



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Réseau électrique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Latif saida**

Le : dimanche 24 juin 2018

## **Analyse et amélioration de la stabilité statique d'un réseau électrique en présence d'une source photovoltaïque**

---

### **Jury :**

Mme Tkouti Nacira	MAA	Université d'appartenance	Président
Dr Salhi Ahmed	MCB	Université d'appartenance	Examineur
Dr Naimi Djemai	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : 2017 - 2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière: Electrotechnique  
Option: Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Analyse et amélioration de la stabilité statique en  
présence d'une source photovoltaïque**

**Présenté par :**

Latif Saida

**Avis favorable de l'encadreur :**

MAA. Naimi Djemai

**Avis favorable du Président du Jury**

Mme. TKOUTI Nacira

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière: Electrotechnique  
Option: Réseaux électrique

## *Thème :*

# Analyse et amélioration de la stabilité statique en présence d'une source photovoltaïque

Proposé et Dirigé par : **Dr. Naimi Djemai**

## RESUMES (Français et Arabe)

### Résumé

Le recours aux énergies renouvelables dans le domaine de la production d'électricité est devenu une obligation vu la croissance de la demande d'énergie et l'échauffement du globe terrestre. Ce mémoire traite l'impact de l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique se basant particulièrement sur la stabilité statique, le réseau électrique (IEEE30JB) a été pris comme modèle d'étude d'application de ce travail. L'introduction du dispositif de l'électronique de puissance (FACTS) a permis l'amélioration le taux de l'intégration des sources photovoltaïques dans le réseau électrique conventionnel. On utilise un logiciel adéquat dit PSAT ou plusieurs comparaisons ont été établies montrant ainsi l'efficacité de cette étude.

**Mot clés:** Energie photovoltaïque, intégration, Stabilité statique, réseau électrique, FACTS, CPF (écoulement de puissance continu)

### ملخص:

إن اللجوء إلى الطاقات المتجددة في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية أصبح حتمية نظرا لتزايد الطلب على الطاقة و ارتفاع حرارة كوكب الأرض، هذه المذكرة تدرس تأثير إدماج الطاقة الكهروضوئية في مع التركيز بصفة خاصة على الاستقرار الساكن، لتطبيق ذلك اخترنا الشبكة الكهربائية (IEEE30JB) كنموذج لدراسة تطبيق هذه الدراسة. يسمح إدخال FACTS بتحسين ملف الجهد من الحساب المستمر لتدفق الطاقة في شبكة الطاقة التقليدية.

**كلمات مفتاحية :** طاقة الكهروضوئية، الاستقرار الساكن، CPF (تدفق الطاقة المستمر)، FACTS، شبكة كهربائية.

# Remerciement

*Mes remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la  
santé, et la  
patience, qu'il ma données durant toutes ces années d'étude.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur  
NAIMI*

*DJEMAI pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long  
de la  
réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et  
remarques.*

*Mes remerciements particuliers s'adressent au professeur BEHRI et au docteur  
SALHI pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptons d'être les  
membres de jury de ma soutenance.*

*Je remercie également tous les enseignants de l'institut  
d'électrotechnique de l'université de Biskra qui ont participé à ma  
formation pendant tout le cycle universitaire et un remerciement spéciale au  
directeur de l'GEB*

*En fin, je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidée à  
élaborer et réaliser ce mémoire.*

*Latif Saïda*



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail:*

*A ma très chère mère pour sa patience, sa  
tendresse et son Affection.*

*A mon père pour ses conseils et sa présence.*

*A mes très chères frères : Farid, Waheb, Rezek et  
Karim.*

*A mon très chères sœurs : Hasna, Horiya, Hanen et  
Zoubida.*

*A ma grande famille : Latif et Souici.*

*Et à tous mes Amis surtout mes fleurs : Fadoua,  
Souraya, Ahlem, Maïssa, Sihem et Sabeih*

*Latif Saïda*

# LISTE DE FIGURES

Figure	page
<b>Fig. I.1.</b> : Spectre du rayonnement solaire.....	6
<b>Fig. I.2</b> : Schéma d'une cellule élémentaire.....	7
<b>Fig.I.3:</b> dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si).....	8
<b>Fig.I.4</b> : Schéma de différents types de modules photovoltaïques.....	9
<b>Fig.I.5:</b> cellule monocristalline.....	9
<b>Fig. I.6:</b> cellule poly cristalline.....	10
<b>Fig.I.7:</b> cellule amorphe .....	10
<b>Fig. I.8:</b> Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
<b>Fig.I.9:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	12
<b>Fig.I.10.</b> Constituants d'un système photovoltaïque.....	13
<b>Fig. I.11:</b> Module photovoltaïque.....	13
<b>Fig.I.12</b> : Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	14
<b>Fig.I.13</b> : Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en parallèle.....	14
<b>Fig .I.14</b> : Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en série.....	15
<b>Fig I.15.</b> Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en série.....	15
<b>Fig.I.16</b> : Caractéristique courant tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des cellules.....	16
<b>Fig. I.17</b> : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.....	16
<b>Fig. I.18:</b> schéma montrant l'orientation Sud-est ou Sud-ouest.....	17
<b>Fig. I.19:</b> Disque solaire photovoltaïque.....	18
<b>Fig.I.20</b> : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	19
<b>Fig.I.21</b> : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	20
<b>Fig.I.22</b> : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	20
<b>Fig. I.23</b> : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction.....	21
<b>Fig.I.24</b> : Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	22
<b>Fig.I.25:</b> Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau.....	22
<b>Fig.I.26</b> : Coût de production de l'électricité solaire en Europe .....	23
<b>Fig.II.1:</b> Classification des types de stabilité des réseau électriques.....	28

<b>Fig.II.2:</b> Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas prédicteur obtenu par les moyens de tangent .....	31
<b>Fig II.3:</b> Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens d'intersection perpendiculaire.....	32
<b>Fig. II4:</b> Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas correcteur obtenu par les moyens de la paramétrisation locale.....	33
<b>Fig.II.5:</b> Les méthodes d'amélioration de la stabilité.....	33
<b>Fig.II.6:</b> classification des dispositifs FACTS.....	36
<b>Fig II.7:</b> Schéma d'une branche de SVC .....	40
<b>Fig.II.8 :</b> Caractéristique d'un SVC.....	40
<b>Fig.II.9:</b> Schéma de base du STATCOM.....	41
<b>Fig.II.10:</b> Diagramme vectoriel du STATCOM.....	42
<b>Fig.II.11:</b> Caractéristique du STATCOM.....	43
<b>Fig. II.12:</b> Caractéristique tension courant V-I a. STATCOM b. SVC .....	43
<b>Fig. II.13:</b> Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.....	44
<b>Fig.III.1:</b> Page d'accueil du PSAT.....	49
<b>Fig. III.2:</b> Bibliothèque de Simulink.....	49
<b>Fig.III.3:</b> Caractéristique du Modèle d'étude 30JB.....	50
<b>Fig.III.4:</b> profil de tension à l'état initiale.....	52
<b>Fig.III.5:</b> Caractéristique du Modèle d'étude 30JB sans les blocks de générateur.....	53
<b>Fig. III.6 :</b> La modification du paramètre de CPF.....	53
<b>Fig.III.7 :</b> Profile de Variation des modules de tension entre Vint et VCPF de chaque JB...55	55
<b>Fig.III.8 :</b> Coefficient de surcharge maximale.....	56
<b>Fig.III.9:</b> Coefficient de surcharge maximale.....	56
<b>Fig.III.10:</b> profile de JB sensibles par la méthode CPF.....	57
<b>Fig.III.11:</b> Les étapes de l'emplacement du compensateur SVC/STATCOM.....	58

<b>Fig.III.12 :</b> Variation de facteur de charge sans compensation et avec compensation (SVC /STATCOM) au niveau de JB sensible.....	59
<b>Fig.III.13 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19.....	60
<b>Fig.III.14 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23.....	60
<b>Fig.III.15 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24.....	61
<b>Fig.III.16 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25.....	61
<b>Fig.III.17 :</b> Coefficient de surcharge maximale JB N°25.....	62
<b>Fig.III.18 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°26.....	62
<b>Fig.III.19 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°29.....	63
<b>Fig.III.20 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°30.....	63
<b>Fig.III.21 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19.....	64
<b>Fig.III.22 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23.....	64
<b>Fig.III.23 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24.....	65
<b>Fig.III.24 :</b> Coefficient de surcharge maximale JB N°24.....	65
<b>Fig.III.25 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25.....	66
<b>Fig.III.26 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°26.....	66



<b>Fig.III.27 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°29.....	67
<b>Fig.III.28 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°30.....	67
<b>Fig.III.29 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24(meilleure emplacement de STATCOM).....	68
<b>Fig.III.30 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25(meilleure emplacement de SVC).....	68
<b>Fig.III.31 :</b> Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25( $\lambda_{\max\_SVC}=\lambda_{\max\_STATCOM}$ ).....	69
<b>Fig.III.32 :</b> profil de la variation des pertes active entre l'état de sans compensation et avec compensation.....	70
<b>Fig.VI.1:</b> Page d'accueil du PSAT et leur bibliothèque de Simulink.....	7
<b>Fig.IV.2 :</b> Intégration un photovoltaïque dans le réseau de 30JB.....	
<b>Fig.VI.3 :</b> L'emplacement de générateur photovoltaïque au JB de générateur le JB08.....	75
<b>Fig.IV.4 :</b> Changement du paramètre de génératrice PV.....	
<b>Fig.VI.5 :</b> le signe de programme MATPOWER.....	

# *LISTE DE TABLEAUX*

<b>Tableau I.1 :</b> Rendement des différentes technologies photovoltaïques.....	11
<b>Tableau I.2 :</b> Différents types de montages d'un module photovoltaïque.....	16
<b>Tableau II.1 :</b> Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau.....	45
<b>Tableau III.1:</b> Données techniques du modèle d'étude.....	50
<b>Tableau III.2 :</b> Résultats de l'écoulement de puissance.....	51
<b>Tableau III.3 :</b> la variation de module de tension entre l etat initiale et l analyse par CPF...	54
<b>Tableau III.4:</b> Résultats de l'écoulement de puissance continue (CPF).....	57
<b>Tableau III.5 :</b> le facteur de charge maximale pour le cas de compensation avec le SVC ou le STATCOM.....	59
<b>Tableau .III.6 :</b> Les pertes active et réactive total pour défirent emplacement de un seul SVC ou un seul STATCOM.....	69

## Liste des acronymes

<b>IEEE</b>	<b>Institut des Ingénieurs en Électricité et en Électronique</b>
<b>p.u</b>	Système de valeur relative (Per unit)
<b>CPF</b>	Calcul Continu de l'écoulement de puissance
<b>MW</b>	Mégawatts
<b>PSAT</b>	Power System Analysis Toolbox
<b>AC</b>	Alternative Current (Courant alternatif)
$\Delta V$	Différence de tension
<b>FACTS</b>	Flexible Alternating Current Transmission System
<b>SVC</b>	Compensateur statique de puissance réactive
<b>STATCOM</b>	Compensateur Statique Synchrone
<b>JB</b>	jeu de barre
<b>Pgen</b>	la puissance active générée
<b>Qgen</b>	la puissance réactive générée
$\lambda \text{ max}$	Le facteur de charge maximal
$V_{\text{init}}$	Le module de tension à l'état initial
$V_{\text{CPF}}$	Le module de tension après le calcul continu de l'écoulement de puissance continu « CPF »
$V_{\text{SVC}}$	Le module de tension après l'intégration de SVC
$V_{\text{STATCOM}}$	Le module de tension après l'intégration de STATCOM
<b>GTO</b>	Gate Turn Off

# Table de matière

Titres	Page
Remerciement.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des acronymes.....	VI
Sommaire.....	V
INTRODUCTION GENERAL.....	1

## Chapitre I

### \*\*\*Généralité sur le système photovoltaïque\*\*\*

Introduction.....	4
I.1.Description des éléments d'un système photovoltaïque.....	4
I.1.1.Le système solaire photovoltaïque.....	4
I.1.1.1.Historique.....	4
I.1.1.2. Définition .....	4
I.1.1.3. Secteurs d'application .....	5
I.3.Effet photovoltaïque.....	5
I.3.1.Définition.....	5
I.3.2.Cellule photovoltaïque.....	6
I.3.2.1. Constitution de la cellule photovoltaïque.....	6
I.3.2.2.Semi-conducteurs .....	7
I.3.2.3.Jonction N-P.....	7

