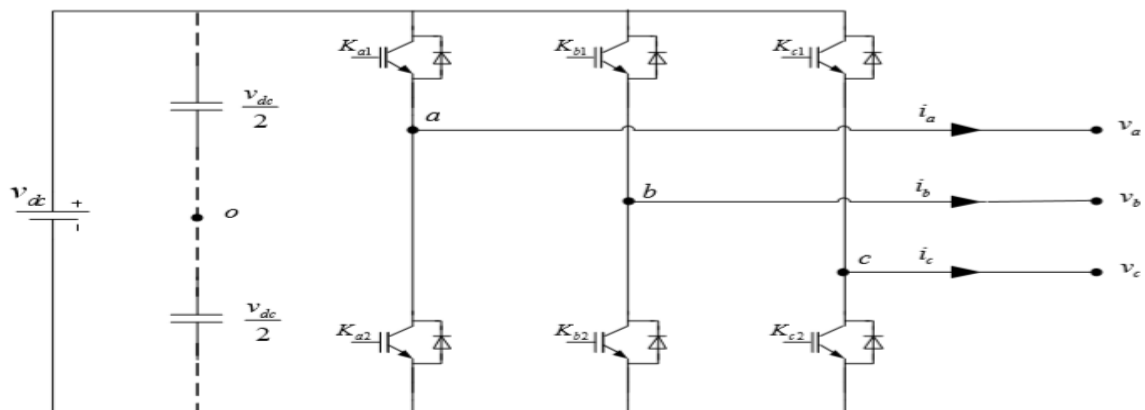


Figure (III.7) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

### III.4.5.3.2 Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur  $k_{xi}$  est associé à une fonction de connexion  $s_{xi}$

$$\begin{cases} s = 1 & \text{si } k \text{ fermé} \\ s = 0 & \text{si } k \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Avec  $x=a, b, c$  : Indicateur de phase ;  $i=1, 2$  : Numéro de l'interrupteur du bras  $x$ .

Sachant que la fermeture où l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs  $k_{x1}$  et  $k_{x2}$

les considérations précédentes conduisent à la relation logique suivante :

$$S_{x2} = \bar{S}_{x1} = 1 - S_{x1} \quad (\text{III.24})$$

### III.4.5.3.3 Tension de sortie

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions  $v_{dc}/2$  ou  $-\frac{v_{dc}}{2}$ , suivant la fonction de connexion  $S_{x1}$  comme illustré dans l'équation (III.25).

$$v_{xo} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 1 (S_{x2}) \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 0 (S_{x2} = 1) \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Où  $v_{xo}$  représente la tension simple entre la phase  $x$  et le point milieu  $o$ .

L'équation (III.25) peut être écrite sous la forme suivante :

$$v_{xo} = \frac{v_{dc}}{2} (2S_{x1} - 1), x = a, b \text{ ou } c \quad (\text{III.26})$$

Donc, Les trois tensions simples  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$  et  $v_{co}$  peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - 1 \\ 2S_{b1} - 1 \\ 2S_{c1} - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Les tensions composées entre phases,  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$  et  $v_{ca}$  deviennent donc :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

En considérant que les tensions simples représentent un système équilibré, on peut écrire

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{III.29})$$

Les tensions simples sont calculées, en fonction des tensions composées comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

En utilisant l'équation (I.28), l'équation (I.30) peut être écrite sous la forme matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

#### III.4.5.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (en anglais pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer [49].

##### III.4.5.4.1 Principe de base de MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur, figure (1.14).

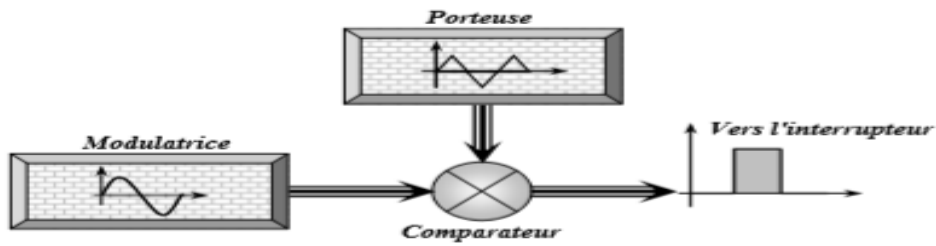


Figure III.6 Schéma synoptique de la MLI

III.4.5.4.2 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_p} \tag{III.32}$$

- **L'indice de modulation :** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_I = \frac{f_p}{f_m} \tag{III.33}$$

III.4.5.5. Contrôle de la commande par  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnel

L'équation intégrale-différentielle définissant l'action de contrôle d'un contrôleur PID d'ordre fractionnaire est donné par :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \tag{III.34}$$

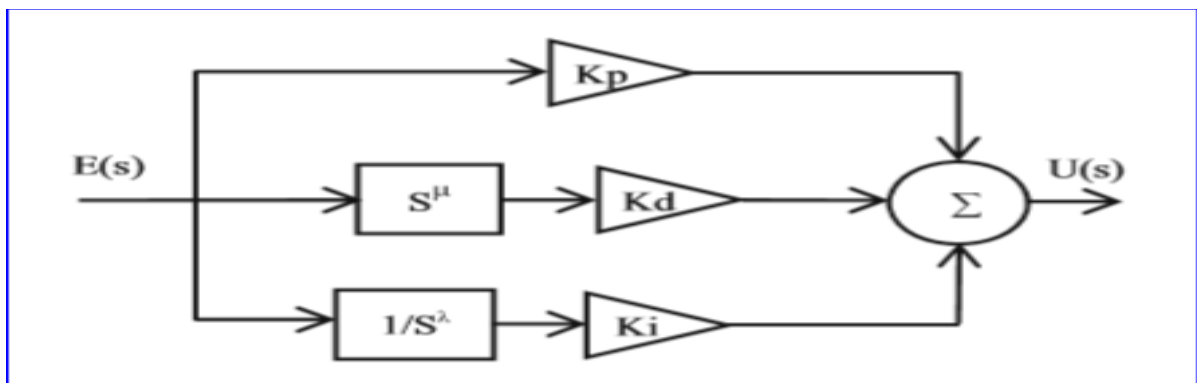



Figure III.7. Schéma block de  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnel

Applique la transformée de Laplace à cette équation avec une condition essentielle, la fonction de transfert du contrôleur peut être exprimée par [50]:

$$C(s) = K_p \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (\text{III.35})$$

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous présentons certains types de dispositif (Facts). Et c'est le DVR nous l'avons modélisé et clarifié ses principaux composants .nous avons également étudié l'une des façons de contrôler le DVR qui permet l'intégration de cette nouvelle technologie dispositif (Facts) dans les réseaux pour ajuster la tension de diverses perturbations, Et dans le dernier chapitre, nous verrons les résultats de la simulation DVR qui prouve son efficacité dans le réseau électrique.



***CHAPITRE IV***  
***Simulation et résultat de  
DVR au raccordement de  
réseau***

## IV.1 Introduction

A travers ce que nous avons étudié dans les chapitres précédents, le réseau électrique est soumis à de nombreuses perturbations dont : (Creux de tension et coupures brèves, Surtensions ...). En utilisant le DVR pour réduire ces perturbations et rétablir un équilibre dans la tension du réseau ou la compensation d'énergie réactive.

Dans ce chapitre, nous étudierons le comportement dynamique de la direction DVR des perturbations de tension et d'énergie réactive. À partir de là, nous avons créé une perturbation dans le réseau afin de comprendre les performances du DVR et comment atténuer de la tension et des creux de tension, sous l'environnement MATLAB / SIMULINK qui nous permet de surveiller ce perturbation et comment le corriger.

La simulation sera la suivante :

1. Fonctionnement de réseau au régime normal.
2. Fonctionnement de réseau perturbé sans DVR.
3. Fonctionnement du réseau perturbé en présence de DVR.

## IV.2 Réseau étudié

Un réseau électrique HTA de  $V_b=V_s=11\text{kV}$  présenté sous l'environnement Matlab/Simulink, constitué d'un générateur (G1) dont leur puissance sont 30 MVA, alimenté deux lignes de distribution d'énergie ligne1 et ligne 2 connecté en (Y) via deux transformateurs (11kV/400V) ont des puissances nominales 30MVA, au bout de chaque ligne des charges non linéaires (400V, 50Hz, 1.5KW). Le DVR est connecté en série avant la charge 2.

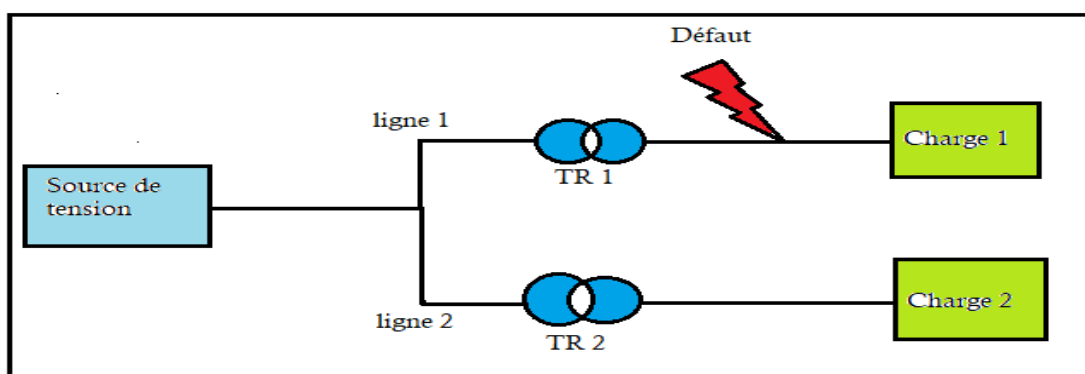


Figure IV.1 Schéma unifilaire du réseau étudié



### IV.3 État de Fonctionnement du réseau

#### IV.3.1.Fonctionnement en régime normal

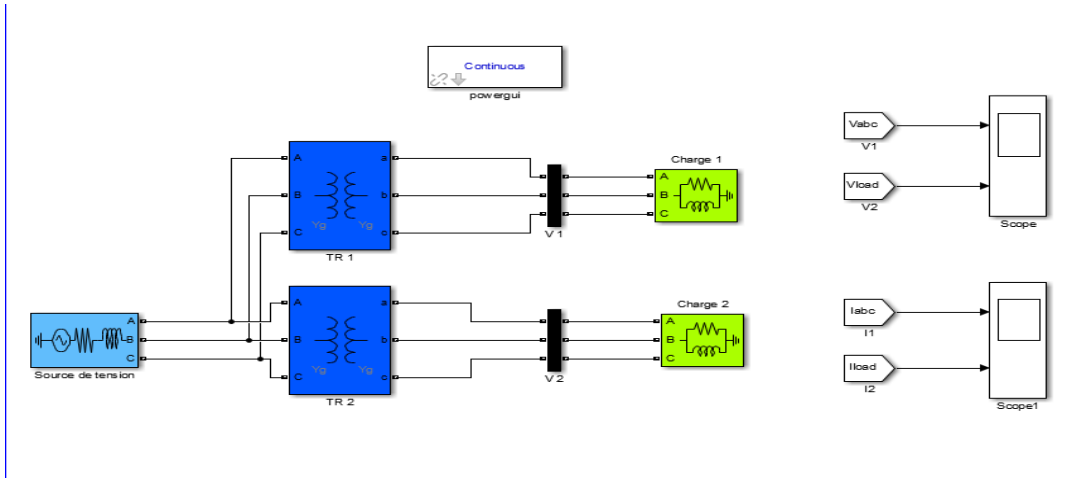


Figure IV.2 Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement en régime normal