I.3.2.4. Technologies des cellules photovoltaïques.....	9
I.3.2.4.1. Silicium monocristallin.....	9
I.3.2.4.2. Silicium poly cristallin.....	9
I.3.2.4.3. Silicium amorphe (a-si).....	10
I.3.2.5 .Principe de fonctionnement .....	11
I.3.2.6. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	12
I.4. Composants d'un système photovoltaïque .....	12
I.4.1. Module photovoltaïque.....	13
I.4.1.1. Association en sérié et parallèle des cellules PV.....	14
I.4.2. Champ photovoltaïque.....	16
I.4.3. Batteries .....	17
I.4.4. Le régulateur .....	17
I.4.5. Onduleur .....	17
I.5. Orientation et inclinaison. ....	17
I.6. Caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	18
I.6.1. Caractéristiques électriques d'une cellule.....	19
I.6.2. Influence de l'éclairement .....	19
I.6.3. Influence de la température .....	20
I.7. Les systèmes photovoltaïques .....	21
I.7.1. L'isolé.....	21
I.7.2. Le connecté au réseau .....	22
I.8. Evolution mondiale du marché PV.....	23
I.9. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV.....	23
I.9.1. Avantages.....	23
I.9.2. Inconvénients.....	24
Conclusion.....	24



# Chapitre II

## \*\*\* Analyse de la stabilité statique\*\*\*

Introduction .....	26
II. 1. Stabilité des réseaux.....	26
II.1.1. Définition.....	26
II.1. 2. Types de stabilité.....	26
II. 1. 2. 1 Stabilité statique.....	26
II. 1. 2. 2. Stabilité dynamique.....	27
II. 1. 2.3. Stabilité transitoire.....	27
II.1.3. Classification du problème de stabilité.....	28
II.2.Analyse de la stabilité de tension.....	28
II.2.1.Marge de charge (loading margin).....	29
II.2.2.Ecoulement de puissance en continu (Continuation Power Flow).....	29
II.3. Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité.....	33
II.4.Amélioration de la stabilité par FACTS.....	34
II.4.1. Dispositifs FACTS.....	34
II.4.2.Rôle des dispositifs FACTS.....	34
II.4.3. Classification des dispositifs FACTS.....	35
II. 4.4.1. Compensateurs parallèle.....	36
II. 5.4.1.1. Compensateurs parallèle à base de thyristors.....	36
II. 5.4.1.2. Compensateurs parallèle à base de thyristors GTO .....	37
II.4.4.2. Compensateur série .....	37
II. 4.4.2.1. Compensateurs série à base de thyristor.....	38
II. 4.4.2.2.Compensateurs sérient à base de thyristors GTO .....	38
II.4.4. 3.Compensateurs hybrides série – parallèle .....	38
II.4. 4.3.1.Compensateurs hybrides à base de thyristors .....	38
II.4.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO .....	38
II.4.5- SVC (Static Var Compensator).....	39
II.4.5.1.Principe de fonctionnement du SVC .....	40
II.4.6.Dispositifs parallèles à base de GTO thyristors.....	41

II.4.7 Comparaison entre le SVC et le STATCOM.....	43
II.5. Application des FACTS.....	44
II.6. Avantages et Inconvénients de la Technologie des Dispositifs FACTS.....	45
Conclusion .....	46



## *Chapitre III*

### **\*\*\*Amélioration de la stabilité statique par les FACTS\*\*\***

Introduction.....	48
III.1. Etude de la stabilité statique du modèle de 30 jeux de barre par PSAT.....	48
III.1.1. Le Power System Analyses Toolbox (PSAT).....	48
III.1.1.2 Réseaux d'études .....	50
III.1.1.3 IEEE 30 Jeu de barre.....	50
III.2 Analyse de réseau de modèle 30JB .....	50
III.2.1 état initiale.....	51
III.2.2 Méthode d analyses .....	52
III.2.3 Analyse de réseau avec la méthode de CPF.....	53
III.2.4 L objectif principal de l'analyse par la méthode CPF.....	54
III.2.5 Comparaison et interprétation.....	56
III.3. Analyse par la compensation FACTS.....	58
III.3.1. Choix optimal de l'emplacement du SVC/ STATCOM.....	58
III.3.2. Etude comparative entre le SVC et le STATCOM.....	68
III.4. Discussions des résultats.....	70
Conclusion.....	71



# Chapitre IV

## **\*\*\*L'impact de l'intégration d'une source photovoltaïque sur la stabilité statique\*\*\***

Introduction .....	73
IV.1 Le besoin de l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le Réseau électrique.....	73
IV.2 Les avantages d'intégration des sources d'énergie renouvelable.....	73
IV.3 Les inconvénients d'intégration des sources d'énergie renouvelable.....	73
VI.4.Méthode d'analyse.....	74
IV.5. Influence du lieu d'une source photovoltaïque.....	75
IV.5.1.Discussions au résultat.....	76
VI.6.Les résultats obtenus .....	77
VI.6.1.Qu'est-ce que le MATPOWER [ZIM 11].....	78
Conclusion.....	78
Conclusion générale.....	81





*Introduction*

*générale*

# Introduction générale

---

Actuellement, La demande excessive de la puissance électrique exige le recours aux énergies renouvelable mais l'intégration de ces énergies dans le réseau électrique conventionnel cause plusieurs problème essentiellement celui de la stabilité.

Dans un réseau, nous avons souvent des défauts. Le défaut majeur, c'est la surcharge d'une façon continue et non brusque. En effet c'est ce qu'on appelle la stabilité statique ou l'augmentation graduellement de la charge. Ce cas de figure présente quand même un grand problème lorsque la charge augmente, nous aurons un appelle très important de la puissance. Étant donné que notre réseau a une capacité bien précise pour répondre aux nouveaux besoins énergétiques, il sera donc saturé. Quelle est donc la limite de notre réseau, c'est à dire quelle est sa surcharge maximale lui permettant d'alimenter sans perdre sa stabilité ?

Pour ce faire, nous allons se baser dans ce cas, sur le profil de tension, donc on va utiliser le calcule continue de l'écoulement de puissance, c'est un domaine très important et très vaste qui a ses propres stratégies lui-même et des méthodes mathématiques, bien sur on doit utiliser le logicielle PSAT pour pouvoir calculer la limite de surcharge.

Devant cette situation on peut améliorer notre réseau à l'aide dispositif de l'électronique de puissance représentée par les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Les dispositifs FACTS font en général appel à l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance, et augmentent la capacité de transfère de la puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique.

Ensuite Dans ce mémoire, nous allons analyser l'impact de l'intégration de photovoltaïque sur la stabilité statique du réseau électrique ou nous chercherons le coefficient de surcharge maximale que le réseau peut fournir sans perdre sa stabilité.

Cette étude est élaborée sous le logiciel PSAT suite à sa riche bibliothèque contenant les photovoltaïque et les FACTS. Pour ce faire ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la description de photovoltaïque, son historique, sa structure et sa modélisation et bien sur leur principe de fonctionnement

# Introduction générale

---

Par contre le second chapitre traitera une petite étude sur la stabilité de réseau électrique, ses types et on consacrera sur la stabilité statique puis on a étudié les dispositifs FACTS leur classification et ses applications

Le chapitre trois présentera les résultats des simulations lors de l'effondrement de tension. Ces tests concernent l'impact des dispositifs FACTS sur le phénomène de l'effondrement de tension en utilisant la technique du calcul continu de l'écoulement de puissance (CPF). Nous utiliserons pour cela le réseau de transport IEEE 30 jeux de barre.

Le dernier chapitre a pour l'intégration d'une source photovoltaïque dans le réseau conventionnel tout en se basant particulièrement sur la stabilité statique

Enfin, Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale où nous concentrerons sur les résultats et les perspectives de cette étude.

# *Chapitre I*



## **Introduction**

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les notions de base du système photovoltaïque.

### **I.1.Description des éléments d'un système photovoltaïque**

#### **I.1.1.Le système solaire photovoltaïque**

##### **I.1.1.1.Historique**

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais, jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. [FLE 07]

##### **I.1.1.2. Définition**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie produite par conversion des rayons solaires en électricité grâce aux cellules photopiles. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un panneau solaire (module) photovoltaïque. Plusieurs

modules quant à eux regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque.

### I.1.1.3. Secteurs d'application

**Domaine spatial** : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes...) remontent aux années soixante.

**Télécommunications** : Téléphonie rurale, radiotéléphonie...

**Sites isolés** : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, électrification des régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages...

**Acquisition de données** : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vues la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

**Domaine du transport** : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire [LAS 13].

**Protection cathodique** : pour protéger les pipes de transport des hydrocarbures (gaz, pétrole) contre la corrosion

## I.2.Effet photovoltaïque

### I.2.1.Définition

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$  qui répond, elle-même, à la relation suivante [MES 06]

$$E_{ph}=h*(c/\lambda) \quad (I.1)$$

D'après la relation (I.1), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que la montre la figure (I.1), [SIN 10]. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère

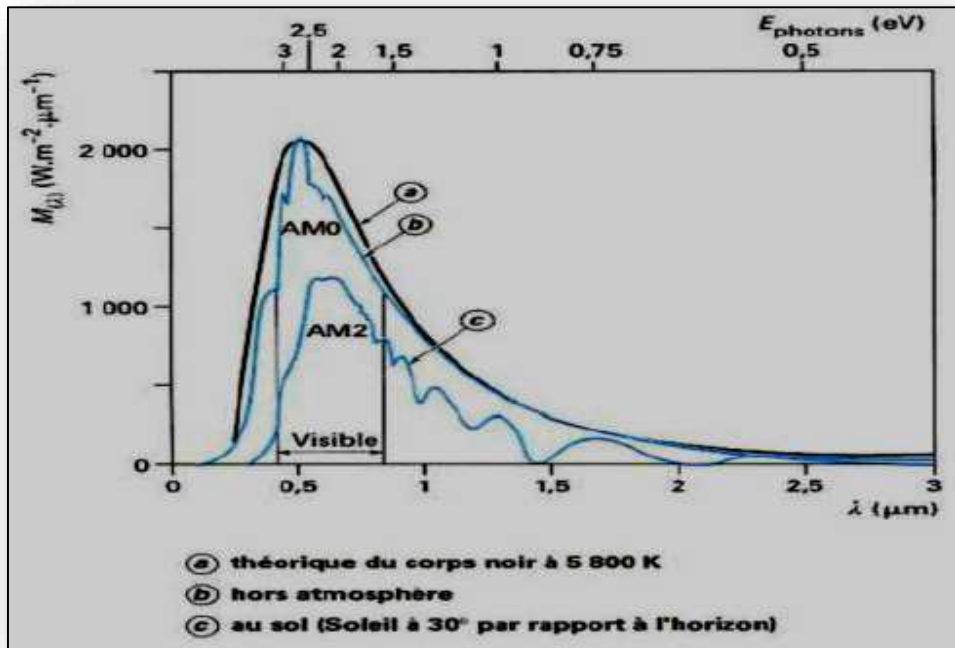


Fig. I.1. : Spectre du rayonnement solaire

## I.2.2. Cellule photovoltaïque

### I.2.2.1. Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.1). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [PAN 04]

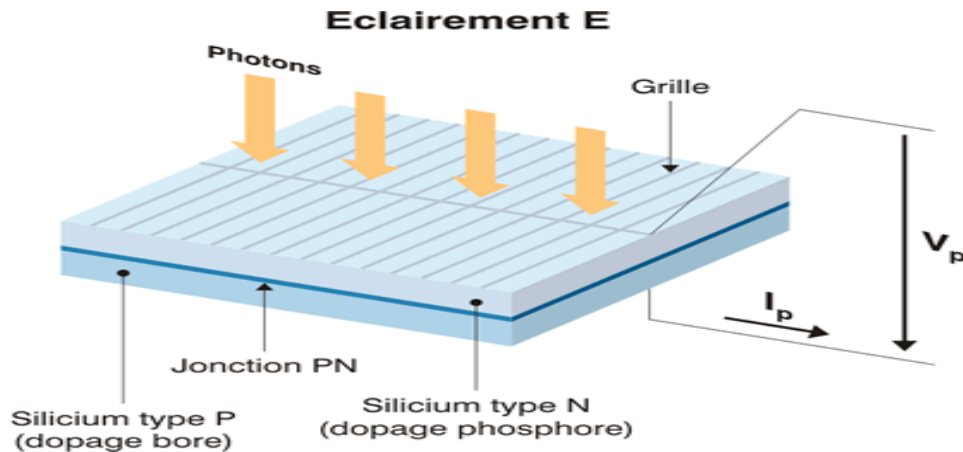


Fig. I.2 : Schéma d'une cellule élémentaire [sit2]

### I.2.2.2.Semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a **1.45\*** paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [MOU 05].

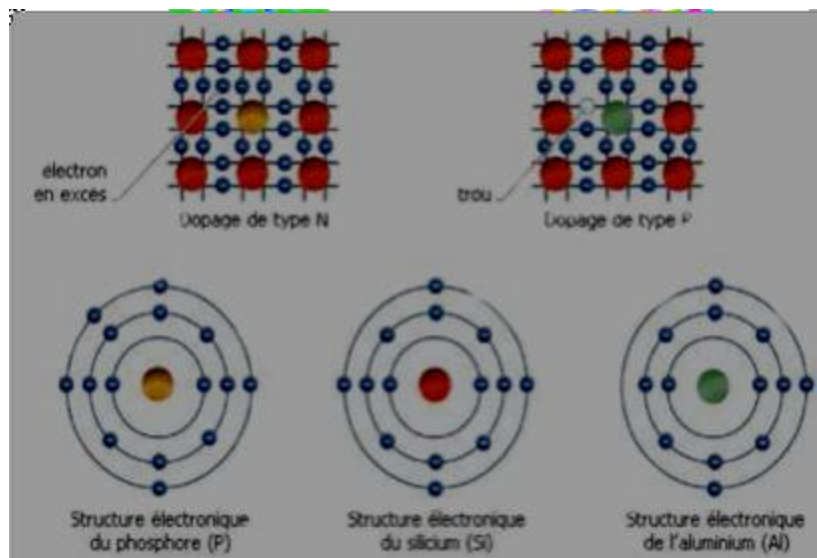
### I.2.2.3.Jonction N-P :

La jonction **N-P** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **N** et l'autre dopée **P**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.



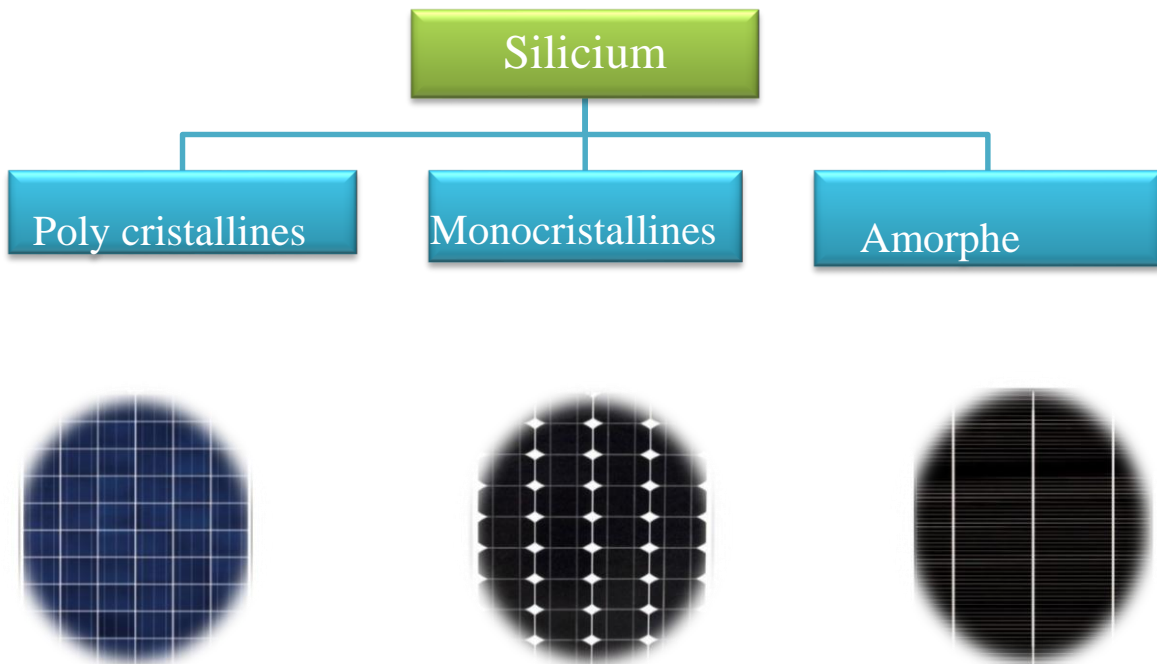
Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région **N** au pôle négatif d'un générateur et la région **P** au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région **N**, ainsi que les trous libres de la région **P**, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région **P** et les trous dans la région **N**. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-) s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **N-P** joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombinier avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps  $t$  appelé durée de vie des porteurs minoritaires [BEN 09].



**Fig.I.3:** *dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [sit3].*

#### I.2.2.4. Technologies des cellules photovoltaïques.



**Fig. I.4 :** Schéma de différents types de modules photovoltaïques

##### I.2.2.4.1. Silicium monocristallin

Un matériau de silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « Cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple sans aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

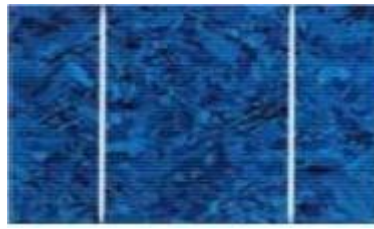


**Fig.I.5:** cellule monocristalline

##### I.2.2.4.2 Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin.

Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modelé commercial s'étend entre 11 et 15%.



**Fig. I.6:** cellule poly cristalline

#### **I.2.2.4.3. Silicium amorphe (a-si)**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [ABA 11].



**Fig.I.7:** cellule amorphe [ABA 11].

Pour fabriquer les cellules photovoltaïques qui sont les éléments de base du module photovoltaïque, on utilise des matériaux semi-conducteurs : le silicium est le plus utilisé jusqu'à aujourd'hui. Il s'agit du cristal semi-conducteur responsable de l'apparition du courant électrique. Selon son mode de production, la cellule photovoltaïque peut être constituée d'un cristal unique (monocristallin) ou de plusieurs cristaux plus petits (poly «cristallin»). Outre ces deux technologies, on utilise du silicium amorphe. Le tableau 2.1 nous montre les rendements des différentes technologies photovoltaïques précitées.

Tableau I.1 : Rendement des différentes technologies photovoltaïques. [sit1]

Technologies	Rendement réel (%)	Rendement théorique (%)	Production
Cellules monocristallines	12 – 19,9	23	Elevée
Cellules Poly cristallines	11 – 13	18	Moyenne
Modules PV amorphe	6 – 10	12	Basse

### I.2.3. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [SAA 10]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (I.8) ci-dessous.

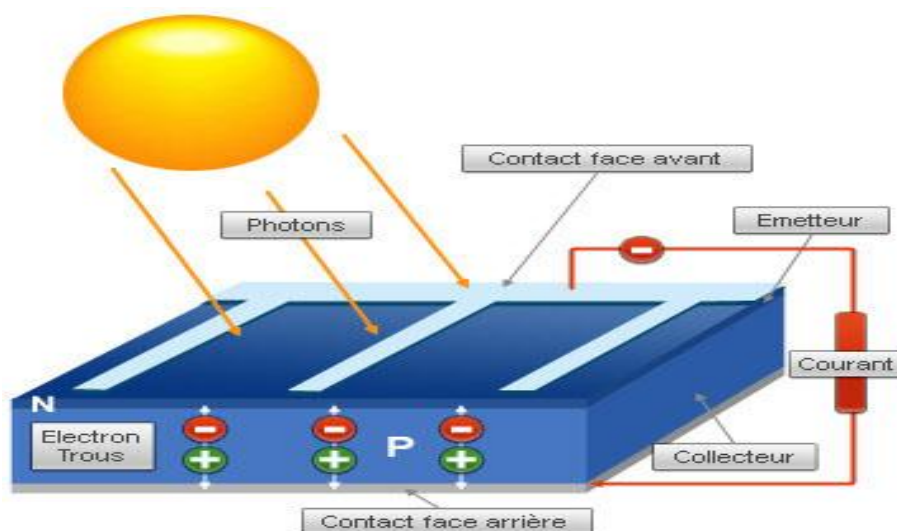
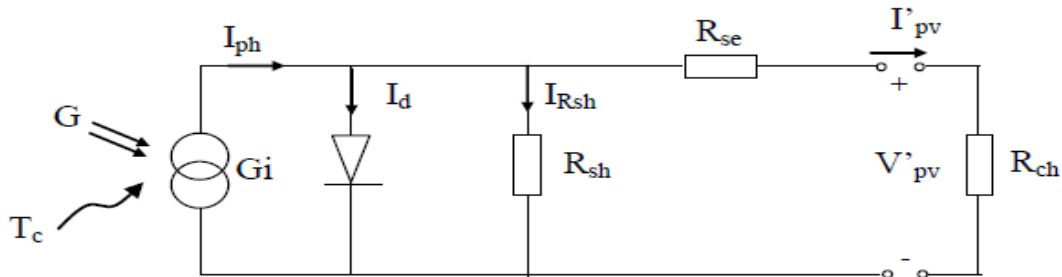


Fig. I.8: Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.2.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dû à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances [LAL 09], [NIS 03].



**Fig.I.9:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [LAL 09], [NIS 03]. .

Avec :

$G_i$  : Source de courant parfaite.

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_{se}$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

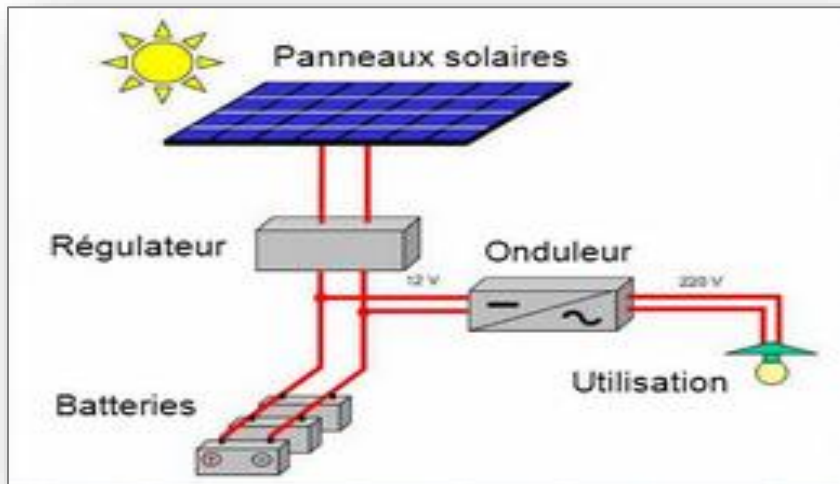
$D$  : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

$R_{ch}$  : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

### I.3.Composants d'un système photovoltaïque

Le système photovoltaïque de notre projet comprend :

- ❖ le module photovoltaïque.
- ❖ les batteries solaires.
- ❖ le régulateur.
- ❖ l'onduleur.

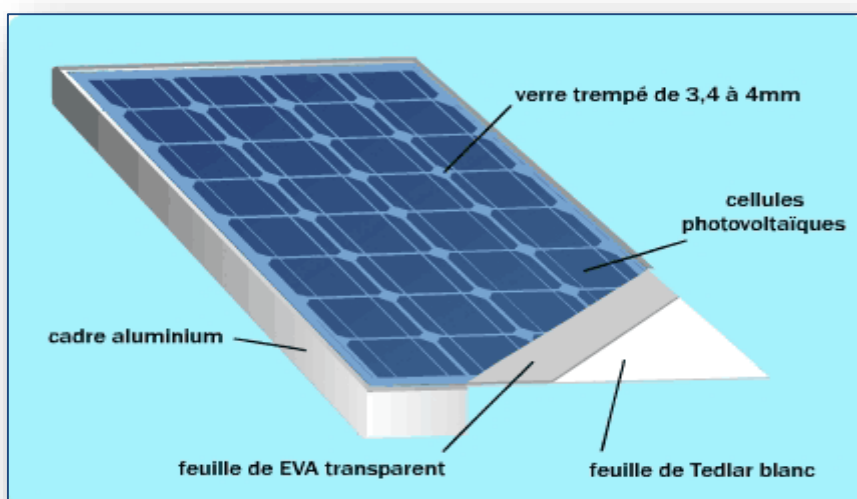


**Fig.I.10.** Constituants d'un système photovoltaïque

### I.3.1. Module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [LAB 06].



**Fig. I.11:** Module photovoltaïque. [sit4]

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), polycristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 Wc (Watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [SEO].