- **Résultat de simulation :**

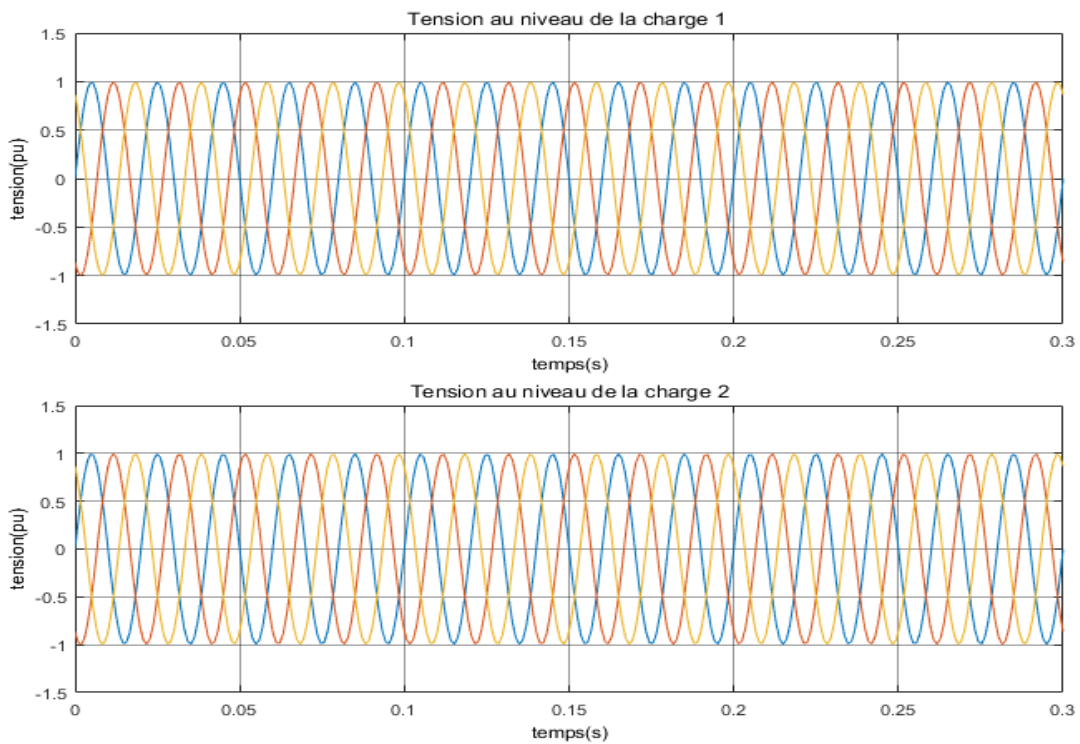
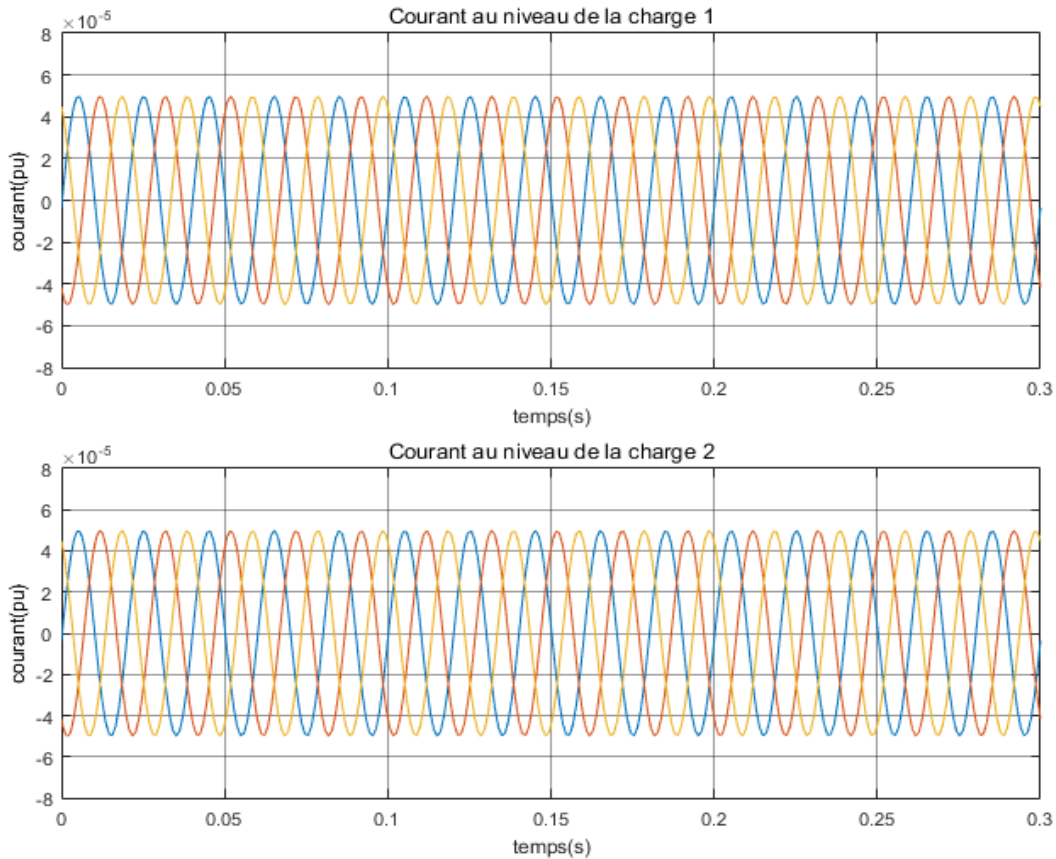


Figure IV. 3.Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2



**Figure IV. 4.**Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

- **Interprétation des résultats**

Dans le régime normal (sans perturbations) que nous avons simulé, représenté par la (Figure IV.2), nous avons analysé les tensions et les courants au niveau de la charge 1 et la charge 2 et nous avons remarqué en ce qui concerne les tensions et les courants sont sinusoïdales, équilibrés en phases et en amplitudes (FigureIV.3,FigureIV.4)

### IV.3.2. Etude de réseau perturbé

#### IV.3.2.1. Cas d'un creux de tension

Nous appliquons un défaut (creux de tension) dans le réseau sur la ligne 1.

Le temps de défaut : [0.05s-0.25s].

IV.3.2.1.1. Réseaux sans DVR

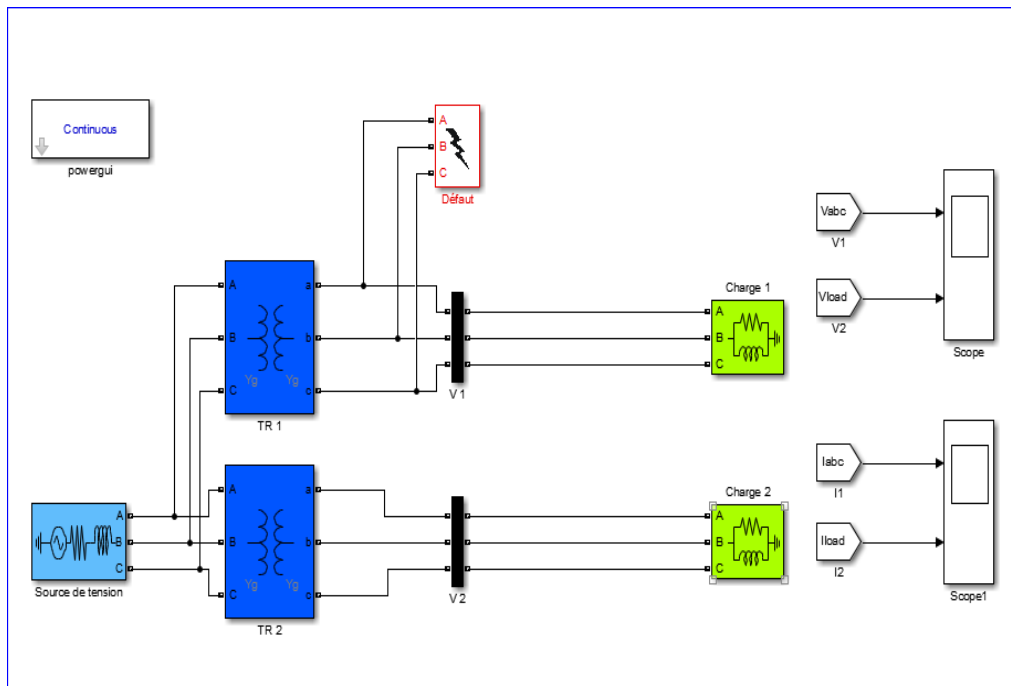


Figure IV.5. Schéma bloc d'un réseau au fonctionnement perturbé (Creux de tension)

- Résultat de simulation

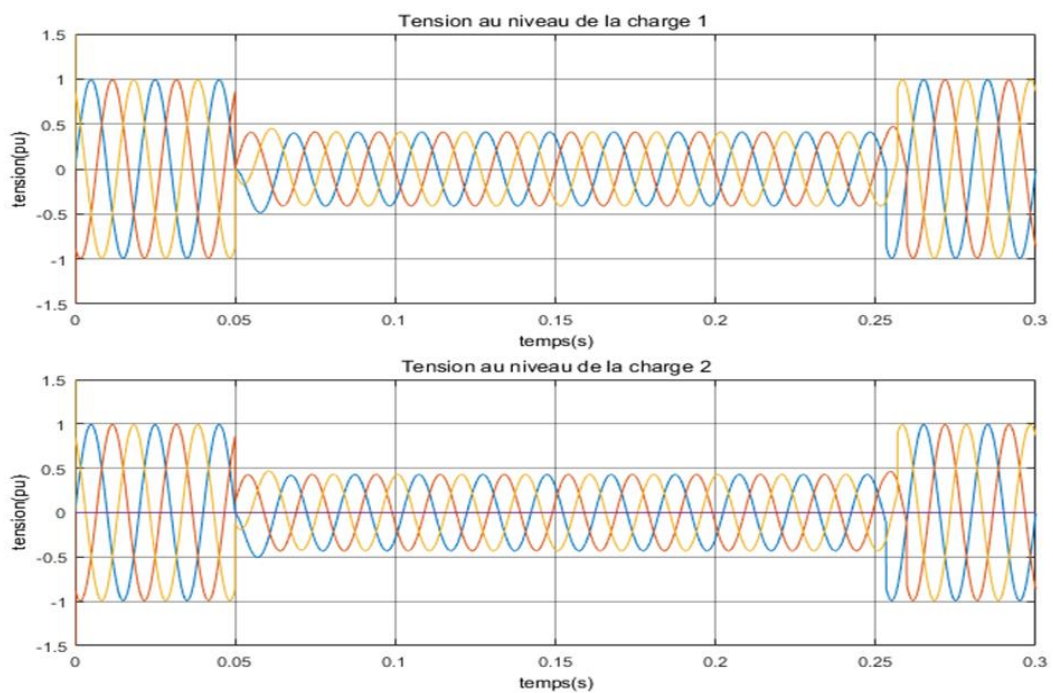


Figure IV. 6. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

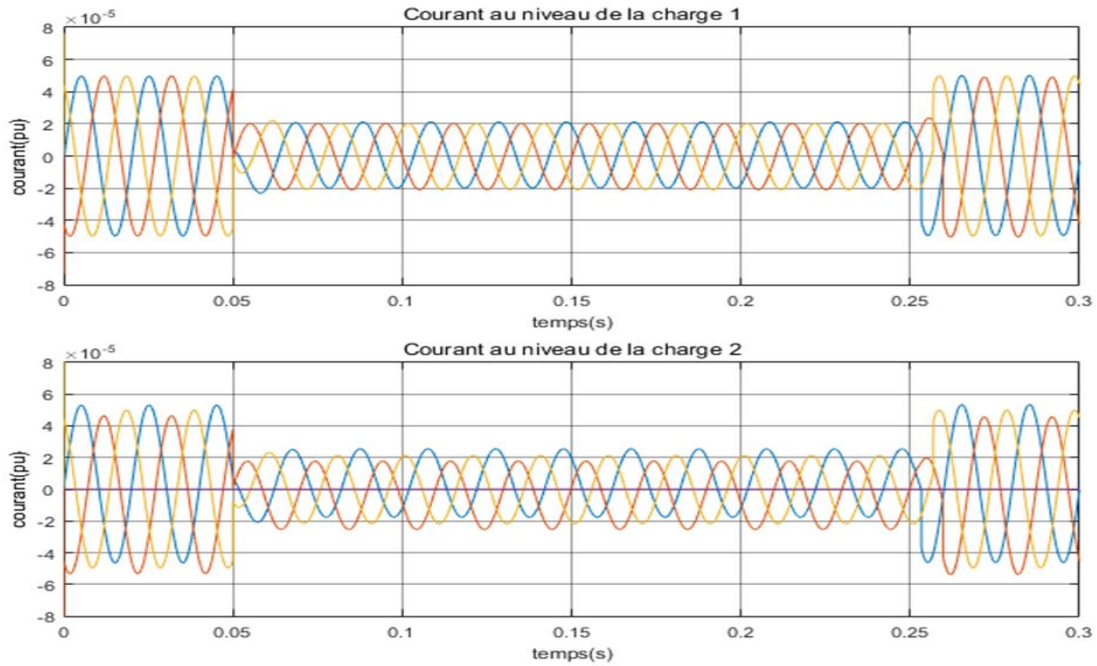


Figure IV. 7. Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

IV.3.2.1.2. Réseaux avec DVR

➤ Application de  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire sur DVR

Le réglage du paramètre se fait par l’algorithme d’optimisations «PSO» définis dans le chapitre précédent.

Après avoir essayé les différentes valeurs de  $K_u$ , nous avons relevé le gain d’oscillation  $K_u=25$  et la période d’oscillation  $T_u=3.6 \times 10^{-4}(s)$ . En appliquant les règles de la méthode de Ziegler-Nichols, nous déduisons les valeurs des paramètres :  $K_p=20.83$ ,  $T_i= 0.0037$ ,  $T_d=0.000048$ . Ainsi, nous utiliserons ces paramètres pour l’initialisation d’algorithme d’optimisation par la méthode PSO [37].

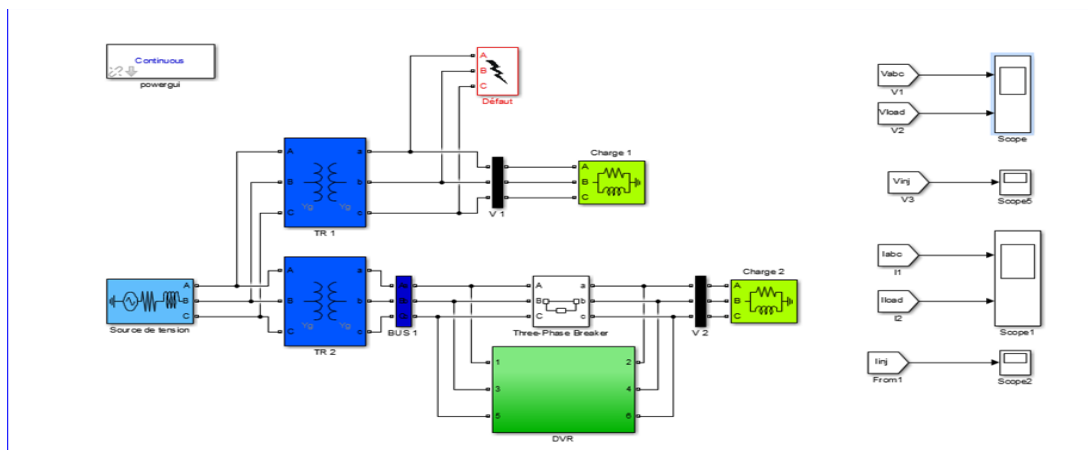


Figure IV.8. Schéma bloc d’un réseau au Fonctionnement perturbé en présence de DVR

➤ Réglage par PSO

Dans le cas d’une optimisation par PSO, les trois paramètres du PID, ou les cinq paramètres d’un  $PI^\lambda D^\mu$  forme une particule, l’initialisation des paramètres sera effectuée à base des valeurs obtenues par la méthode de Ziegler-Nichols L’objectif est donc de trouver la meilleur solution de position de chaque particule, notée position locale, puis en chercher la meilleur pour un nombre d’itération prédéfini (100 itérations). En fonction d’une minimisation d’un critère de cout (fonction fitness), on arrive donc à obtenir une solution globale parfaite (meilleurs position globale) synonyme d’un coût minimal (meilleure coût globale).

PSO	Paramètres
PID	$K_p = 0.085$ $K_i = 0.4$ $K_d = 0.09$
$PI^\lambda D^\mu$	$\lambda = 0.676$ $\mu = 1.255$ $K_p = 200.068$ $K_i = 4.068$ $K_d = 0.2855$

Tableau IV.1 Performances obtenues par PSO

➤ Stratégie de control de DVR par régulateur fractionnaire

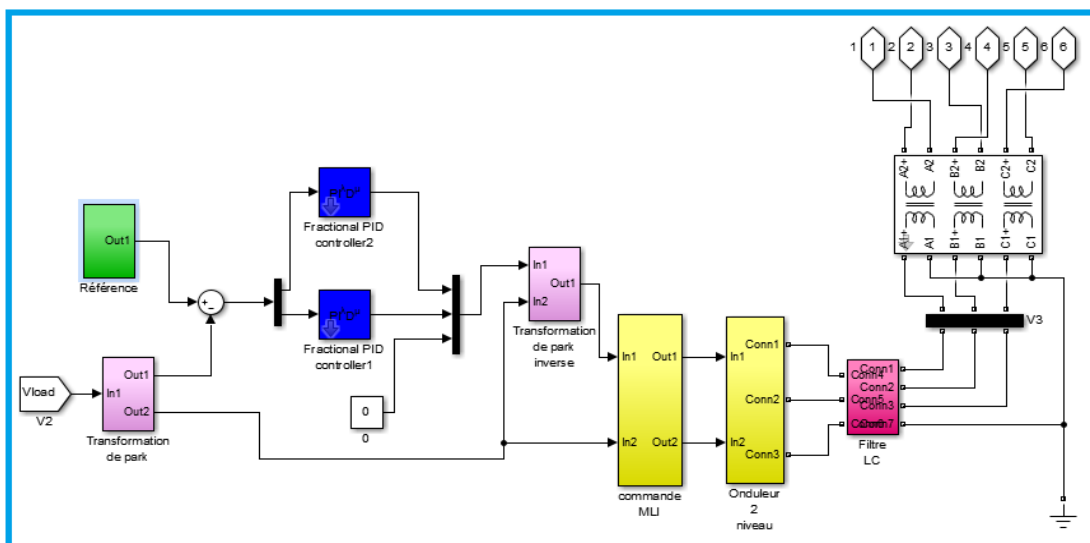


Figure IV.9. Schéma bloc de DVR

• Résultat de simulation

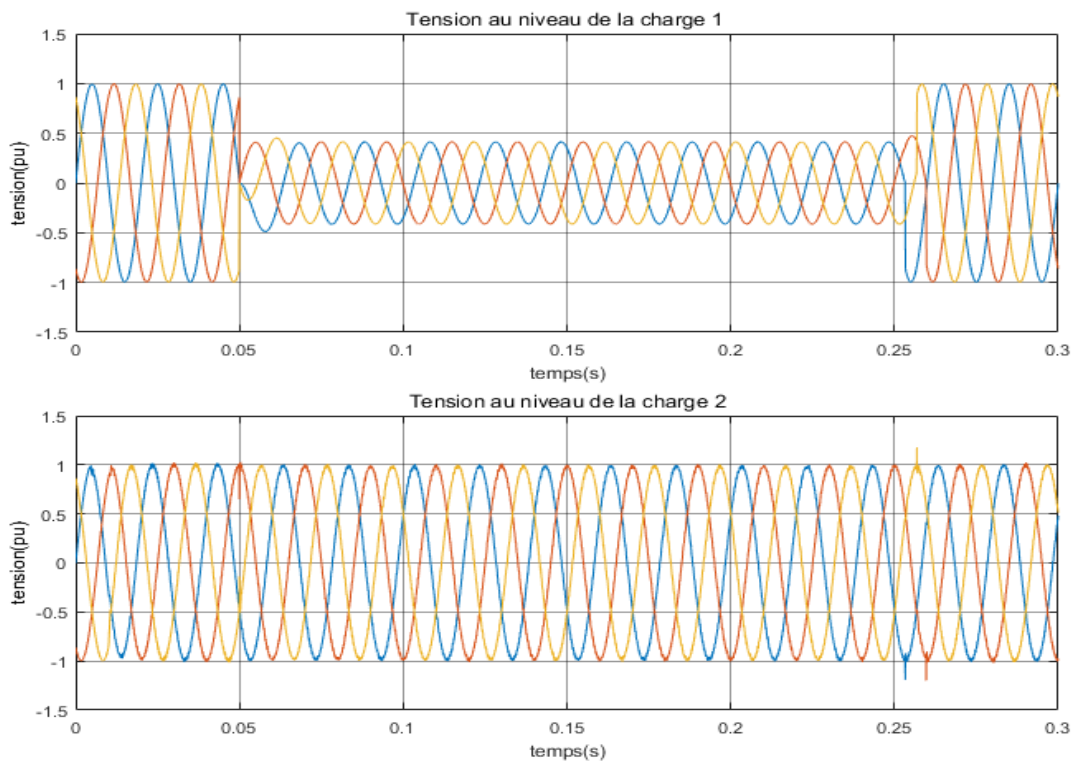


Figure IV. 10. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

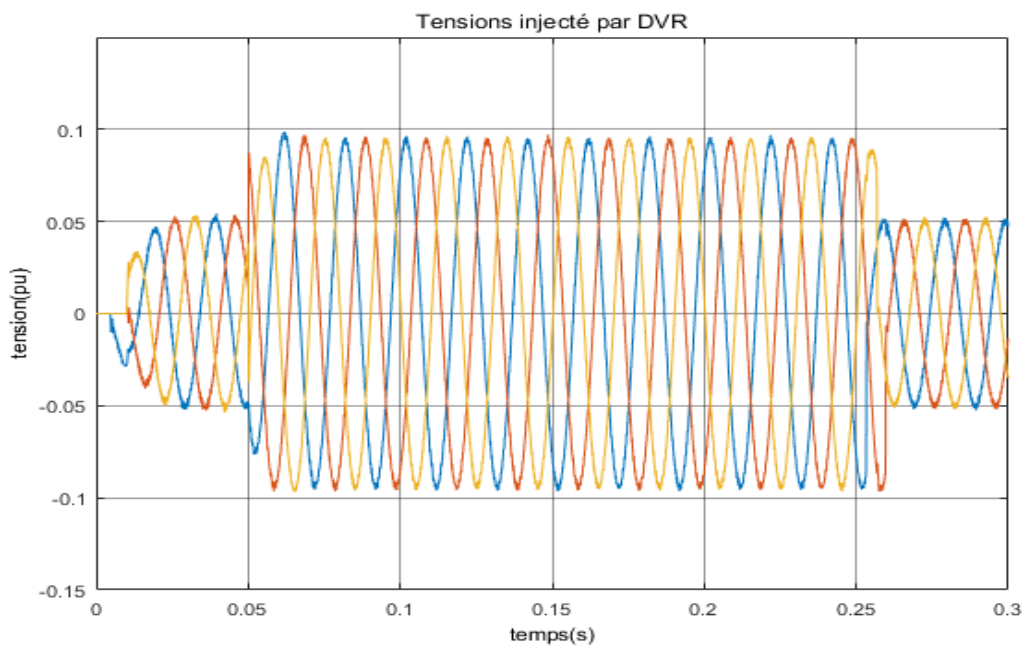


Figure IV. 11. Tension injecté par DVR

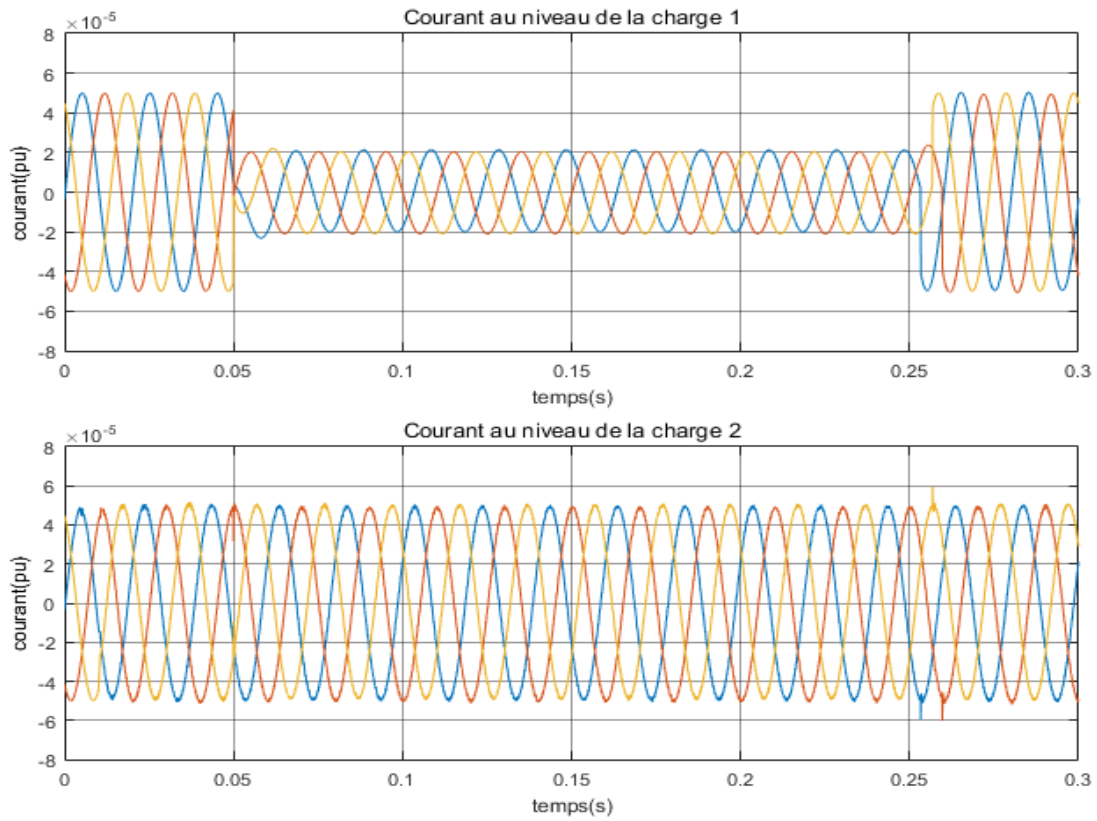


Figure IV. 12. Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

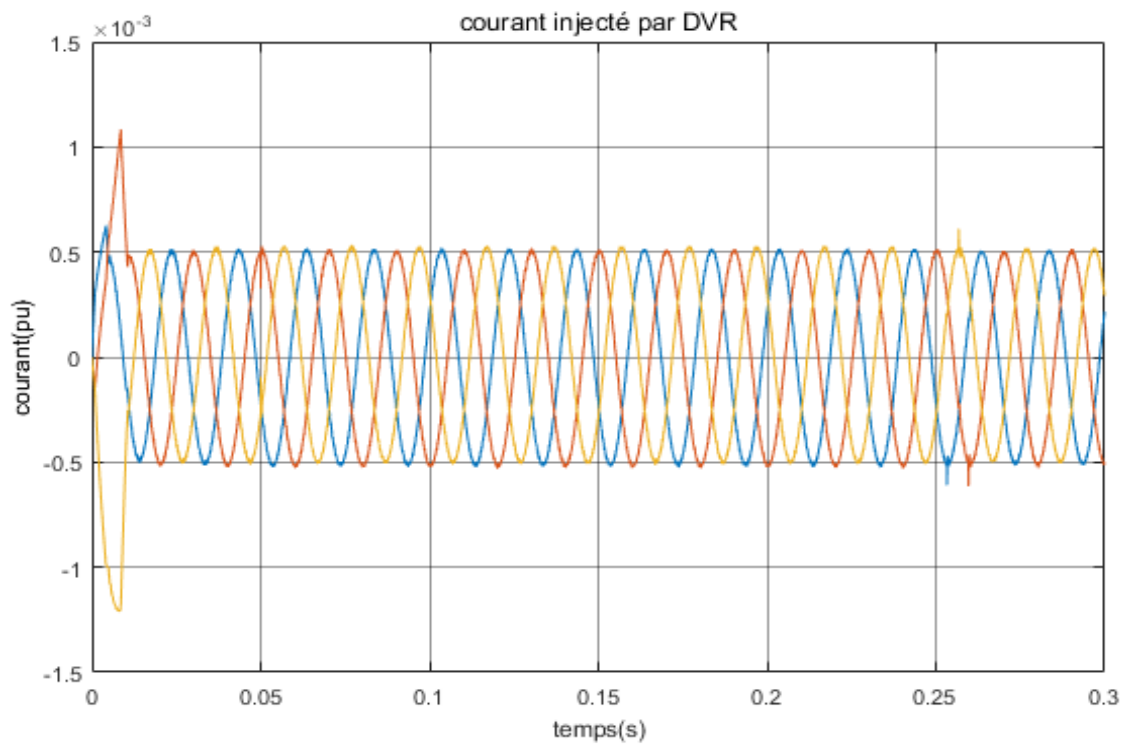


Figure IV. 13. Courant injecté par DVR

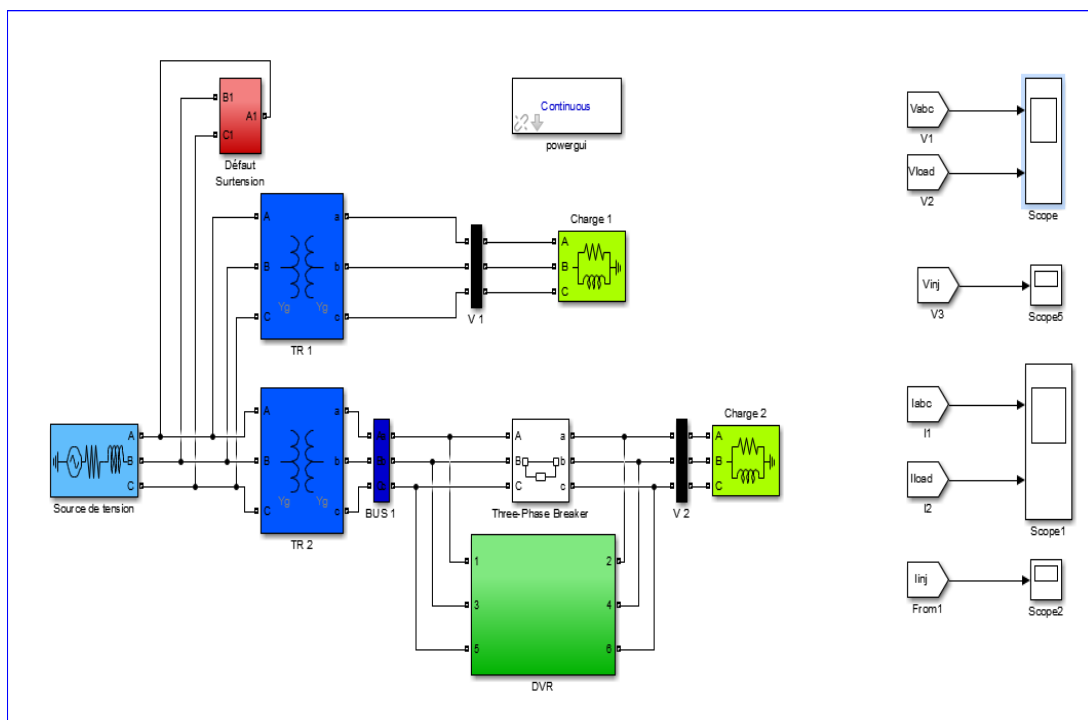
- **Interprétation des résultats**

Pour le creux de tension imposée au réseau de distribution que nous avons simulé, nous avons comparé les tensions et les courants au niveau de la charge 1 et la charge 2, et cela en absence et en présence du DVR.

Dans le cas d'absence du DVR on a remarqué à l'instant  $t=0.05(s)$  l'amplitude de la tension au niveau de la charge 1 et la charge 2 est réduite de 40% par rapport à la tension fondamentale jusqu'à l'instant  $t=0.25(s)$ , ainsi que l'amplitude de courant au niveau de la charge 1 et la charge 2 est réduit de 40% par rapport à le courant fondamentale (Figure IV.6, FigureIV.7).

Mais dans le cas de présence du DVR on a remarqué la tension et le courant au niveau de la charge 2 est gardé toujours son propre amplitude, Comme indiqué sur les (FigureIV.10, IV.12), Ceci est rendu possible grâce au DVR qui injecte une tension manquante ou compensatrice au réseau reliant en série la charge (FigureIV.11).

**IV.3.2.2. Cas d'un défaut surtension**



**Figure IV. 14.**Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement perturbé (surtension)



➤ Schéma bloc d'un défaut surtension