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

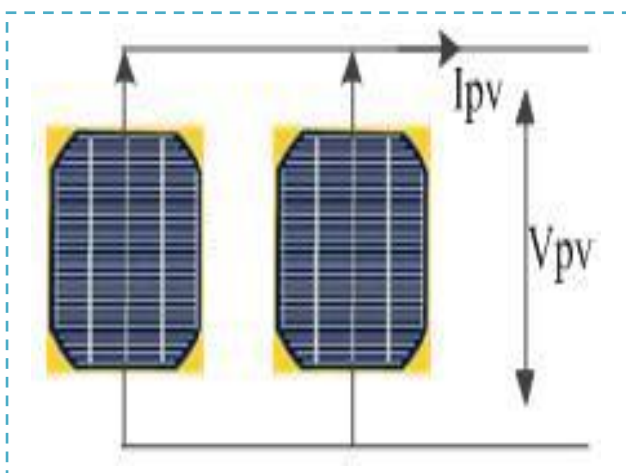
### I.3.1.1.Association en sérié et parallèle des cellules PV

#### A / Association en parallèle

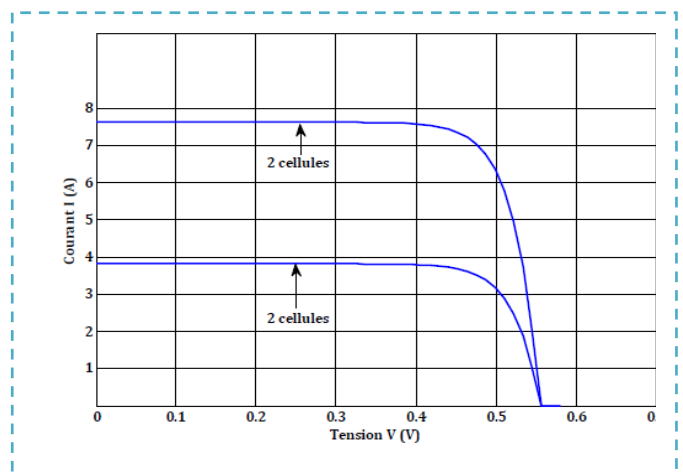
Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure (2.7) montre les caractéristiques résultantes

( $I_{PCC}$ ,  $V_{PCO}$ ) obtenues en associant en parallèle (indice  $p$ )  $Np$  cellules identiques:

$$I_{PCC} = N P * I_{CC} \text{ et } V_{PCO} = V_{CO} \text{ [LAS 13].}$$



**Fig.I.12.** Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en parallèle.

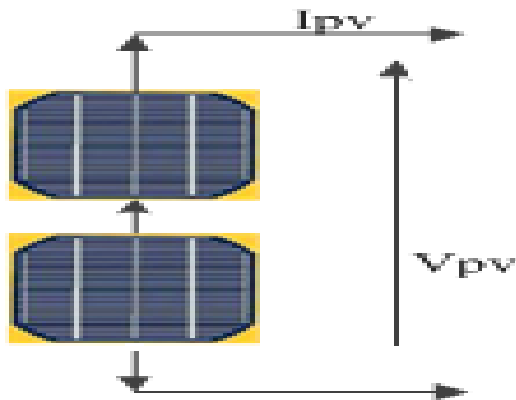


**Fig.I.13.** Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en parallèle.

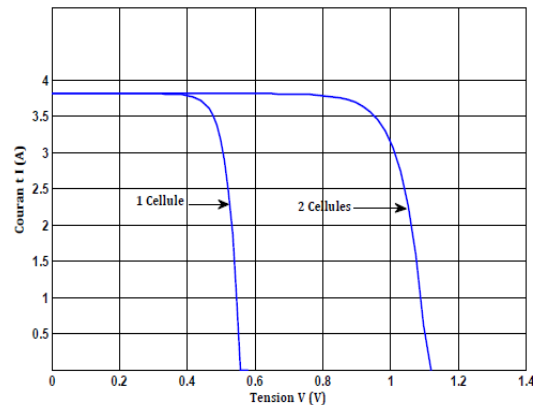
### B / Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (2.9) montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sco}$ ) obtenue en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) :

$$I_{scc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = N_s * V_{co} \text{ [LAS 13].}$$



**Fig I.14.** Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en série.

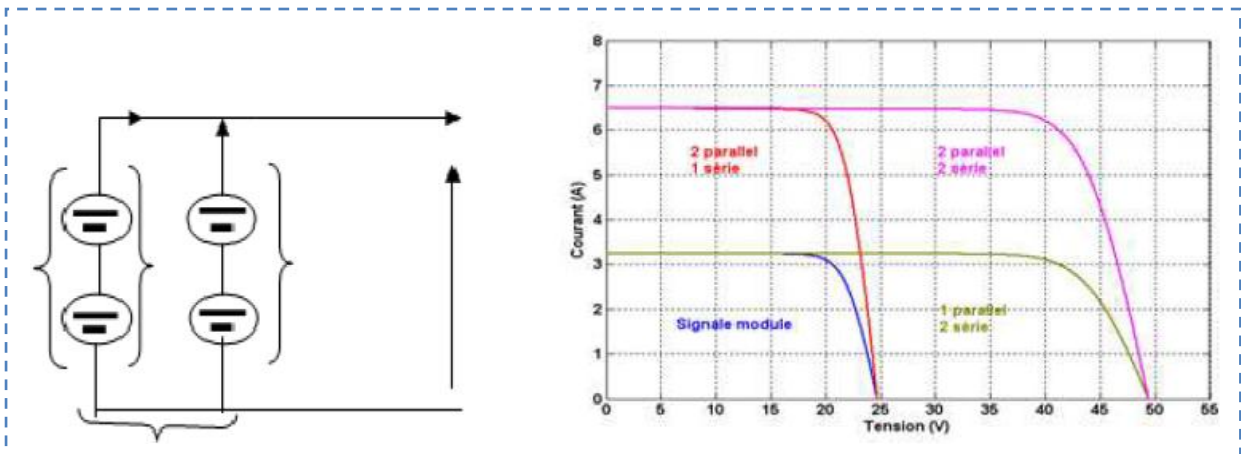


**Fig I.15.** Caractéristique I-V de deux(2) cellules PV raccordées en série.

### C / Association mixte (en série et en parallèle)

C'est le branchement qui s'impose lorsqu'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue (en volts, V), les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte. Il convient d'avoir des produits de même tension et de même intensité/capacité. Un ensemble monté en série s'appelle un "string", il est possible d'ajouter des panneaux de mêmes tensions dans les strings pour augmenter la tension (en volts, V). Ou alors d'ajouter un ou plusieurs strings si vous avez besoin de plus d'intensité pour plus de puissance. [sit5].





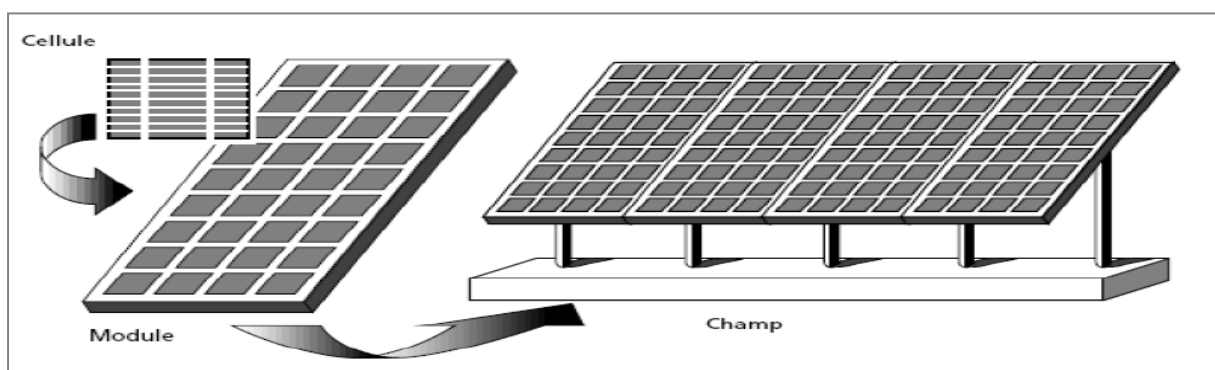
**Fig.I.16** : Caractéristique courant tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des cellules [HAD 11]

**Tableau I.2** : Différents types de montages d'un module photovoltaïque. [AAE]

<b>En série</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les tensions s'ajoutent :</li> <li>○ Le courant reste celui d'un module</li> </ul>
<b>En parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ La tension reste constante :</li> <li>○ Les courants de chaque module s'ajoutent</li> </ul>
<b>En série /parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pour obtenir la tension et le courant (donc la puissance) souhaités</li> </ul>

### I.3.2. Champ photovoltaïque

Le champ solaire ou (panneau solaire) se compose de modules photovoltaïques (Voir figure I.16) interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [BER 06].



**Fig. I.17** : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques [ROY 98].

### I.3.3. Batteries

Les caractéristiques de l'énergie produite par les modules photovoltaïques selon le type d'installation peuvent nécessiter un organe de stockage de cette énergie : la batterie, qui est un composant électrochimique encapsulé dans une bague scellée munie d'un bouchon de remplissage et d'un évaut. Elle sert à stocker l'énergie produite par le champ surtout lorsque le système n'est pas direct. Le décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite donc un stockage d'énergie électrique.

### I.3.4. Le régulateur

Le régulateur solaire ou contrôleur de charge mesure en permanence la tension de la batterie et gère l'apport de courant des panneaux solaires PV.

Le rôle du régulateur dans une installation solaire PV est très important car le niveau de charge des batteries solaires (dites batteries à décharge lente) ne doit être ni trop bas (pas en dessous de 50%) ni trop haut (ne pas dépasser 95%). Des charges trop faibles ou trop importantes non régulées détériorent les batteries.

### I.3.5. Onduleur

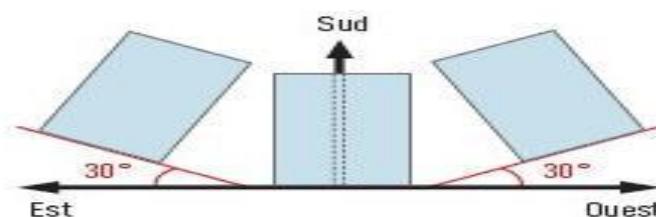
Pour alimenter en énergie électrique alternative il faut interposer un convertisseur statique entre les batteries et la charge : l'onduleur convertit l'énergie continue reçue (soit directement des panneaux, soit à partir du régulateur) en énergie électrique alternative pour alimenter les récepteurs qui sont soit en 230 V ou 400 V, 50Hz du système [DAH 07].

## I.4. Orientation et inclinaison.

Les modules photovoltaïques ne doivent pas être installés n'importe où et n'importe comment. Pour ce faire, afin qu'ils puissent produire le maximum d'électricité, leur orientation et leur inclinaison doivent être choisies avec soin.

### ➤ Orientation

L'orientation des modules dépend de l'hémisphère. On conseille une orientation plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. La figure (I.17) en est une illustration d'orientation de modules photovoltaïques.



**Fig. I.18:** schéma montrant l'orientation Sud-est ou Sud-ouest [GER 02].

### ➤ Inclinaison.

L'inclinaison des modules quant à elle dépendra de notre utilisation. Pour ce faire, un disque solaire (cercle solaire photovoltaïque) permet de déterminer l'orientation optimale pour la production photovoltaïque [GER 02]. Ce disque est composé d'un petit cercle au centre qui correspond à une inclinaison de  $10^\circ$  autour duquel gravitent neuf (9) autres cercles, représentant chacun une inclinaison différente. Le centre de ce premier cercle correspondant est de  $0^\circ$  (les plaques solaires strictement parallèles à l'horizontale). Le dernier cercle de  $90^\circ$  correspond à un mur complètement vertical. On distingue autour de ces 9 cercles des orientations (Sud, Ouest, Est et Nord) toutes graduées de degrés par rapport au sud. Le sud, lui, est toujours fixé à  $0^\circ$ , l'Est à  $-90^\circ$  et l'Ouest à  $+90^\circ$ . Les couleurs jaunes correspondent à une efficacité par rapport à l'optimum solaire photovoltaïque. Plus la couleur se rapproche du jaune, plus l'efficacité est optimale. En revanche, plus elle se rapproche du bleu, moins celle-ci est bonne. On s'aperçoit grâce à cette échelle de couleur qu'à peu près la moitié de toutes les orientations et inclinaisons est exploitable dans de bonnes conditions. Cf. La figure (I.18)

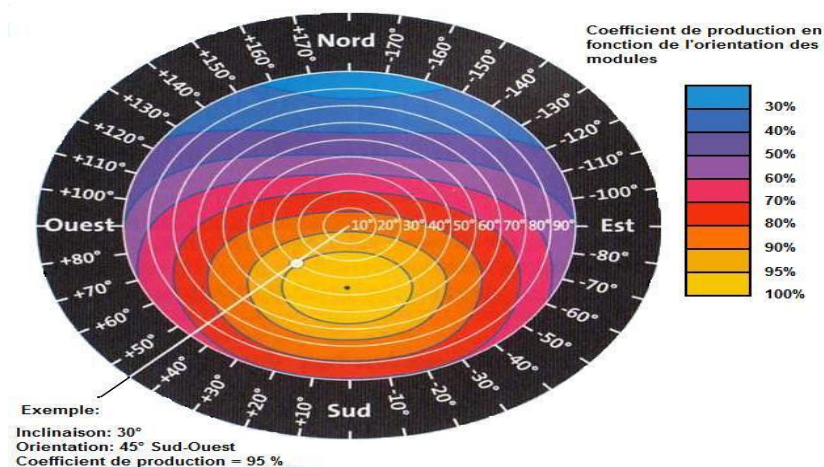


Fig. I.19: Disque solaire photovoltaïque

### I.5. Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), avec les caractéristiques suivantes: [MEF 12]

- ✓ **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).