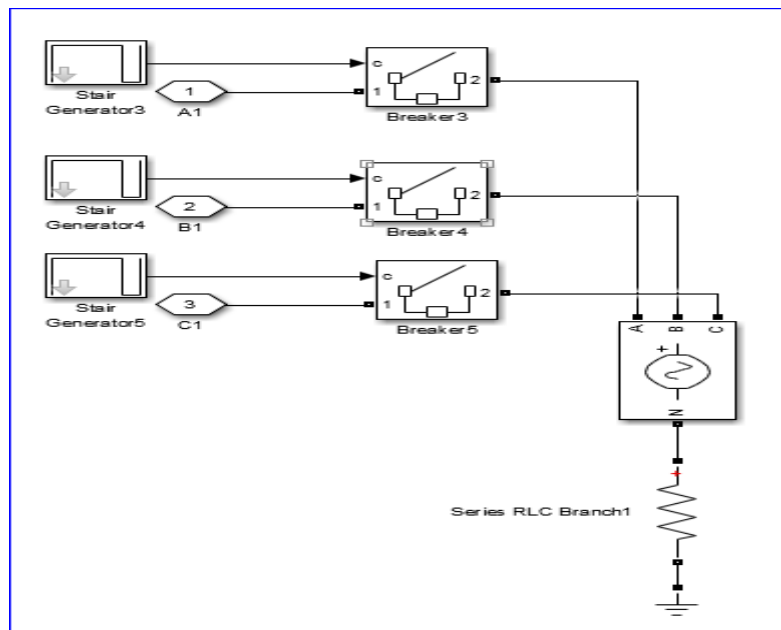


Figure IV.15. Schéma bloc d'un défaut surtension

• Explication de bloc

Le bloc de (Défaut surtension) contient une source de tension programmable (Three-Phase programmable voltage source). Il est connecté à 3 disjoncteurs programmables (Breaker) et ils sont à leur tour connectés à deux côtés. Le côté est connecté au générateur d'escalier (Stair Generator), c'est le contrôleur pour ouvrir et fermer le disjoncteur et le deuxième côté est connecté au réseau.

Dans nos simulations, nous avons appliqué une perturbation de surtension sur le réseau. Et en programmant une source de tension programmable (Three-Phase programmable voltage source) pour augmenter la tension du réseau puis revenir à son état normal dans la période de [0.05 0.25 0.3], avec type de variation (Table of time-amplitude pairs).

Nous avons également programmé le générateur d'escalier 1 (Stair Generator 1) pour contrôler la fermeture du disjoncteur 1 (Breaker 1) afin de faire passer la tension qui affectera le réseau en phase 1 dans la période de [0.05s 0.25 0.3].

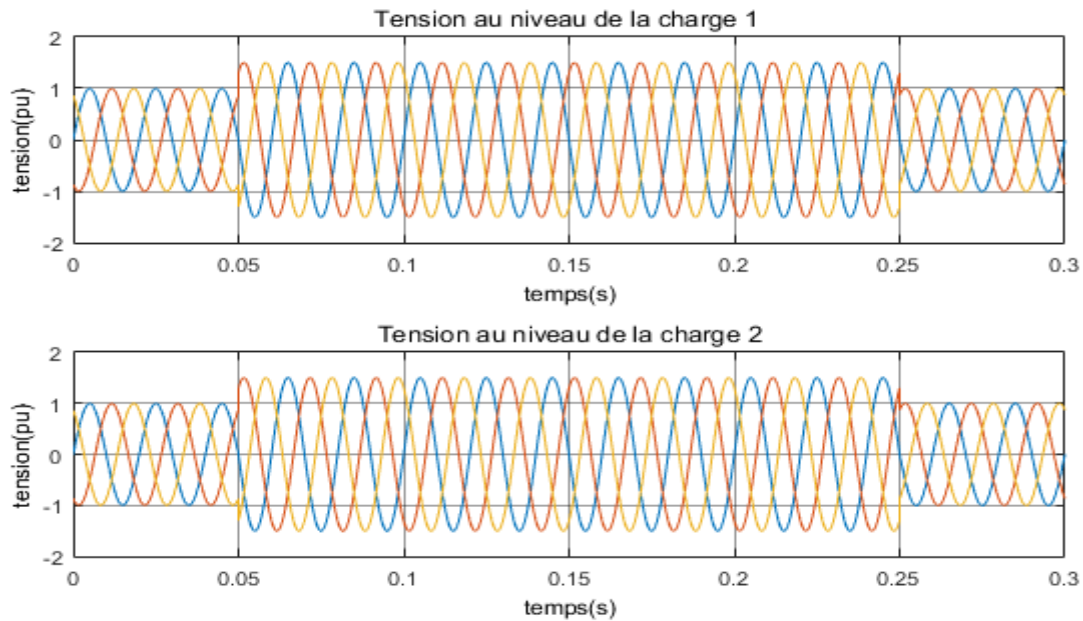
Et nous avons programmé le générateur d'escalier 2 (Stair Generator 2) pour contrôler la fermeture du disjoncteur 2 (Breaker 2) afin de faire passer la tension qui affectera le réseau en phase 2 dans la période de [0,05s 0.25 0.3].

Quant au générateur d'escalier 3 (Stair Generator 3), nous avons programmé pour contrôler la fermeture du disjoncteur 3 (Breaker 3) afin de faire passer la tension qui affectera le réseau en phase 3 dans la période de [0,05s 0.25 0.3].

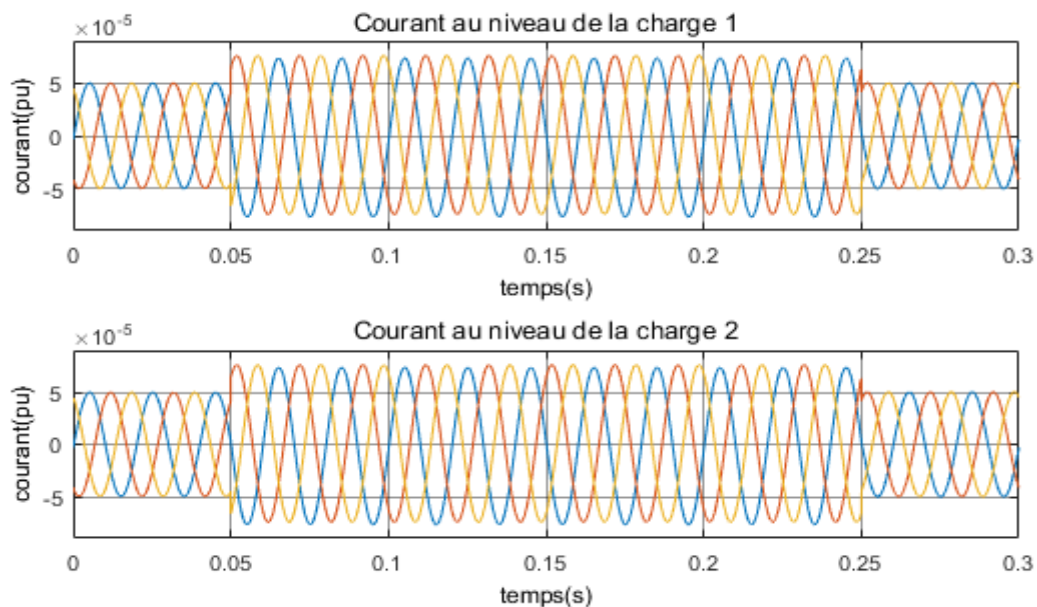
Ce sont les résultats de simulation de la surtension montrée dans les figures ci-dessous.

#### IV.3.2.2.1. Réseaux sans DVR

- **Résultat de simulation**



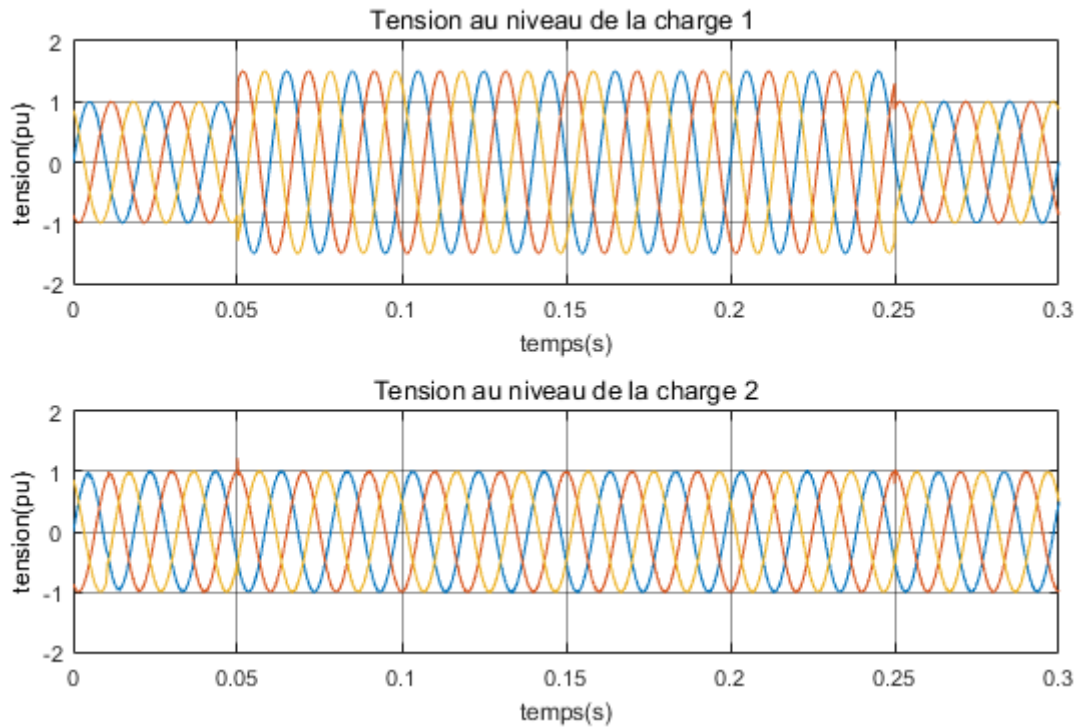
**Figure IV. 16.** Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2