- ✓ **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ✓ **Tension à vide,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage "plein soleil".
- ✓ **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage "plein soleil".
- ✓ **Point de fonctionnement optimum,  $P_m (V_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_{op} \times I_{op}$
- ✓ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ✓ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$

### I.5.1. Caractéristiques électriques d'une cellule

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension.

### I.5.2. Influence de l'éclairement

Le courant  $I_{CC}$  varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (I.19) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement [BRI 08].

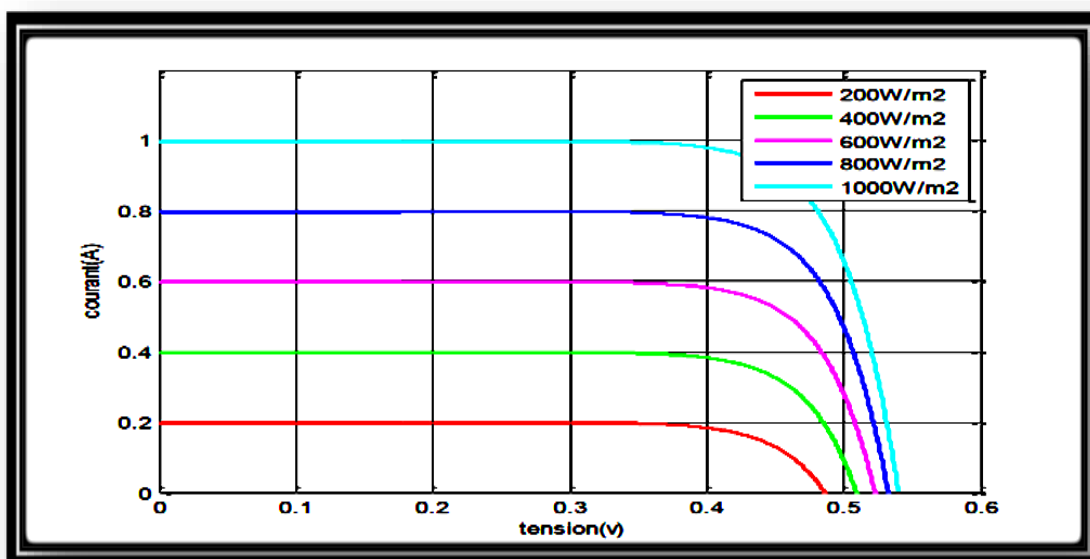


Fig.I.20. Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [BRI 08].

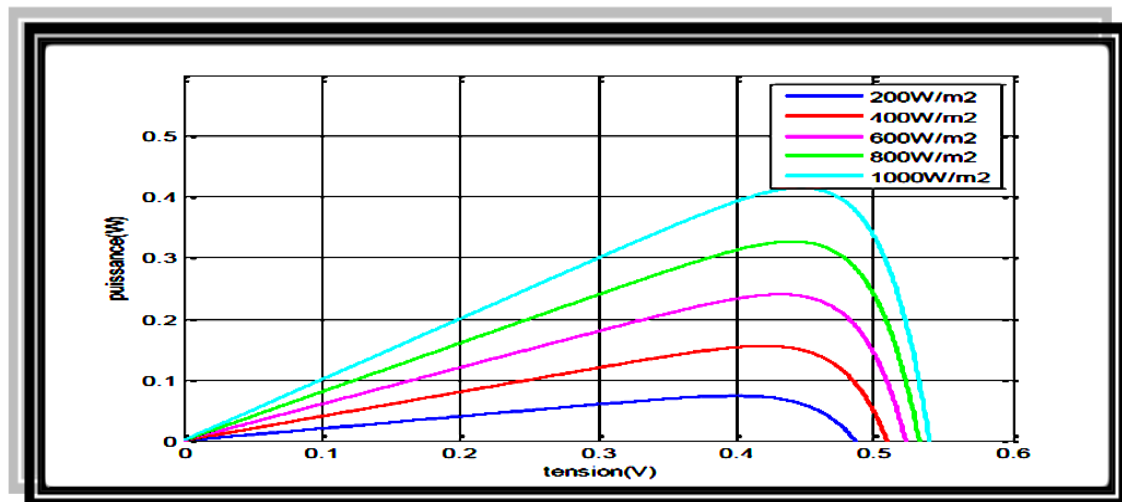


Fig.I.21 Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [BRI08].

### I.5.3. Influence de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres Figure (I.21). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante. [BRI08].

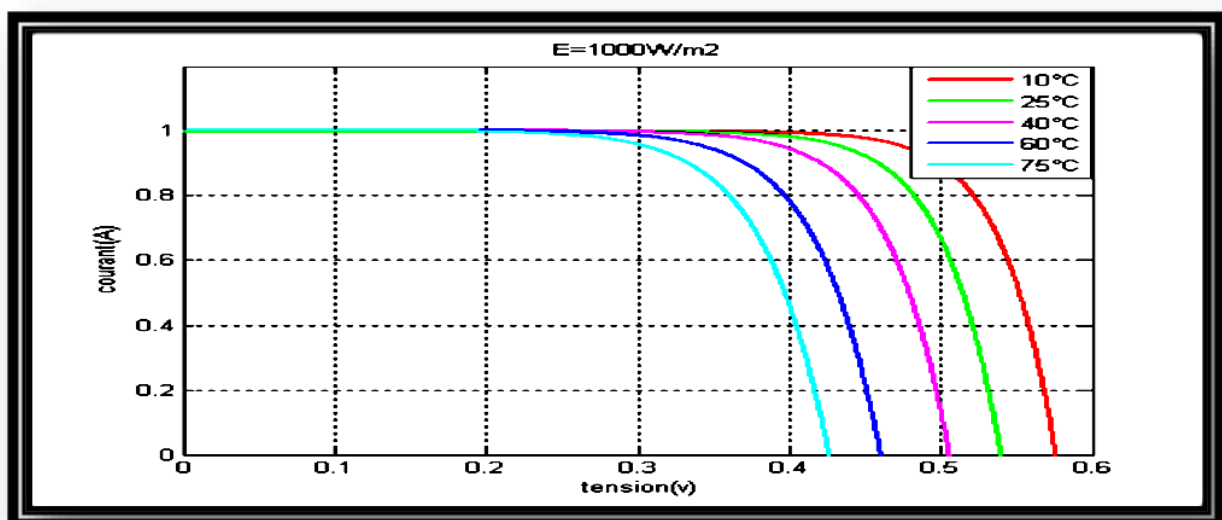


Fig.I.22 Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température [BRI 08].

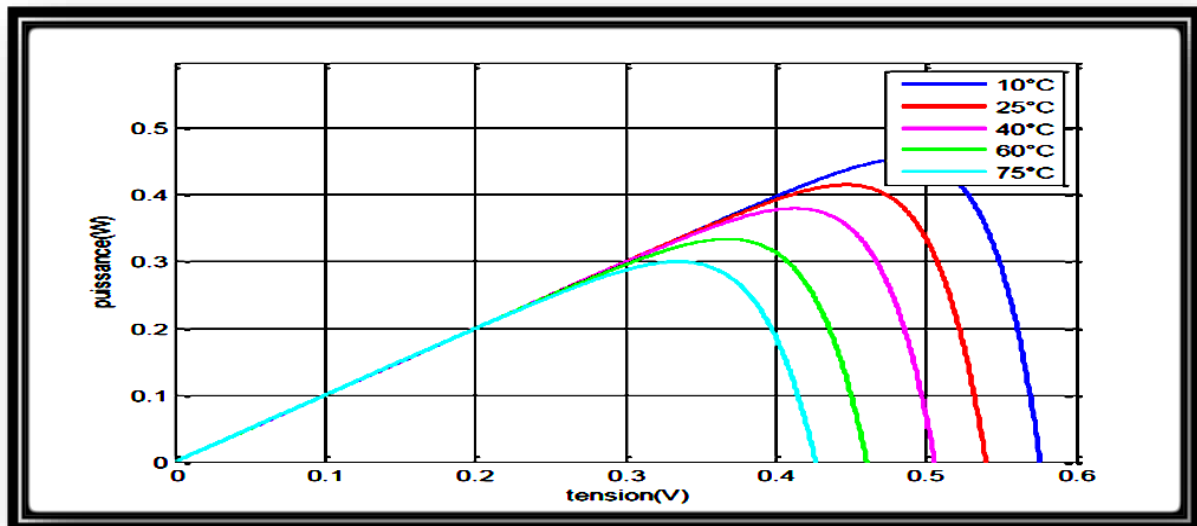


Fig. I.23. Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction. [BRI 08].

### I.6. Les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée :

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

#### I.6.1. L'isolé :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.24) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

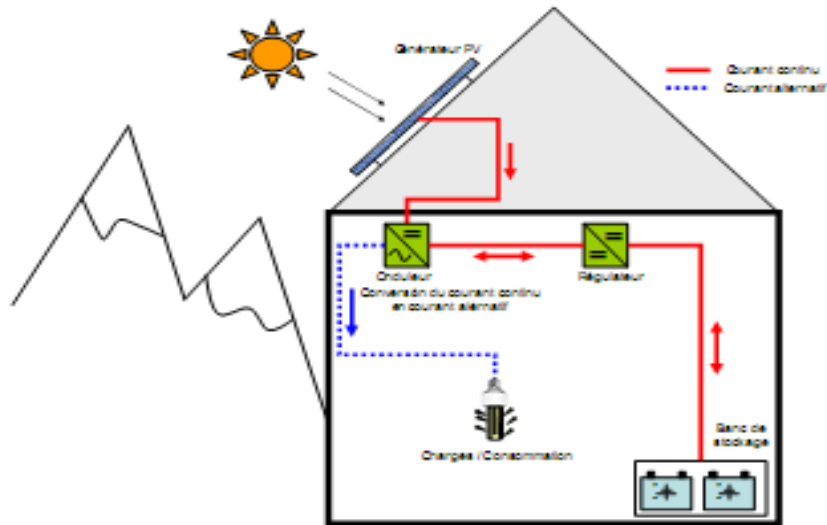


Fig.I.24 : Exemple de la structure d'un système PV autonome.

### I.6.2. Le connecté au réseau

La Figure (I.25) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. Du point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation Instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV.

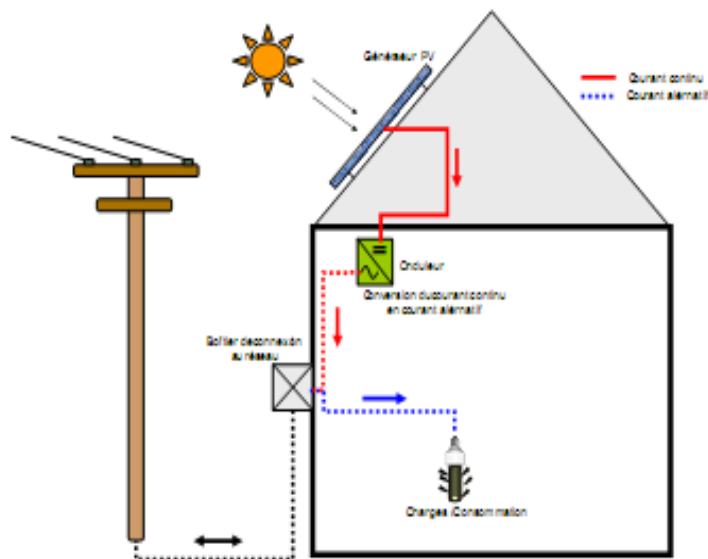


Fig.I.25: Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [RIF 09]

## I.7. Evolution mondiale du marché PV

L'électricité est indispensable au développement économique, et ce, dans tous les pays. Son importance relative s'accroît avec le progrès technique, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'électricité photovoltaïque connaît depuis de nombreuses années une décroissance rapide de son coût de production. Celle-ci est nettement liée à l'amélioration de la technologie et à la croissance du marché mondial. La figure (I.25) montre le coût de production de l'électricité solaire [EPIA 11].