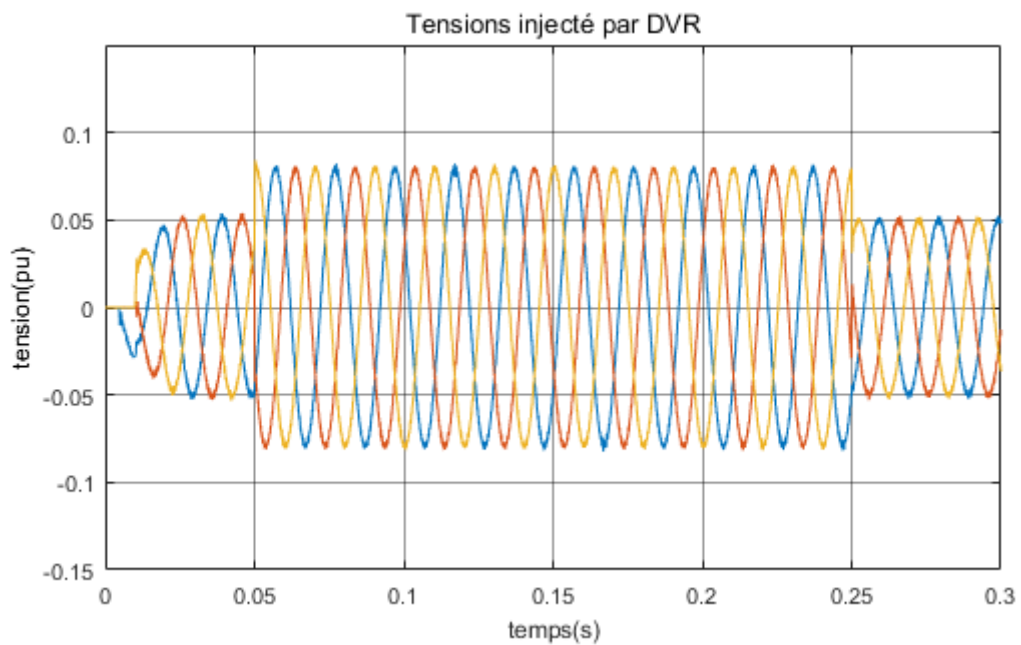
**Figure IV. 17.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

## IV.3.2.2.2. Réseaux avec DVR

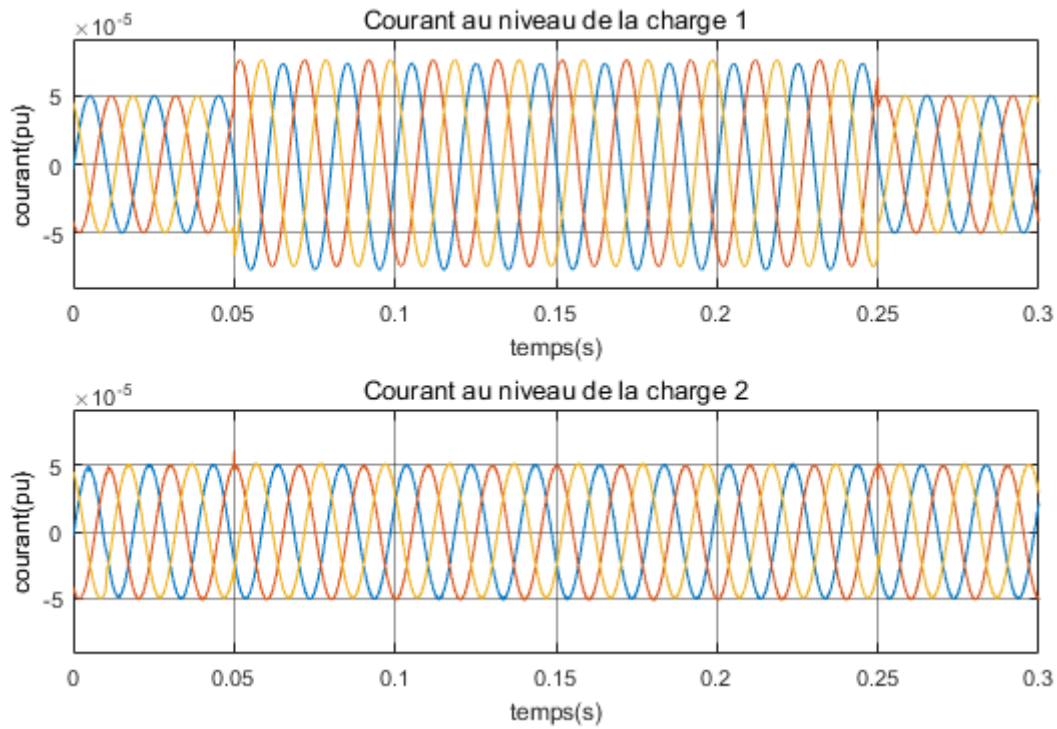
## • Résultat de simulation



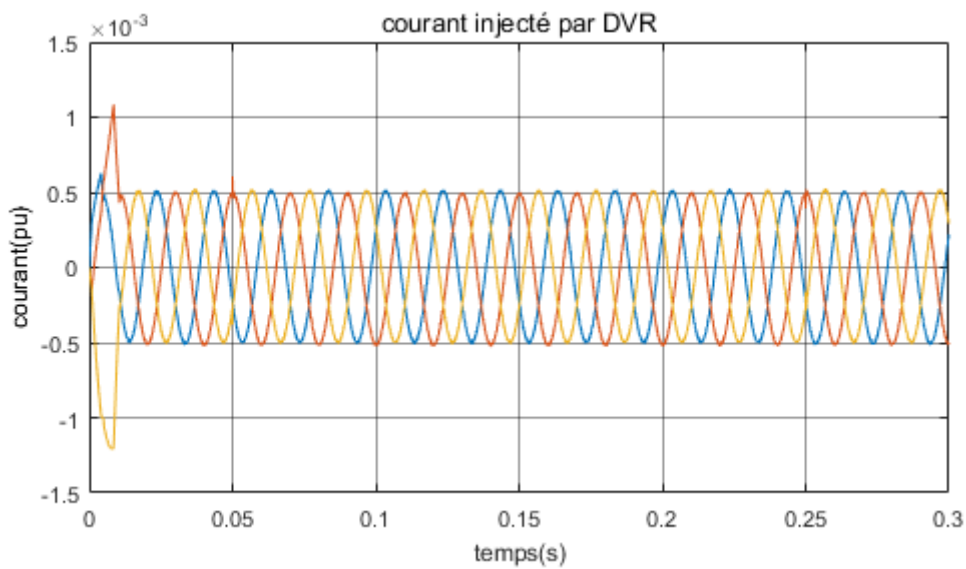
**Figure IV. 18.**Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2



**Figure IV. 19.**Tension injecté par DVR



**Figure IV. 20.** Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2



**Figure IV. 21.** Courant injecté par DVR

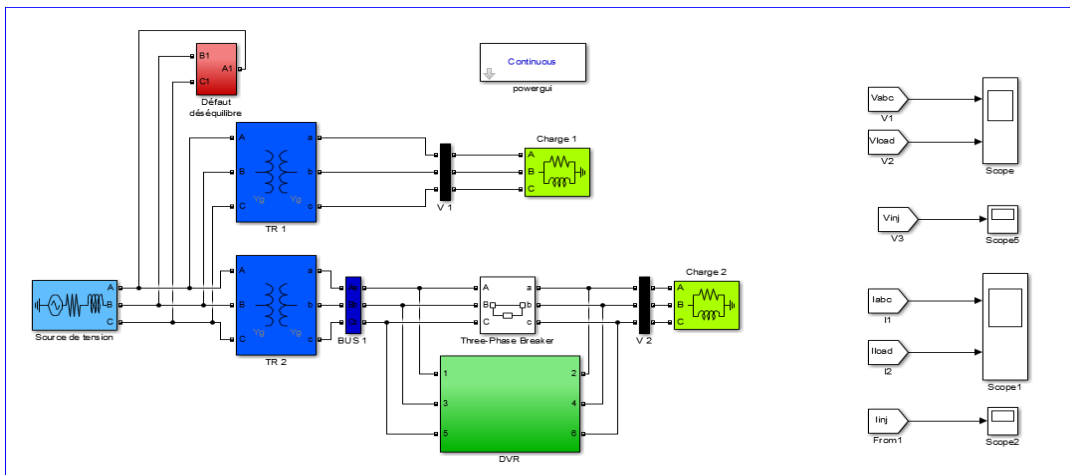
- **Interprétation des résultats**

Nous avons analysé les tensions et les courants au niveau de la charge 1 et la charge 2 avec ou sans la présence de la DVR.

Dans le cas d'absence du DVR, on note que dans période [0.05s-0.25s] de perturbation (surtension), le réseau est affecté par l'augmentation de la tension au niveau de la charge 1 et la charge 2 (Figure IV.16), ainsi qu'en le courant au niveau de la charge 1 et la charge 2 (Figure IV.17).

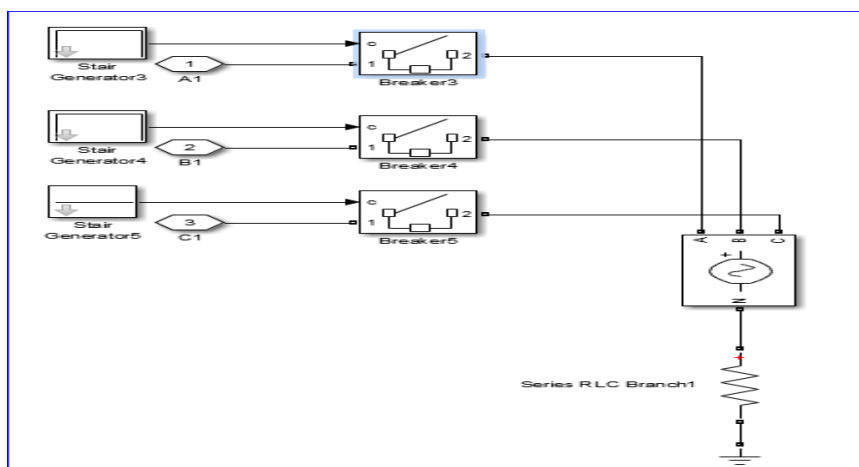
Dans le cas de présence du DVR on a remarqué qu'avec la survenance de la perturbation (surtension), la tension au niveau de la charge 1 a été affectée. Quant à la tension au niveau de la charge 2 n'a pas été affectée par cette perturbation (Figure. IV.18) Et la même chose pour le courant (Figure. IV.20). Se référer à la connexion du DVR à la ligne 2 avant la charge 2. Où il a injecté de tension (Figure. IV.19) dans la ligne 2 alors que la perturbation était présente.

**IV.3.2.3. Cas d'un défaut déséquilibre**



**Figure IV. 22.** Schéma bloc d'un réseau au Fonctionnement perturbé (Déséquilibre)

➤ **Schéma bloc d'un défaut déséquilibre**



**Figure IV.23.**Schéma bloc d'un défaut déséquilibre

- **Explication de bloc**

Le bloc de (Défaut déséquilibre) contient une source de tension programmable (Three-Phase programmable voltage source).il est connecté à 3 disjoncteurs programmables (Breaker) et ils sont à leur tour connectés à deux côtés .Le côté est connecté au générateur d'escalier (Stair Generator), c'est le contrôleur pour ouvrir et fermer le disjoncteur et le deuxième côté est connecté au réseau.

Dans nos simulations, nous avons appliqué une perturbation de déséquilibre sur le réseau. Et en programmant une source de tension programmable (Three-Phase programmable voltage source) pour augmenter progressivement la tension du réseau dans la période de [0.05s – 0.55s], puis revenir progressivement à son état normal avec type de variation(Modulation).

Nous avons également programmé le générateur d'escalier 1(Stair Generator 1) pour contrôler la fermeture du disjoncteur 1(Breaker 1) afin de faire passer la tension qui affectera le réseau en phase 1 dans la période de [0.05s – 0.55s].

Et nous avons programmé le générateur d'escalier 2(Stair Generator 2) pour contrôler la fermeture du disjoncteur 2 (Breaker 2) afin de faire passer la tension qui affectera le réseau en phase 2 dans la période de [0,05s - 0,55s].

Quant au générateur d'escalier 3 (Stair Generator 3), nous ne l'avons pas programmé pour contrôler l'arrêt du disjoncteur 3 (Breaker 3). Et il est resté ouvert afin que la tension dans laquelle la perturbation n'affecte pas la phase 3 reste la même pendant toute la durée de la simulation.

Ce sont les résultats de simulation du déséquilibre montré dans les figures ci-dessous.