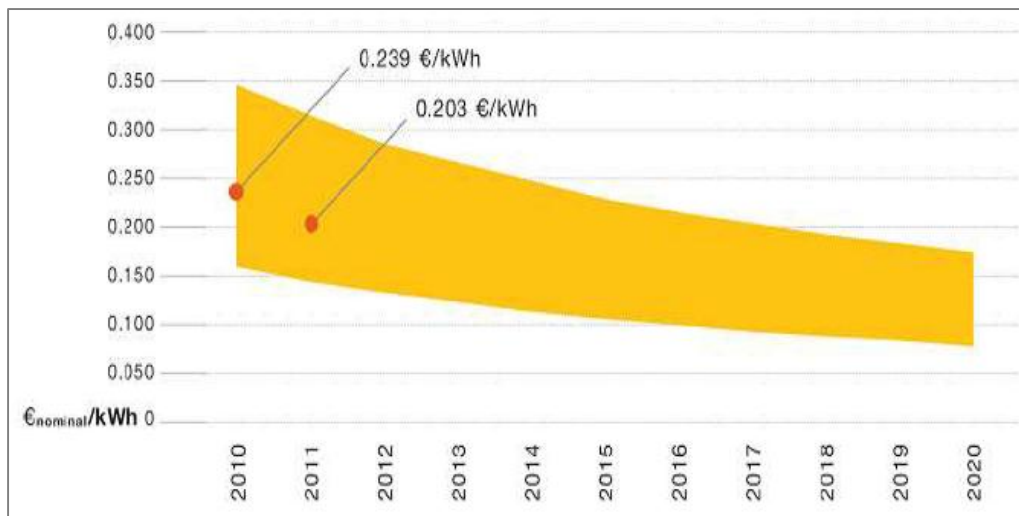


Fig.I.26. Coût de production de l'électricité solaire en Europe [EPIA 11]

## I.8. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV

### I.8.1. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du Milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [LAS 13].



Mobilité de l'installation.

Accès simple aux sites isolés.

### **I.8.2. Inconvénients**

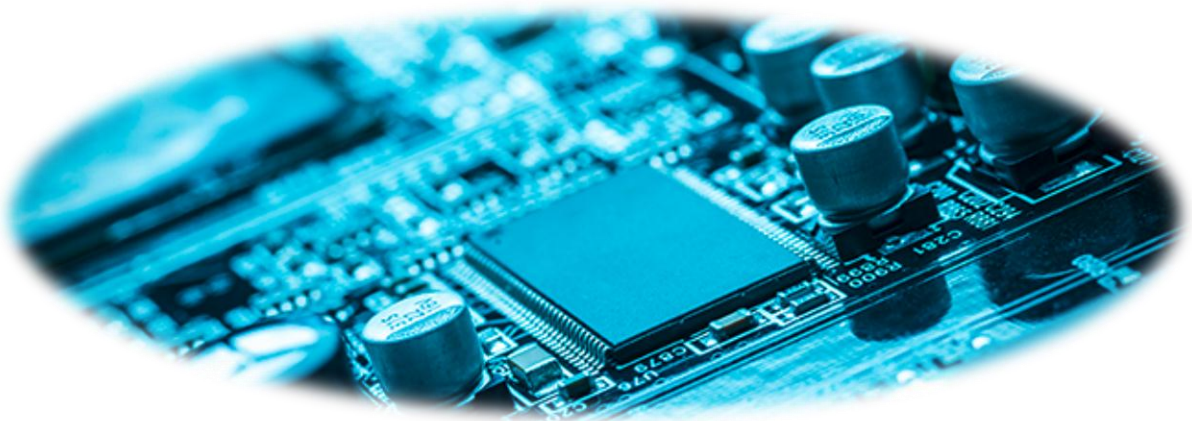
La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

### **Conclusion**

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. Nous avons étudiés le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on effectue un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

# *Chapitre II*



## Introduction

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et/ou électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes.

Face à une variation de puissance, le système électrique doit normalement retrouver un état stable. Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger. Des études sont nécessaires pour pouvoir éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique. Elles le sont particulièrement dans le cas des réseaux industriels qui comportent un ou plusieurs groupes générateurs ainsi que des moteurs. [MET 85]

Nous allons présenter dans ce chapitre, des notions sur la stabilité des réseaux et ses différents types ainsi que la technique d'amélioration de la stabilité par FACTS, en particulier.

### II. 1. Stabilité des réseaux

#### II.1.1. Définition

En fait, il existe plusieurs définitions de la stabilité, nous nous contenterons dans cette thèse de la définition selon la norme IEEE : « *La stabilité d'un réseau électrique est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation* » [IEE 04].

#### II.1. 2. Types de stabilité

##### II. 1. 2. 1 Stabilité statique

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence. Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continue son fonctionnement normal [SAD 98].

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si, suite à une perturbation quelconque

infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'origine [SAM 83].

### **II. 1. 2. 2. Stabilité dynamique**

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, les PSS ou bien les FACTS dont les dynamiques ne sont pas négligeables, seront pris en compte dans ces modèles [SAM 83].

### **II. 1. 2.3. Stabilité transitoire**

La stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale.

Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations.

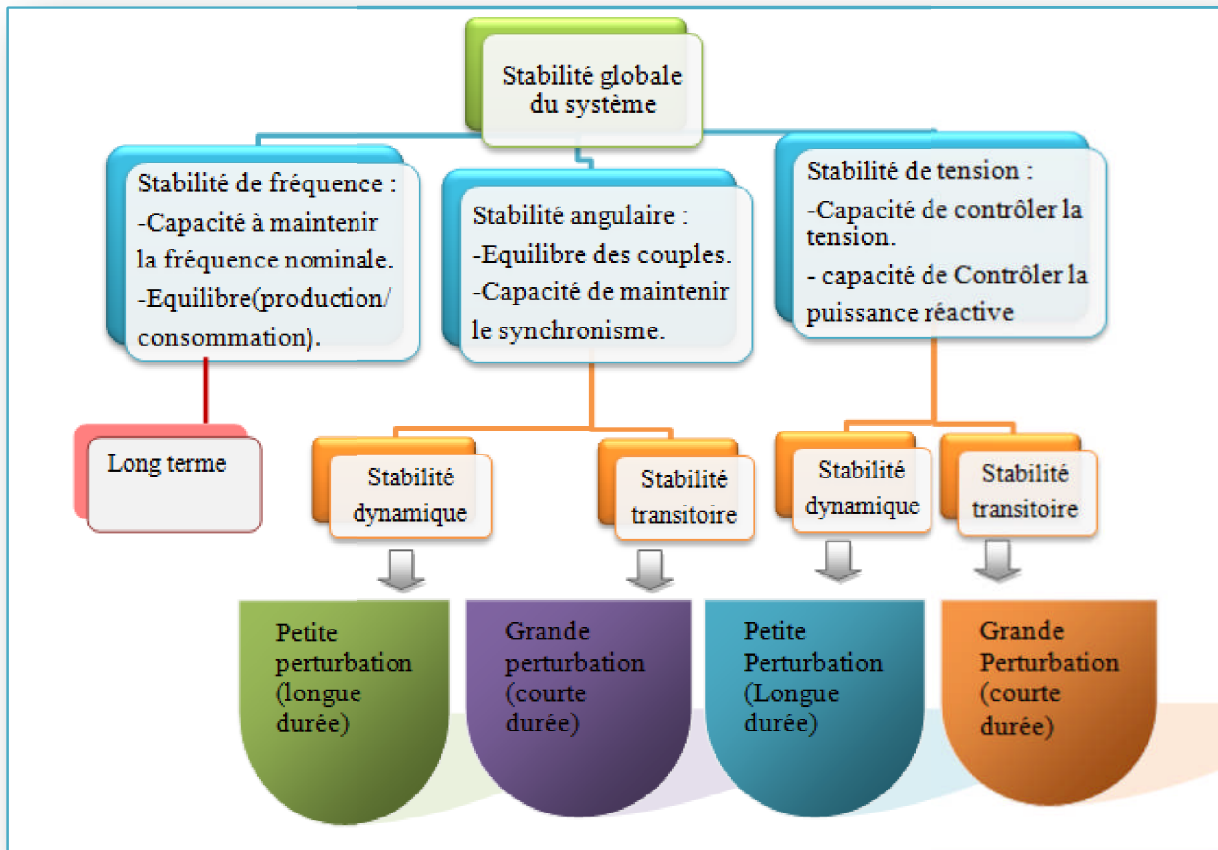
Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines,
- La Perte d'ouvrages
- La Perte des groupes de production, etc.
- Les conséquences de ces défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau. La stabilité transitoire dépend :
- du type de perturbation
- de la durée de perturbation
- du lieu de perturbation
- de la performance des systèmes de protection (relais, réenclenchement)
- du point de fonctionnement avant défaut (niveau de puissance active, topologie du réseau et degré d'excitation des machines)
- des caractéristiques dynamiques (des générateurs, des charges et des régulateurs mis en place dans les stations ainsi que des stabilisateurs comme le PSS).

Ce qui importe dans une méthode d'analyse de la stabilité transitoire, c'est la rapidité et l'exactitude des réponses obtenues [BAR 84] [SAD 98]

### II.1.3. Classification du problème de stabilité

Nous pouvons définir trois types de stabilité du réseau électrique, celle de l'angle de transport ou celle de la tension et celle de la fréquence. La figure suivante représente une classification généralisée de la stabilité. [OUL 09]



**Fig.II.1:** Classification des types de stabilité des réseaux électriques.

### II.2. Analyse de la stabilité de tension

Il y a deux types d'analyse de la stabilité de tension :

Dynamique et statique ; L'analyse dynamique se base sur des simulations dans le temps afin de résoudre des équations non linéaires différentielles/algébriques du système. En revanche, l'analyse statique est basée sur la solution des équations conventionnelles ou modifiées du problème d'écoulement de puissance [GON 05].

Dans ce travail, Nous étudierons l'analyse de la stabilité statique et leur méthode.

### II.2.1.Marge de charge (loading margin) :

La marge de charge est l'indice le plus utilisé dans l'évaluation de la stabilité statique de tension : c'est la quantité de la charge additionnelle qui causerait un effondrement de tension. En termes plus simples, c'est la distance entre le point de fonctionnement actuel et le point qui causerait l'effondrement de tension. Dans la plupart des études de stabilité statique de tension, la charge est choisie comme paramètre essentiel qui conduit le système à l'effondrement.

Les avantages de la marge de charge, prise comme indice de stabilité de tension, peut se résumer dans les points suivants :

- Simple à calculer, bien admis, et facile à comprendre.
- Exige seulement un modèle statique du réseau électrique.
- La marge de charge est un indice précis qui tient en compte la non linéarité du réseau électrique ainsi que certaines limites telles que les limites sur la production d'énergie réactive.
- Une fois la marge de charge calculée, il est facile de déterminer sa sensibilité vis-à-vis de n'importe quel paramètre du réseau.

Malgré ces avantages, la marge de charge dispose de quelques inconvénients, qui peuvent être résumés dans les points suivants :

- Le calcul de la marge de charge est plus coûteux, comparée à d'autres indices.
- La marge de charge est basée sur la prévision de la direction d'augmentation de la charge, mais cette information n'est pas toujours aisément disponible.

Dans la pratique, la méthode directe et la méthode continue sont utilisées pour l'évaluation de la marge de charge [VEN 92]. Dans ce mémoire, on s'intéressera seulement à la méthode continue à cause de ses avantages cités précédemment.

### II.2.2.Ecoulement de puissance en continu (Continuation Power Flow) :

L'une des méthodes simples de calcul de la marge de charge est le calcul d'écoulement de puissance à chaque incrémentation de la charge, jusqu'à la divergence du programme. Malheureusement cette méthode fournit des résultats non précis à cause de singularité ou de mauvais conditionnement de la matrice Jacobienne autour du point d'effondrement . De plus, cette méthode classique ne trace pas la partie inférieure de la courbe de tension qui est utilisée par d'autres méthodes d'analyse [KEZ 04].Proposent une méthode efficace nommée « Ecoulement de Puissance en Continu » (CPF : Continuation Power Flow) afin d'éviter la singularité de la matrice Jacobienne près du point d'effondrement.

L'algorithme est basé sur une reformulation légère des équations d'écoulement de puissance et l'application d'une méthode de paramétrisation locale. Durant l'application de cette méthode, la matrice Jacobienne reste bien conditionnée même autour du point d'effondrement [AJJ 92].

L'avantage de l'écoulement de puissance en continu réside non seulement dans sa capacité de trouver le point critique d'effondrement de tension, mais aussi la détermination du tracé de la courbe PV complète (partie supérieure et inférieure) d'une façon exacte.

Ses caractéristiques intéressantes amènent plusieurs compagnies de production d'énergie électrique à utiliser cette méthode comme pourvoyeur d'un indice efficace d'évaluation de la proximité du système du point d'effondrement [LAK 06].

### II.2.3. Calcul Continu de l'écoulement de puissance (CPF) [LOU 13]

Les techniques du calcul continu de l'écoulement de puissance sont largement reconnues comme un outil précieux pour déterminer les courbes  $V(P)$  du système de puissance et permettent d'estimer les conditions de chargement maximal et des solutions «critiques» (par exemple, saddle-node et limites induites de points de bifurcation). Malgré que les grands systèmes nécessitent un calcul numérique exigeant, le CPF n'est pas affectée par des instabilités numériques. En fait, il est capable de déterminer la partie stable et instable des courbes  $V(p)$  et peut fournir des informations supplémentaires, telles que les facteurs de sensibilité de la solution actuelle à l'égard des paramètres pertinents. D'un point de vue mathématique, le CPF est une technique d'homotopie et permet d'explorer la stabilité des équations du système électrique en faisant varier un paramètre du système, qui, dans les études de stabilité statique et dynamique typique de tension, est le paramètre de charge  $\lambda$ . De manière générale, le CPF consiste en un pas prédicteur réalisé par le calcul du vecteur tangent et un pas correcteur qui peut être obtenu soit par l'intermédiaire d'un paramétrage local ou à une intersection perpendiculaire.

#### a) Pas prédicteur :

Au point d'équilibre générique  $p$ , la relation suivante s'applique:

$$f(x_p, \lambda_p) = 0 \Rightarrow \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = D_x f|_p \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p + \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = 0 \quad (\text{II.1})$$

Et le vecteur tangent peut être approximé par:

$$\tau_p = \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p \approx \frac{\Delta x_p}{\Delta \lambda_p} \quad (\text{II.2})$$

À partir de l'équation (IV.4) et (IV.5) on a:

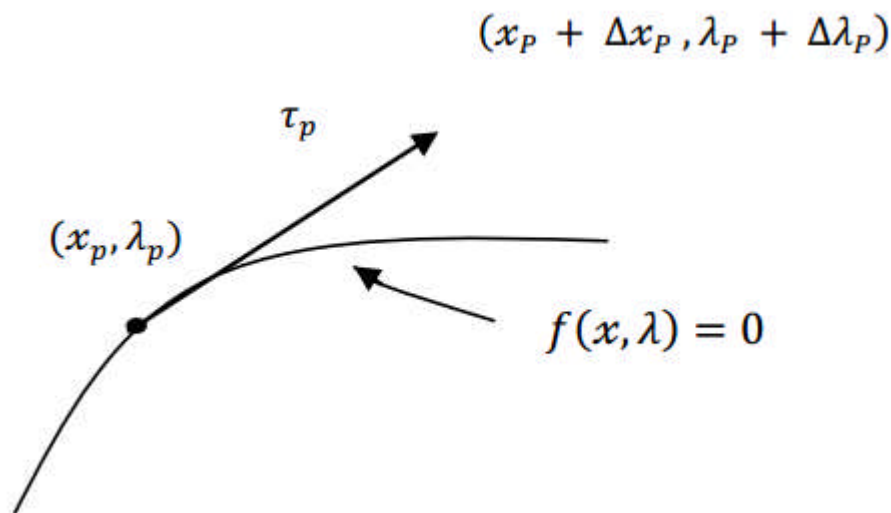
$$\tau_p = -D_x f|_p^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|_p$$

$$\Delta x_p = \tau_p \Delta \lambda_p \quad (\text{II.3})$$

À ce point un pas de grandeur  $k$  de contrôle doit être choisi pour déterminer la quantité  $\Delta x_p$  et  $\Delta \lambda_p$  avec une normalisation afin d'éviter de grands pas quand  $\|\tau_p\|$  est grand.

$$\Delta \lambda_p \triangleq \frac{k}{\|\tau_p\|} \quad \Delta x_p \triangleq \frac{k \tau_p}{\|\tau_p\|} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\|\cdot\|$  est la norme euclidienne et  $k = \pm 1$ . Le signe de  $k$  détermine l'augmentation ou la diminution de  $\lambda$ . La figure (IV.3) présente une représentation graphique du pas prédicteur.



**Fig II.2:** Calcul continu de l'écoulement de puissance:  
pas prédicteur obtenu par les moyens de la tangente

### b) Pas correcteur

Pour le pas correcteur, l'ensemble des équations  $n+1$  est résolu:

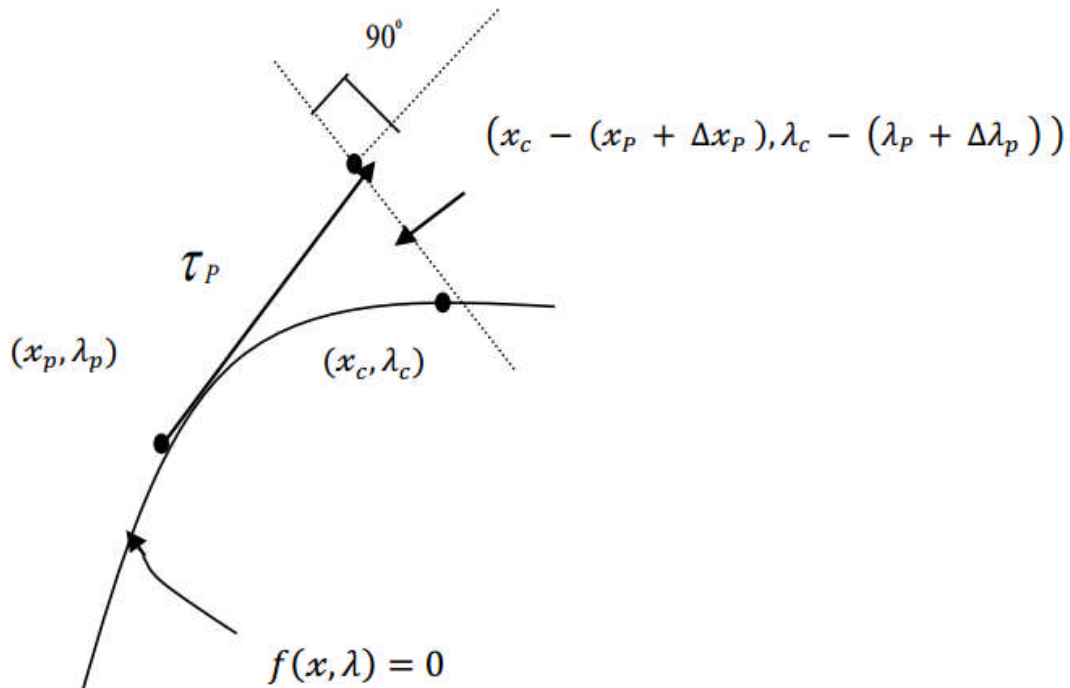
$$f = (x, \lambda) = \mathbf{0} \quad (\text{II.5})$$

$$\eta = (x, \lambda) = \mathbf{0} \quad (\text{II.6})$$

Où la solution de  $f$  doit être dans le collecteur de bifurcation et  $\eta$  est une équation additionnelle pour garantir un ensemble non singulier au point de bifurcation. Pour le choix de  $\eta$  il y'a deux options: l'intersection perpendiculaire et la paramétrisation locale. Dans le cas



de l'intersection perpendiculaire, dont la représentation est donnée par la figure (II.3), l'expression de  $\eta$  devient (équation II.7):



**Figure II.3:** Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens d'intersection perpendiculaire.

$$\eta(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta \lambda_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_c - (x_p + \Delta x_p) \\ \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Tandis que pour la paramétrisation locale, soit, le paramètre  $\lambda$  soit la variable  $x_i$  est forcée d'être une valeur fixe.

$$\eta(x, \lambda) = \lambda_c - \lambda_p - \Delta \lambda_p \quad (\text{II.8})$$

Ou

$$\eta(x, \lambda) = x_{ci} - x_{pi} - \Delta x_{pi} \quad (\text{II.9})$$

Le choix pour que la variable soit fixe dépend du collecteur de bifurcation de  $f$ , comme c'est présenté à la figure (II.4).

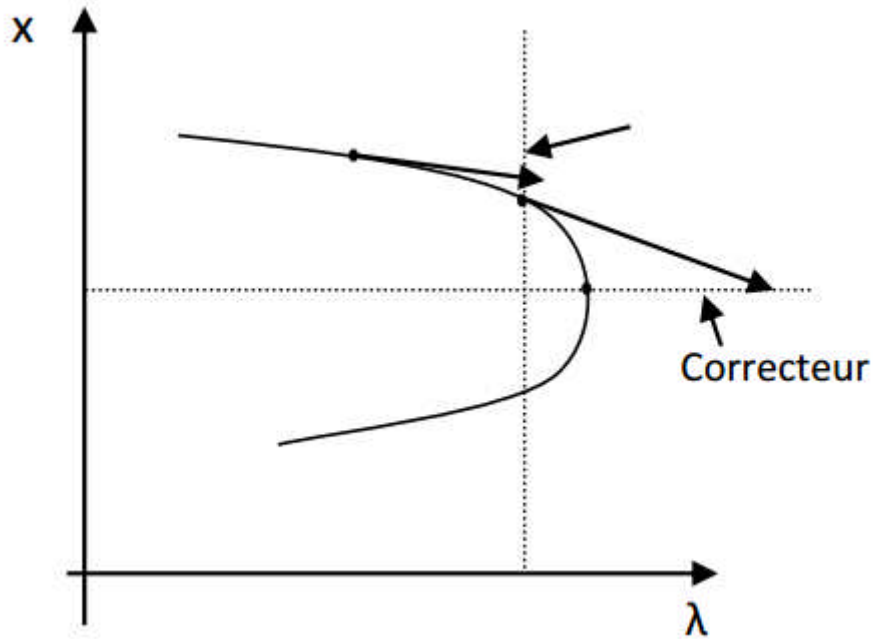


Fig. II.4.: Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas correcteur obtenu par les moyens de la paramétrisation locale

### II.3. Les méthodes récentes d'amélioration de la stabilité

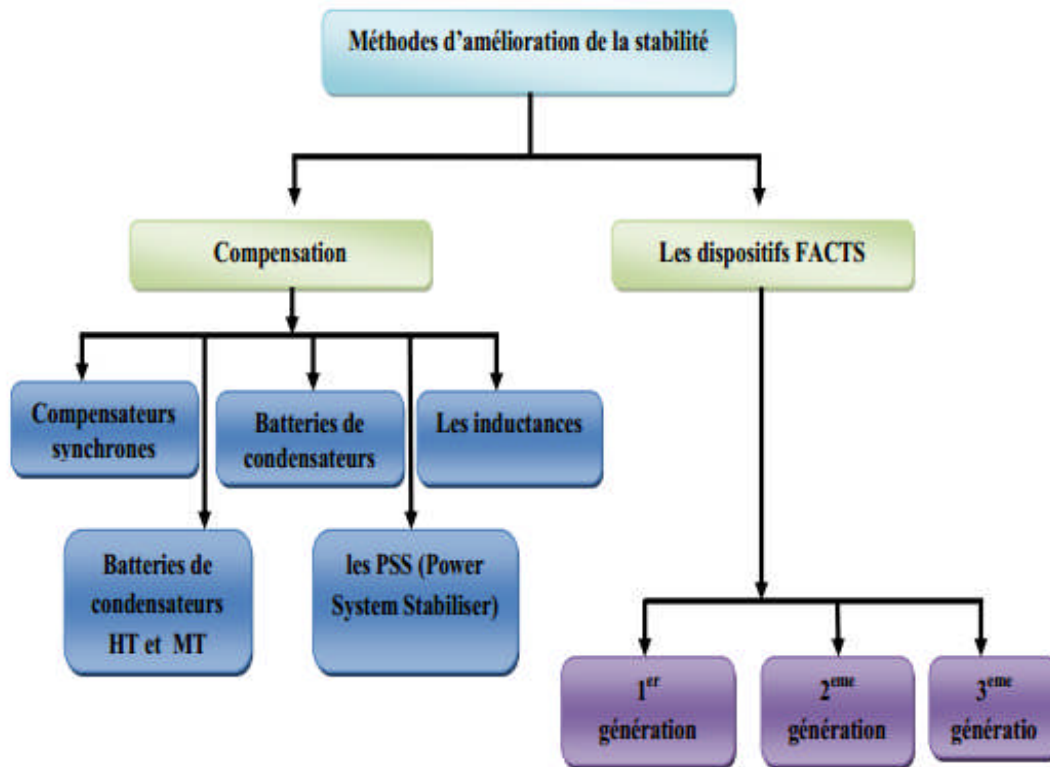


Fig.II.5:Les méthodes d'amélioration de la stabilité

## II.4. Amélioration de la stabilité par FACTS

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [BEL00].

Les systèmes FACTS sont appliqués à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques

### II.4.1. Dispositifs FACTS

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante : Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant. [NOB 85]

### II.4.2. Rôle des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives :

Bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée,
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [BEN 07]. Ils permettent en particulier :
  - ✚ D'accroître la réserve de stabilité transitoire,
  - ✚ D'amortir les oscillations de puissance,
  - ✚ De supporter de manière dynamique la tension.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone.