IV.3.2.3.1. Réseaux sans DVR

- Résultat de simulation

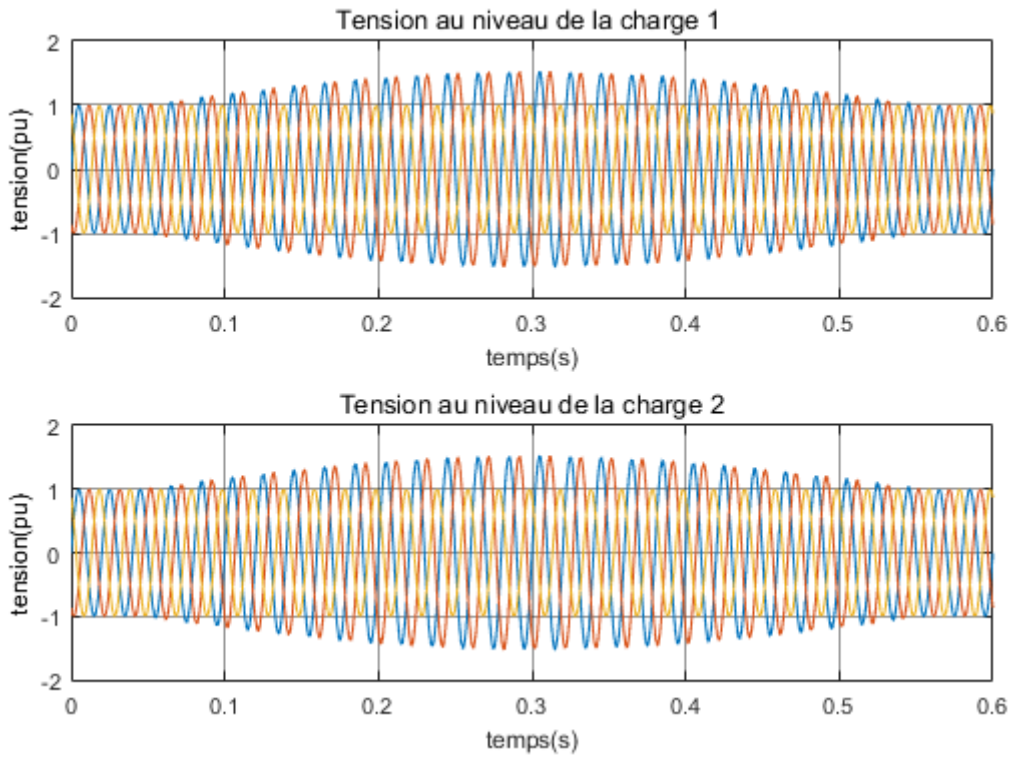


Figure IV. 24. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

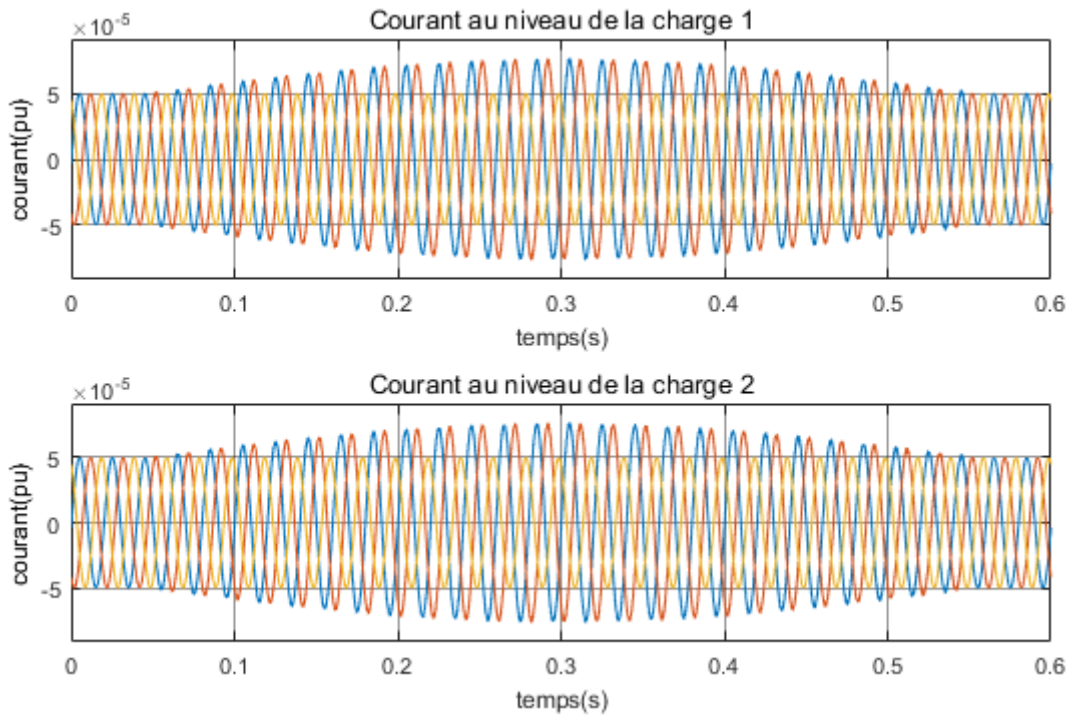


Figure IV. 25. Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2

## IV.3.2.3.2. Réseaux avec DVR

## • Résultat de simulation

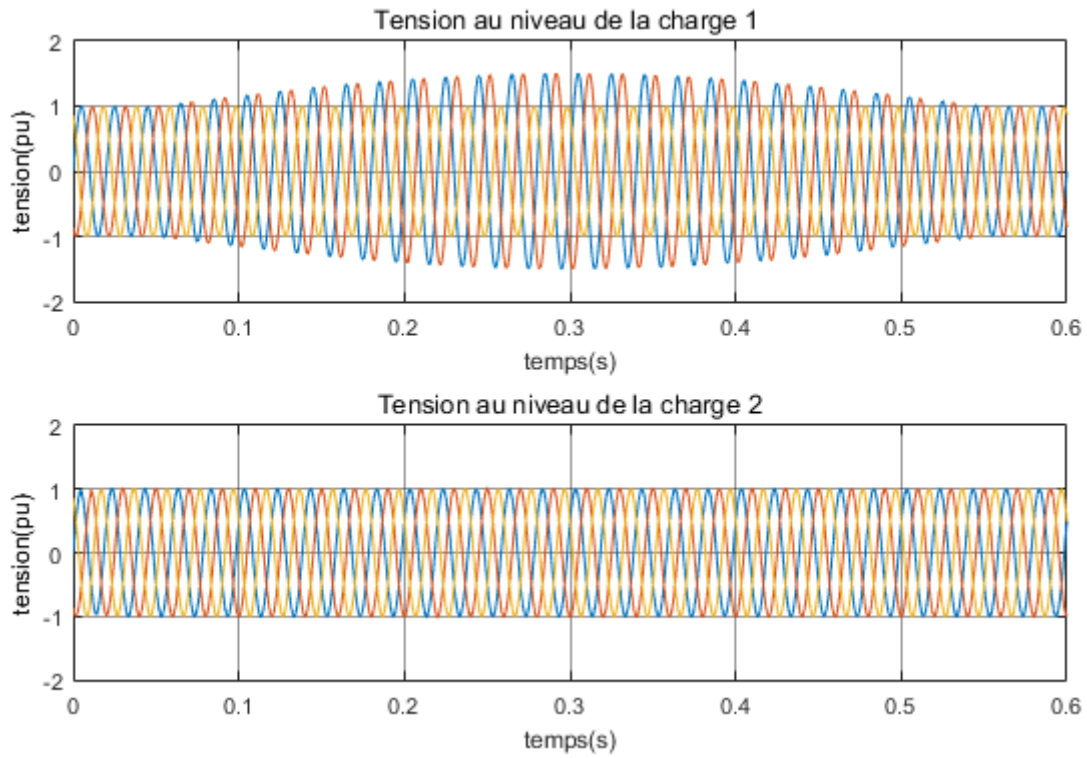


Figure IV. 26. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

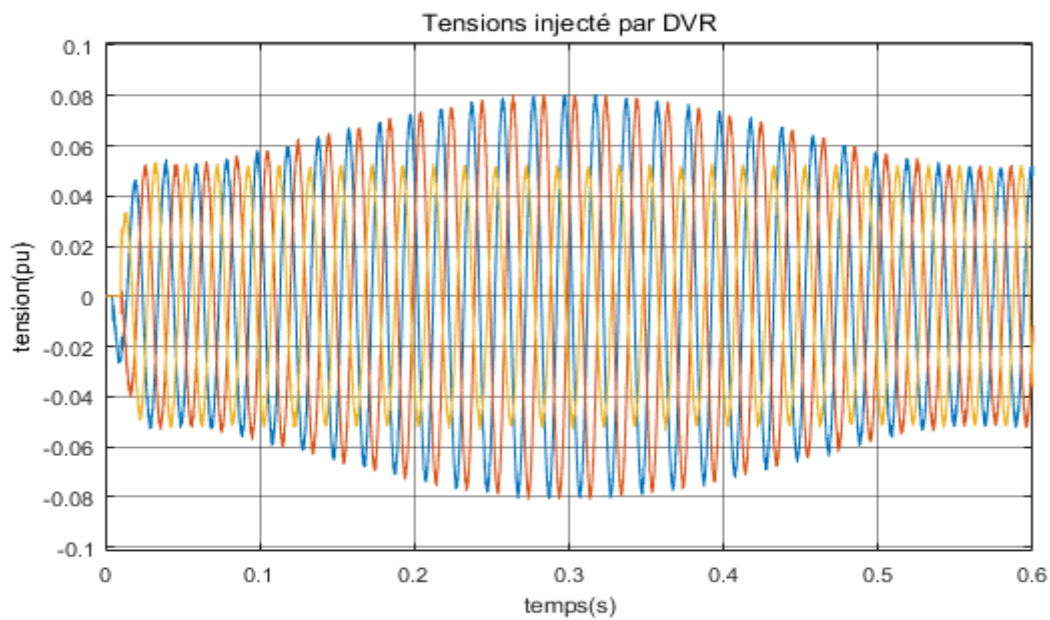
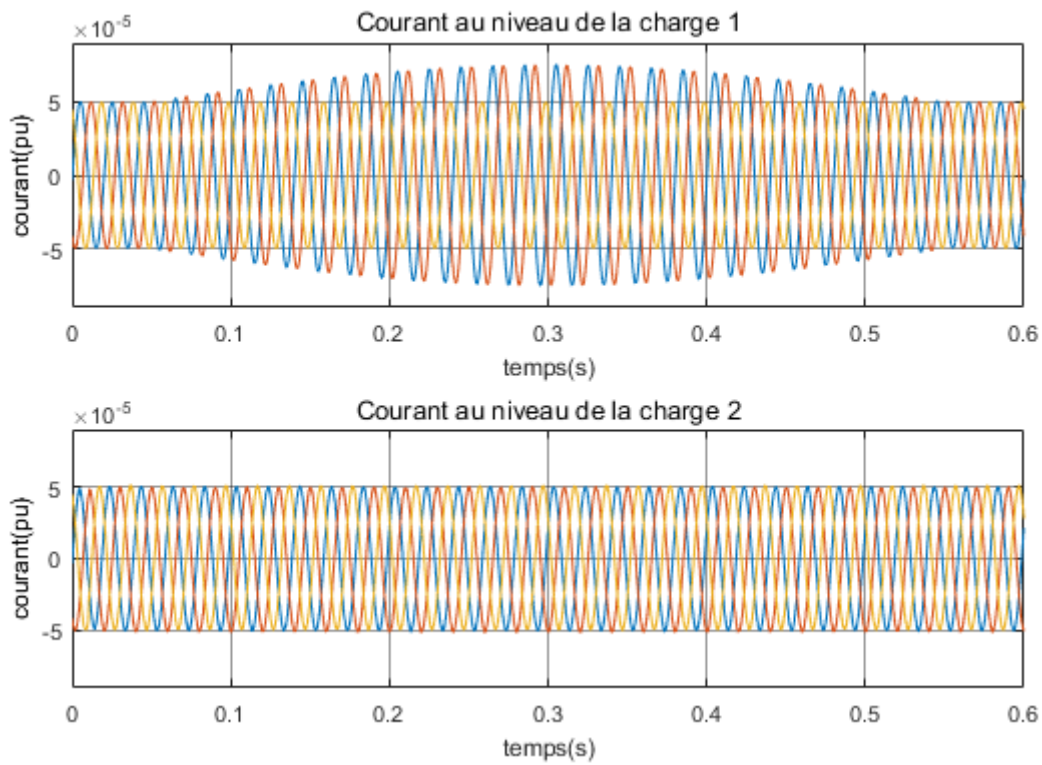
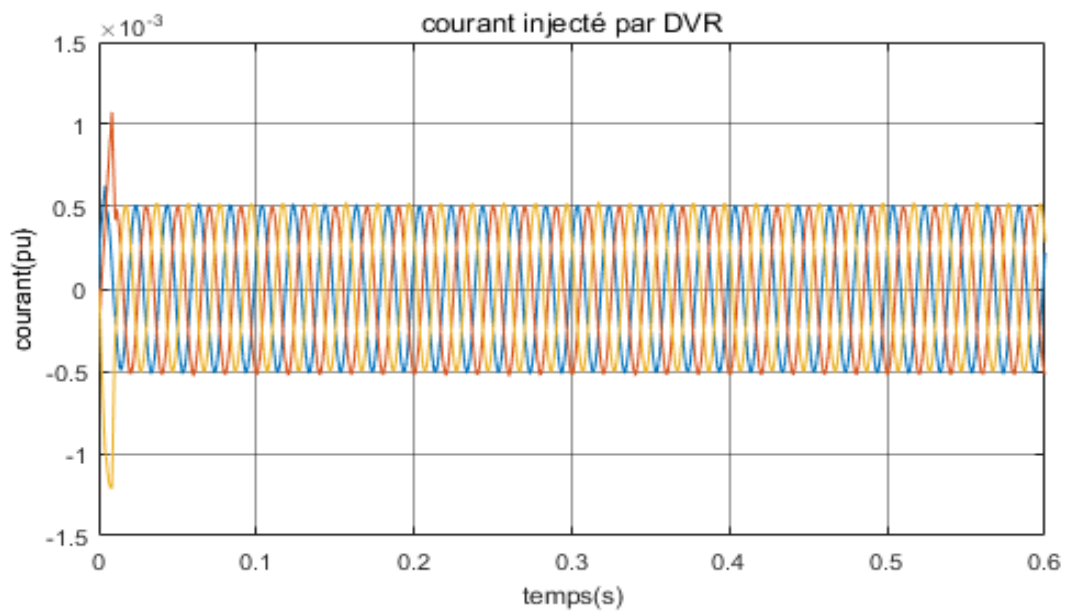


Figure IV. 27. Tension injecté par DVR





**Figure IV. 28.**Courant au niveau de la charge 1 et la charge 2



**Figure IV. 29.**Courant injecté par DVR

- **Remarque**

La période de simulation : [0s-0.6s].

La période de défaut : [0.05s-0.55s].

- **Interprétation des résultats**

Dans le cas d'absence du DVR on a remarqué qu'avec la survenance de la perturbation (déséquilibre), la tension au niveau de la charge 1 et la charge 2 est devenue déséquilibrée (Figure IV.24) ainsi qu'au le courant au niveau de la charge 1 et la charge 2 (Figure IV.25).

Dans le cas de présence du DVR on a remarqué qu'avec la survenance de la perturbation (déséquilibre), la tension au niveau de la charge 1 a été affectée. Quant à la tension au niveau de la charge 2 n'a pas été affectée par cette perturbation (Figure. IV.26) Et la même chose pour le courant (Figure. IV.28). Se référer à la connexion du DVR à la ligne 2 avant la charge 2. Où il a injecté de tension (Figure. IV.27) dans la ligne 2 alors que la perturbation était présente.

#### IV.4.Analyse comparative des harmoniques dans le réseau

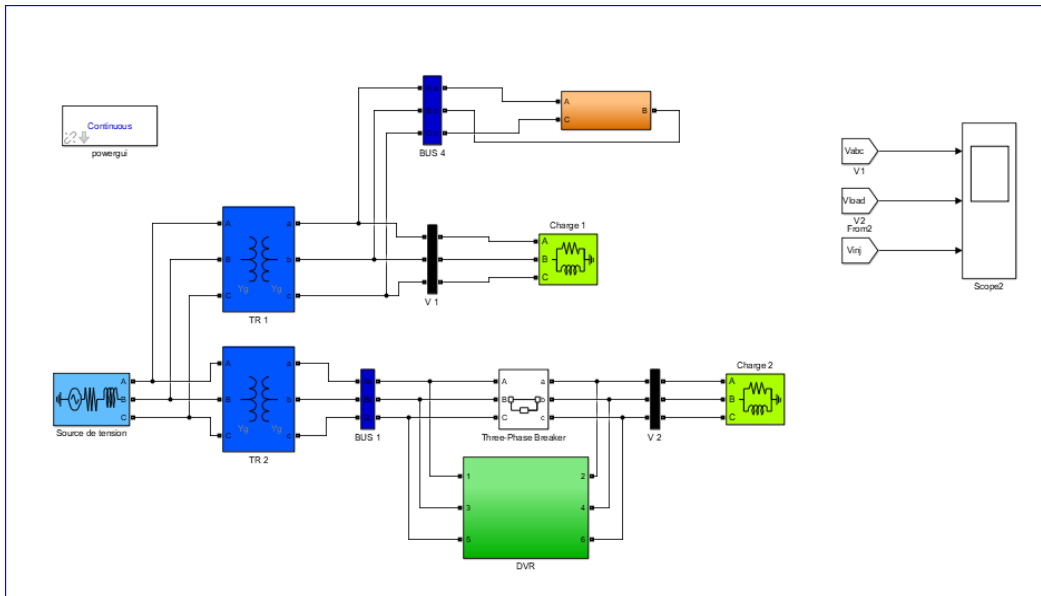


Figure IV. 30. Schéma bloc d'un réseau

## IV.4.1. Réseau sans DVR

## • Résultat de simulation

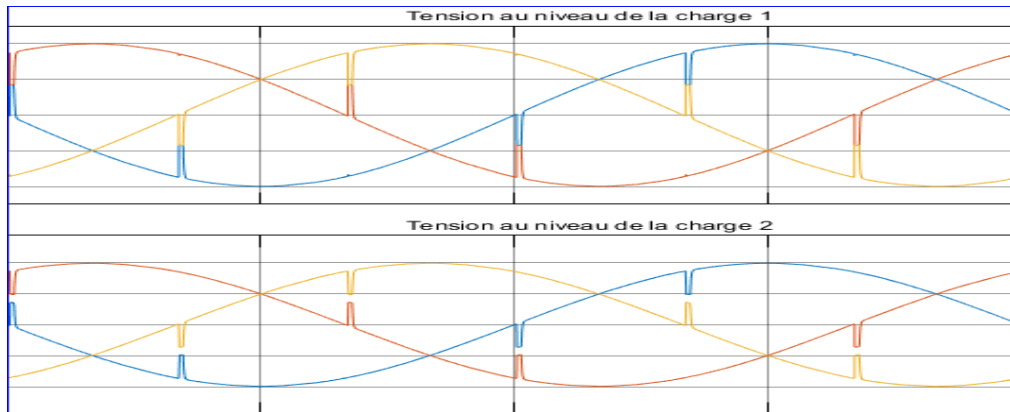


Figure IV. 31. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

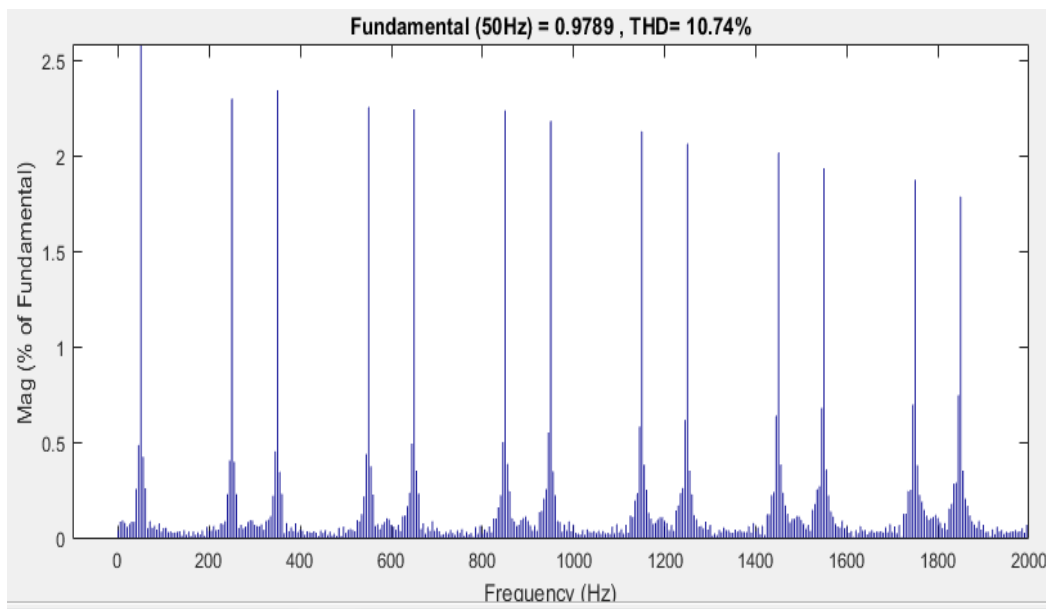


Figure. IV.32. Analyse des harmoniques de réseau sans DVR

## IV.4.2. Réseau avec DVR

- Résultat de simulation

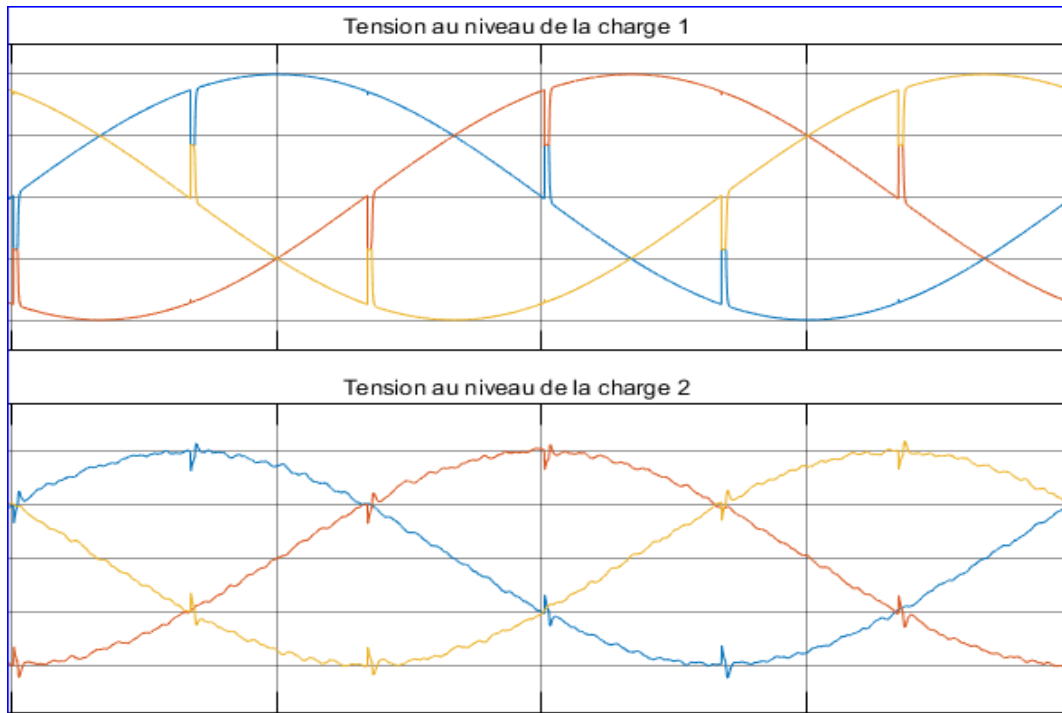


Figure IV. 33. Tensions au niveau de la charge 1 et la charge 2

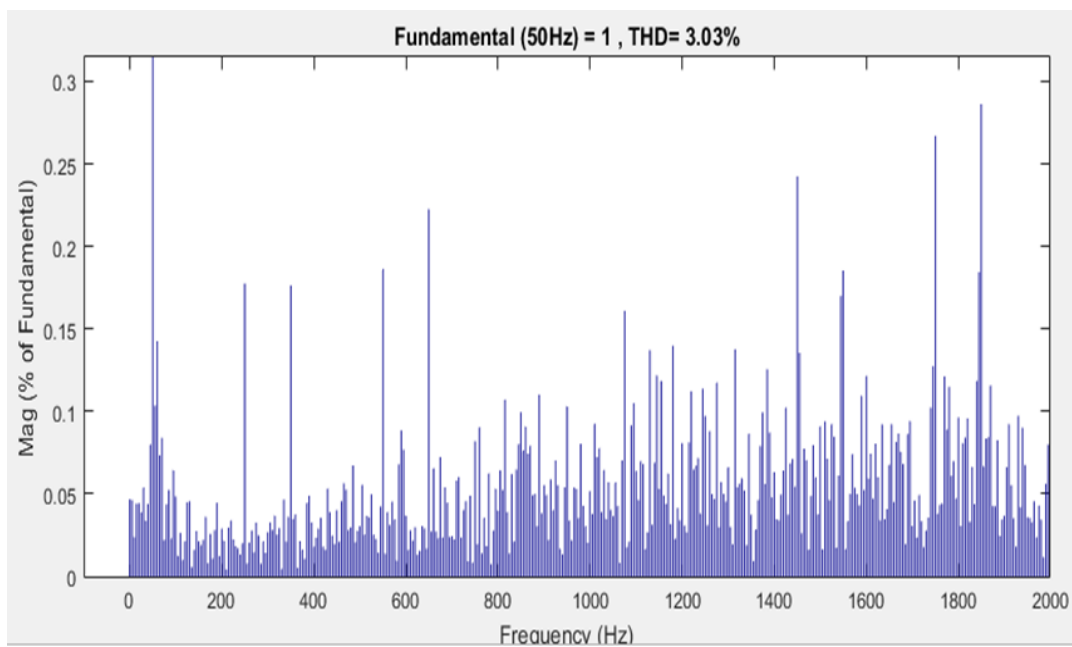


Figure IV.34. Analyse des harmoniques de réseau avec DVR

- **Interprétation des résultats**

Nous notons à partir des résultats que la tension du réseau contient des harmoniques, soit dans la charge 1 soit dans la charge 2 (Figure. IV.31). où le rapport des harmoniques dans le réseau a été estimé à = 10,74%. (Figure. IV.32).

Mais les résultats après avoir connecté le **DVR** au réseau c'est comme suit : La tension au niveau de la charge 1 est restée les mêmes harmoniques, quant à la tension au niveau de la charge 2 (Figure. IV.33) les harmoniques ont diminué à = **3.03%** (Figure. IV.34). Ceci est dû à la connexion du DVR à la ligne 2, donc le DVR a réduit le pourcentage des harmoniques de 10.74% à 3.03%.

## **IV.6 Conclusion**

Depuis le début de notre étude, nous parlons de l'amélioration de la qualité d'énergie du réseau électrique Par DVR.

Dans ce chapitre, nous avons obtenu les résultats de la simulation de réseau pour compenser les différentes perturbations de tension par DVR. Où le DVR corrige les perturbations et améliore la tension au niveau de la ligne qui lui est connecté dans le réseau.

Là où l'adoption du régulateur PID fractionnaire ( $PI^\lambda D^\mu$ ) a été bonne pour contrôler le travail du DVR dans la correction des perturbations de tension du réseau. En plus de cela, le DVR a un rôle dans la réduction du pourcentage des harmoniques dans le réseau au maximum.



***Conclusion générale***

## **Conclusion générale**

Les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent de fournir la meilleure qualité d'énergie pour satisfaire le client et le consommateur, mais pendant son transport, il est exposé à de nombreuses perturbations par conduction qui affectent le réseau électrique et donc le consommateur.

Parmi ces perturbations, il y a un manque de tension ou une augmentation de tension, qui est causée par des facteurs climatiques, des phénomènes naturels et des restrictions environnementales, ainsi que par les matériaux qui composent les dispositifs de transport et de livraison. Cela affecte également le produit et le consommateur sur le plan économique.

Par conséquent, des solutions étaient nécessaires pour éviter ces perturbations, notamment l'introduction de dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systèmes), dans le système pour améliorer le fonctionnement des réseaux électriques. Car ils sont capables de remplir différents rôles en fonction du type de trouble survenu, tels que la correction de la tension, le contrôle du flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité du réseau électrique. Ainsi que leur vitesse de réponse, ce qui a prouvé leur capacité à amortir les vibrations électromécaniques.

Dans notre mémoire, nous avons étudié l'un des appareils FACTS, qui est le DVR (restaurateur dynamique de tension) cet appareil est connecté en série avec le réseau électrique après l'avoir modélisé et étudié tous ses composants. Ensuite, nous avons simulé cet appareil dans le programme MATLAB / SIMULINK .et ses résultats ont été positifs .Où il a corrigé la tension du réseau après avoir provoqué des perturbations dans le réseau, notamment l'augmentation et la diminution de la tension, ainsi que le déséquilibre des ondes de tension électrique .Alors que le  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire a joué un rôle déterminant dans le contrôle du DVR. Il est plus précis que le PID classique, ce qui a rendu le  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire plus efficace grâce à notre application d'une méthode de PSO (l'optimisation par essaim particulaire) .Dont les résultats mathématiques ont abouti à la précision du travail  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire dont le travail était très sensible dans le calcul et la correction du taux d'erreur du réseau. en injectant la tension compensée par l'onduleur dans le réseau, le DVR a rempli son rôle dans le système en maintenant la tension et le courant et en améliorant la qualité énergétique du réseau électrique.

## *Conclusion générale*

---

L'amélioration de la qualité de l'énergie ne s'arrête pas seulement à ce travail. Plusieurs autres méthodes mathématiques peuvent être appliquées pour améliorer le contrôle du DVR ainsi que pour changer le  $PI^\lambda D^\mu$  fractionnaire avec un  $PI^\lambda$  fractionnaire qui peut donner d'autres solutions. En plus de changer l'emplacement du DVR dans le réseau dont les résultats peuvent être meilleurs que ceux de son prédécesseur. Et l'expérience des travaux futurs pour donner de meilleurs résultats dans l'amélioration de la qualité de l'énergie et de la tension électrique

Enfin, grâce aux résultats obtenus à partir de la simulation de MATLAB / SIMULINK, le DVR est aujourd'hui l'un des meilleurs dispositifs FACTS qui contribuent à maintenir la qualité de l'énergie et à minimiser les perturbations du réseau électrique.





***Références et  
Bibliographies***

## Références et Bibliographies

---

- [1] **P.ESPEL** «Analyse de la qualité de l'énergie électrique : mesure du Flicker»,Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE),29 Avenue Roger Hennequin,78197 Trappes Cedex,France, [patrick.espel@lne.fr](mailto:patrick.espel@lne.fr)
- [2] **LAROUCI B, BENASLA L, TAHRI A, RAHLI M.** « Amélioration de l'influence des variations paramétrique sur les performances de l'UPFC » université de science et de la technologie Oran Algérie, novembre 2012.
- [3] **A.YOUSFI** «Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2008
- [4] **H. Hingorani** «Introducing custom power », IEEE spectrum, vol.32 no.6 June 1995 p 41-48.
- [5] **PHIPPS J.K, NELSON J.P, SEN P.K.** «Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems»,IEEE Transaction on Industrial Application, Vol. 30, N°02, pp. 476-454, March/April 1994
- [6] **N. Gheorghe** « Perturbations dans les réseaux électriques », Revue Polyewpert Technique N°53 2008.
- [7] **MAMMERI O.** « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un noeud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhder, Batna, 2011-2012.
- [8] **Éric Félice, Philippe Révilla.** livre «QUALITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE» © Dunod, Paris, 2009 ISBN 978-2-10-054618-3.
- [9] **V. Ignatova** « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse Doctorat. Université de Grenobl 2006.
- [10] **C. Fetha** « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [11] **B. Gattal** « Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension », Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [12] **A. Arora** « Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique », Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.
-

## Références et Bibliographies

---

- [13] **ETXEBERRIA-OTADUI I.** « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation », pp 1797-1802 0-7803-7262-X/02/\$10.00 2002 IEEE.
- [14] **B.Singh, K.Al-Haddad and A.Chandra** "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement". IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol 46, N°5, October 1999.
- [15] **H.Akagi** "Active Harmonic Filters". Proceeding of the IEEE Vol 93, N° 12, pp 2128-2141, December 2005.
- [16] [https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/266049/mod\\_resource/content/0/Power quality thesis chapter I](https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/266049/mod_resource/content/0/Power%20quality%20thesis%20chapter%20I).
- [17] **R. BENABID** «Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire Magister ; université Amar Telidji, Laghouat, 2007
- [18] **SEKHANE H.** « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS », Mémoire Magister ; université Constantine1, 2012/2013
- [19] **HAMADOU Z.** «Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique », Mémoire Magister ; université Sétif 20 juin 2012
- [20] **BENABID R.** « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire Magister ; université d' Laghouat 04/09/2007.
- [21] **Oldham, K.B., and Spanier, J.** « The Fractional calculus », Academic Press, New York, 1974.
- [22] **Samko, S.G., Kilbas, A.A., and Marichev, O.I.** « Fractional integrals and derivatives: Theory and applications», Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland, 1993.
- [23] Brin, I.A., « On the stability of certain systems with distributed and lumped parameters», Automat. Remote Control, 1962, 23:798-807
- [24] **El-Sayed, A.M.A., and Gaafar, F.M.,** «Fractional calculus and some intermediate physical processes», Applied Mathematics and Computation, 144 :117-126, 2003.
- [25] **Petras, I., Podlubny, I., O'Leary, P., Dorcak L., and Vinagre, B. M.,** «Analogue Realization of Fractional Order Controllers», Fakulta BERG, TU Kocise, 2002.
- [26] Podlubny, I., «Fractional Differential Equations», Academic Press. San Diego, 1999
-

## Références et Bibliographies

---

- [27] **I.poudlubny**, «Fractional Differential Equations», Academic Press, San Diego, USA, 1999.
- [28] **I. Petras, I. Podlubny, P. O’Leary, L. Dorcak, and B. M. Vinagre**, «Analogue Realization of Fractional Order Controllers », Fakulta Berg , TU Kosice, 2002
- [29] **A. Oustaloup**, «Systèmes asservis linéaires d’ordre fractionnaire : théorie et pratique», Editions Masson, Paris, 1983.
- [30] **A. Charef, H. Sun, Y.Y. Tsao, B. Onaral**, «Fractal System as Represented by Singularity Function», IEEE Trans. on Automatic Control, vol.37, N°9, September 1992.
- [31] **A. Charef**, «Analogue realisation of fractional order integrator, differentiator and fractional  $PI^\lambda D^\mu$  controller »,IEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 153, No. 6, 2006, pp 714-720.
- [32] **Y.BENSAFIA**, « Utilisation des filtres fractionnaires pour la conception de régulateurs adaptatives robustes », Thèse Doctorat. Université du 20Aout 1955 Skikda, 2016
- [33] **Podlubny,I.** «Fractional order systems and  $PI^\lambda D^\mu$  controllers», IEEE Transactions on automatic control, Vol. 44, No. 1, pp 208-214, 1999
- [34] **Bagley R.L., Torvik P.J.** «On the appearance of the fractional derivatives in the behavior of real materials», J. Applied Mechanics, Vol. 41, pp. 294–298, 1984.
- [35] **Bensafia Y., Ladaci S., Khettab K.** « Commande Multi-modèles du Moteur a Courant Continu », International Conference on Electronics and Oil, ICEO’2011, Ouragla, Algeria, March 2011.
- [36] **Bensafia Y., Ladaci S.** « Adaptive control with fractional order reference model », Int. J. of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, IJ-STA, Vol .5, No. 2, pp. 1614–1623, 2011.
- [37] **F.ATTOUI**, « Méthodes d’optimisation pour l’auto-réglage de contrôleur PID d’ordre fractionnaire », Mémoire de Master. Université de BADJI MOKHTAR ANNABA 2019
- [38] **Kennedy, J. and Eberhart, R.** (1995). « Particle Swarm Optimization. », In the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, pages 1942–1948, Perth
- [39] **F. Heppner and U. Grenander. A** « stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks», AAAS Publication, Washington, DC, 1990
- [40] **M.T Huynh** «Application de l’Optimisation par Essaim Particulaire à la représentation de matrice de préférence valuées» Université Libre De Bruxelles 2009.
- [41] **R Mansouri** « Contribution a l’analyse et la synthèse des systèmes d’ordre fractionnaire par la représentation d’état »thèse de Doctorat en Electrotechnique UMMTO 2008.
-

## Références et Bibliographies

---

- [42] **Clerc, M. and Kennedy, J. (2002).** The Particle Swarm : Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space. In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, volume VI, pages 58–73.
- [43] **A. ZIANE-KHODJA; M. ADLI ET ; R. ALKAMA.** «Apport d'un dvr dans laproduction d'énergie distribuee», Laboratoire de Génie Electrique de Béjaia – Algerie
- [44] **C.H. Phanindra.** « Design and Analysis of DVR and D-Statcom Multi Level Converter in Distribution System », Ravi Babu Nagulla et al Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN : 2248-9622, Vol. 3, Issue 6, Nov-Dec 2013, pp.390-397
- [45] **M.N.Tandjaoui, C.Benachaiba, O.Abdelkhalek et C.Banoudjafer** « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique d'une charge sensible par un DVR-Modélisation et simulation » Département de la Technologie, Faculté de la Technologie, Université de Béchar, Algérie, Volume 56, Number 4,2015
- [46] **P.Kumar.** « Dynamic voltage restorer for voltage quality improvement », m.e student, department of electrical engineering, national institute of technical teachers' training and research, chandigarh,, india,Vol-3 Issue-1 2017
- [47] **R.Abdessemed et M.Kadjoudj,** «Modélisation des machines électriques » , presse de l'université de Batna, 1997
- [48] **N. Bouhalli,** «Etude et intégration de convertisseurs multicellulaires parallèles entrelacés et magnétiquement couplés » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2009.
- [49] **Mr C.Said,** «Etude des stratégies de commande de l'onduleur», mémoire d'ingénieur ; université de Beskra ; 2008
- [50] **Auday Al-Mayyahil · Weiji Wang1 · Phil Birch1,** «Design of Fractional-Order Controller for Trajectory Tracking Control of a Non-holonomic Autonomous Ground Vehicle», J Control Autom Electr Syst DOI 10.1007/s40313-015-0214-2
-

### ملخص:

بالنظر إلى المشاكل والاضطرابات التي تحدث على مستوى شبكة الكهرباء والتي تؤثر على جودة الطاقة والجهد والتيار الكهربائي، فإن ذلك لا يخدم راحة العملاء والمستهلك.

كان اكتشاف أجهزة الحقائق (FACTS) هو الحل لهذه المشاكل. ومن هذه الأجهزة : DVR. الذي قمنا بدراسته في مذكرتنا هذه. حيث قمنا بإخضاعه للمصحح الكسري  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  الذي كان له الدور الاساسي و الفعال في توجيه عمل

### .DVR

في الشبكة حيث ان سرعة استجابة المصحح الكسري  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  في حساب الخطأ الناتج عن الاضطرابات و تصحيحه.

أثر بدوره على سرعة عمل DVR في الشبكة الكهربائية و تصحيح كل الاضطرابات و تعويض جهد الشبكة و تحسين

جودة الطاقة وهذا ما حصلنا عليه من نتائج إيجابية بعد محاكاة DVR و الشبكة الكهربائية في برنامج / MATLAB

SIMULINK .

### Résumé :

Compte tenu des problèmes et perturbations qui se produisent au niveau du réseau électrique, qui affectent la qualité de l'énergie, de la tension et du courant électrique, cela ne sert pas la commodité des clients et des consommateurs.

La découverte des dispositifs ( FACTS ) a été la solution à ces problèmes. un de ces dispositifs DVR que nous avons étudié dans notre mémoire soumis au correcteur fractionnaire  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ , qui avait le rôle principal et efficace de diriger le travail du DVR dans le réseau comme la vitesse de réponse du correcteur fractionnaire  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  dans le calcul de l'erreur résultant des perturbations et corrigée. À son tour, cela a affecté la vitesse de travail du DVR dans le réseau électrique, corrigé toutes les perturbations, compensé la tension du réseau et amélioré la qualité de l'énergie. C'est ce que nous avons obtenu à partir de résultats positifs après avoir simulé le DVR et le réseau dans le programme MATLAB / SIMULINK.

### **Abstract :**

In view of the problems and disturbances which occur at the level of the electricity network, which affect the quality of energy, voltage and electric current, this does not serve the convenience of customers and consumers.

The discovery of (**FACTS**) devices was the solution to these problems. one of those **DVR** devices that we studied in our note. Where we subjected it to the fractional corrector **PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>**, which had the primary and effective role in directing the work of **DVR** in the network as the response speed of the fractional corrector **PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>** in the calculation of error resulting from disturbances and corrected. In turn, it affected the speed of **DVR** work in the electrical network, corrected all disturbances, compensated for the network voltage and improved energy quality. This is what we obtained from positive results after simulating the **DVR** and the network in the **MATLAB / SIMULINK** program.

---