#### II.4.3. Classification des dispositifs FACTS

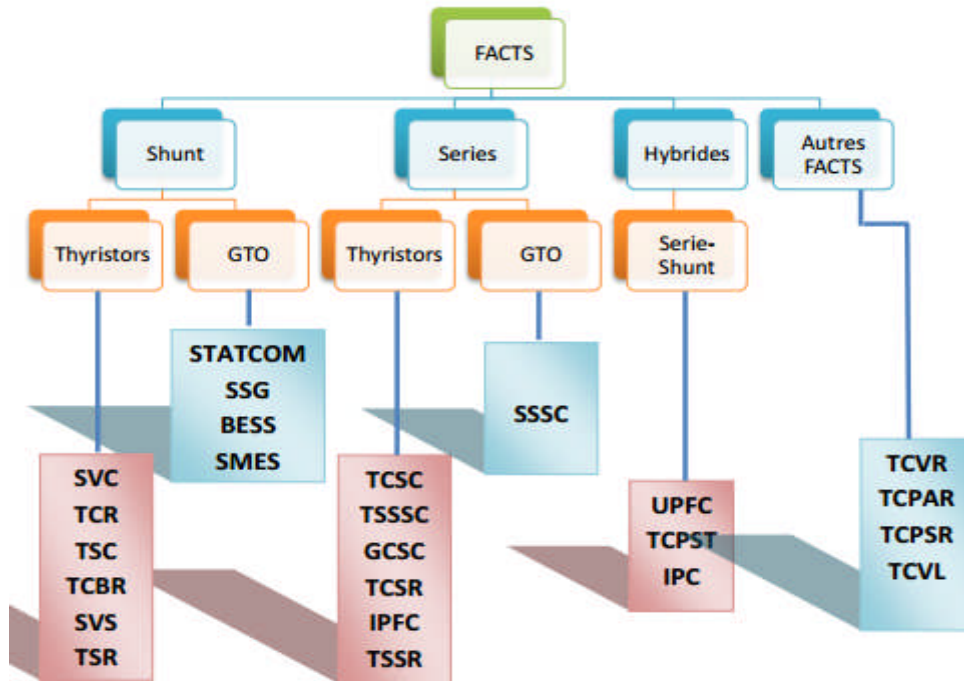
Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés :

**A- La première génération** est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

**B- La deuxième génération**, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

**C- Une troisième génération** de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau. Les composants FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- ✓ Compensateurs parallèle,
- ✓ Compensateurs série,
- ✓ Compensateurs hybrides "série – parallèle". [HIN 00]



**Fig II.6:** classification des dispositifs FACTS

#### II. 4.4.1. Compensateurs parallèle :

Vers la fin des années 60, plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leur apparition. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne [BEL 00] [SON 99] [HIN 00].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

##### II. 5.4.1.1. Compensateurs parallèle à base de thyristors :

Il s'agit de :

- TCR (Thyristor Controlled Reactor)

Dans le TCR (ou RCT : Réactances Commandées par Thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [Hin 00].

- TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction [HIN 00].

➤ SVC (Static Var Compensator)

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud [PAS 98] [LER 91].

➤ TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [Pas 98].

### II. 5.4.1.2. Compensateurs parallèle à base de thyristors GTO

Il s'agit du STATCOM (STATIC COMPensator) qui a connu jusqu'à présent différentes

Appellations :

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (STATIC CONDenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVClight
- SVCplus

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce au développement des interrupteurs GTO de forte puissance [BEL 00].

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

1. Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
2. Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.

Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres [PET 97].

### II.4.4.2. Compensateur série

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

### II. 4.4.2.1. Compensateurs série à base de thyristor

Parmi ces Compensateurs, on trouve :

- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur [PAS 98].

- TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ .

- TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

- TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable.

- TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$  [PAS 98].

### II. 5.4.2.2. Compensateurs sériels à base de thyristors GTO

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille.

### II.5.4. 3. Compensateurs hybrides série - parallèle

#### II.5. 4.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors

- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario [PET 97].

#### II.5.4.3.2 Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO

- IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transport d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des

convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC [HIN 00].

Nous pouvons l'utiliser afin de contrôler les changements de puissances entre les lignes du réseau.

- UPFC (Unified Power Flow Controller)

Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC en 1990. En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance [PAS 98]

Se travaille est basé sur le compensateur SVC et le STATCOM.

### **II.5.5- SVC (Static Var Compensator)**

Le rôle principale du SVC (compensateur statique d'énergie réactive) est de compenser la puissance réactive dans la ligne et cela pour éviter les chutes de tension causées par les consommateurs, cette compensation peut se réaliser de plusieurs manière et avec de nombreux moyens. La plupart des moyens utilisés pour la compensation sont efficaces mais présentent des inconvénients :

- temps de réaction élevé.
- génération d'harmoniques.

Actuellement, on utilise des onduleurs à pulsation qui ont plusieurs avantages, pour éviter ces inconvénients.

L'association des dispositifs TCR, TSC, batteries de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC, dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique est donnée par la figure (II.8) Trois zones sont distinctes [PAS 98] :

- une zone où seules les capacités sont connectées au réseau,
- une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC,
- une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.

Tous sont utilisés pour contrôler la tension.



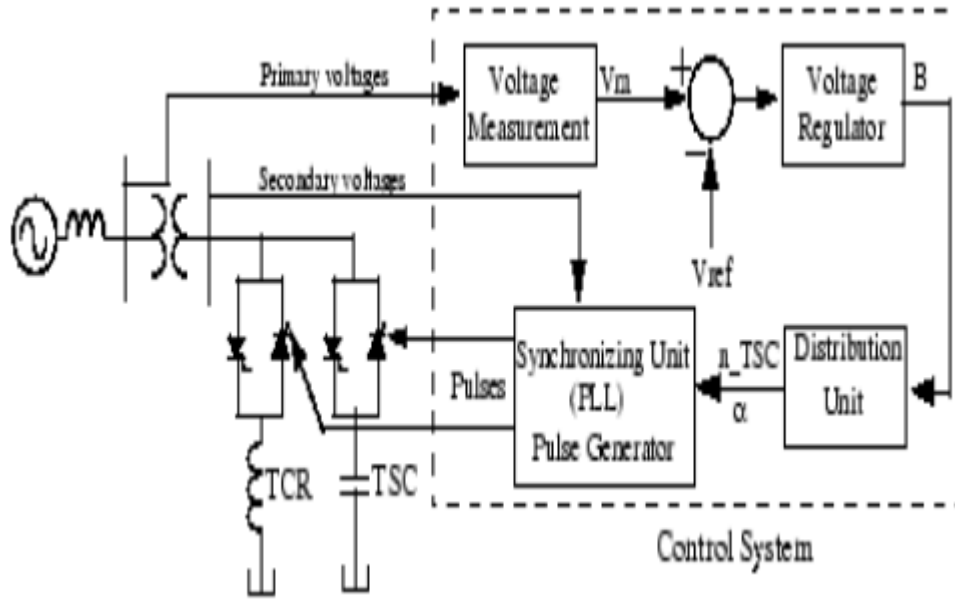


Fig II.7: Schéma d'une branche de SVC [BOU 10].

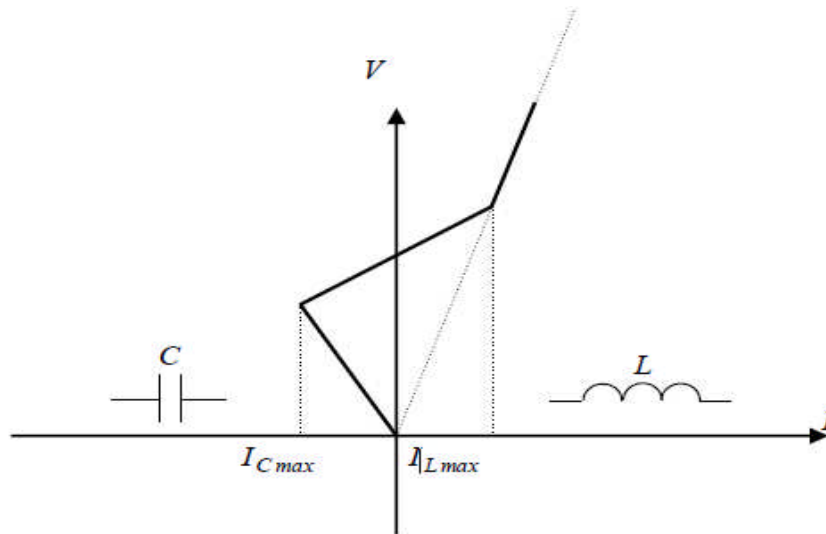


Fig.II.8 : Caractéristique d'un SVC [BOU 10].

### II.5.5.1.Principe de fonctionnement du SVC :

Une branche de SVC est composée de trois circuits, une capacité C1 est connectée en série avec deux thyristors et un circuit composé d'une inductance en parallèle avec une résistance, le courant peut être ajusté de façon continue entre zéro et sa valeur nominale, les branches capacitatives sont commandées en tout ou rien selon les états des thyristors conduisent ou non. Un circuit identique contenant condensateur C2 la puissance capacitive.

Lorsque l'inductance en service et les condensateurs débranchés et que la tension au secondaire du transformateur soit de valeur maximale, on va ajuster l'angle d'amorçage des thyristors commandant la branche inductive à  $90^\circ$ , le courant de l'inductance et la puissance réactive ont des valeurs maximales.

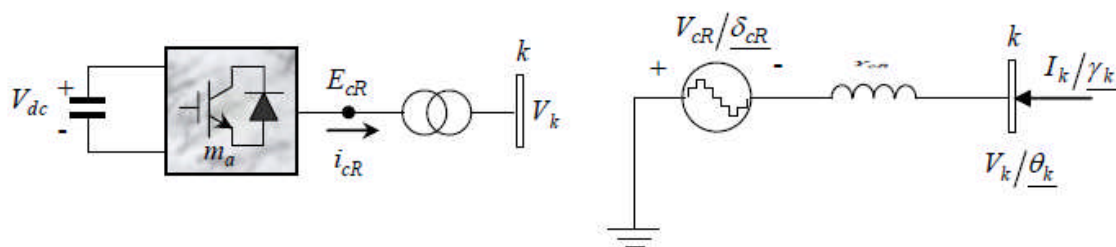
Lorsque l'inductance est débranché et les deux condensateurs en service, le courant totale par phase sous tension est de valeur maximale mais de signe négatif donc la puissance réactive est fournie[BOU 10].

### II.5.6. Dispositifs parallèles à base de GTO thyristors

Ce compensateur statique synchrone, ou STATCOM, possède plusieurs avantages par rapport aux compensateurs conventionnels.

- la vitesse de réaction, la réponse en moins d'un cycle à des variations de la tension.
- lorsque la tension est basse, il peut produire plus de puissance réactive, notamment au moment où l'on a besoin d'une puissance réactive considérable pour empêcher la chute tension.

La figure II.9 Représente le schéma de base d'un STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de GTO et de diode en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.



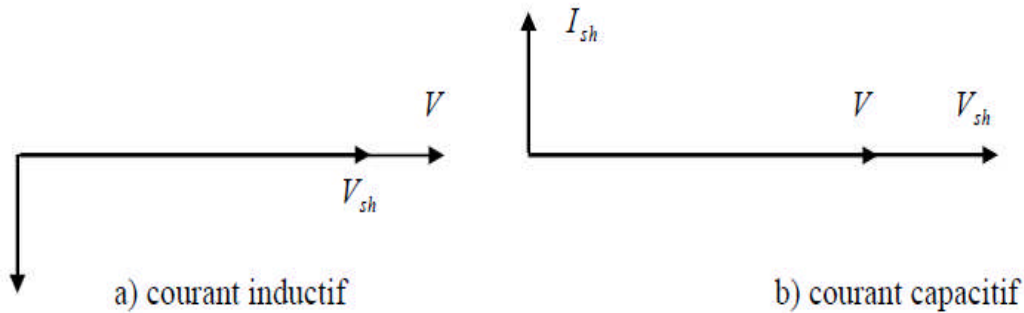
**Fig.II.9:** Schéma de base du STATCOM[BOU 10].

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie  $V_{sh}$  de l'onduleur, dont laquelle est en phase avec la tension du réseau la figure (II.9). Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

Si la tension  $V_{sh}$  est inférieure à la tension  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\pi/2$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant inductif (figure II.10.a).

Si la tension  $V_{sh}$  est supérieure à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\pi/2$  par rapport à la tension  $V$  ce qui donne un courant capacitif (Fig.II.10.b).

Si la tension  $V_{sh}$  est égale à  $V$ , le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.



**Fig.II.10:** Diagramme vectoriel du STATCOM

Nous considérons dans ce cas de fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur  $V_s$ .

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure II.9. Ce dispositif a l'avantage, contrairement au SVC, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension  $V$  diminue [BOU 10].

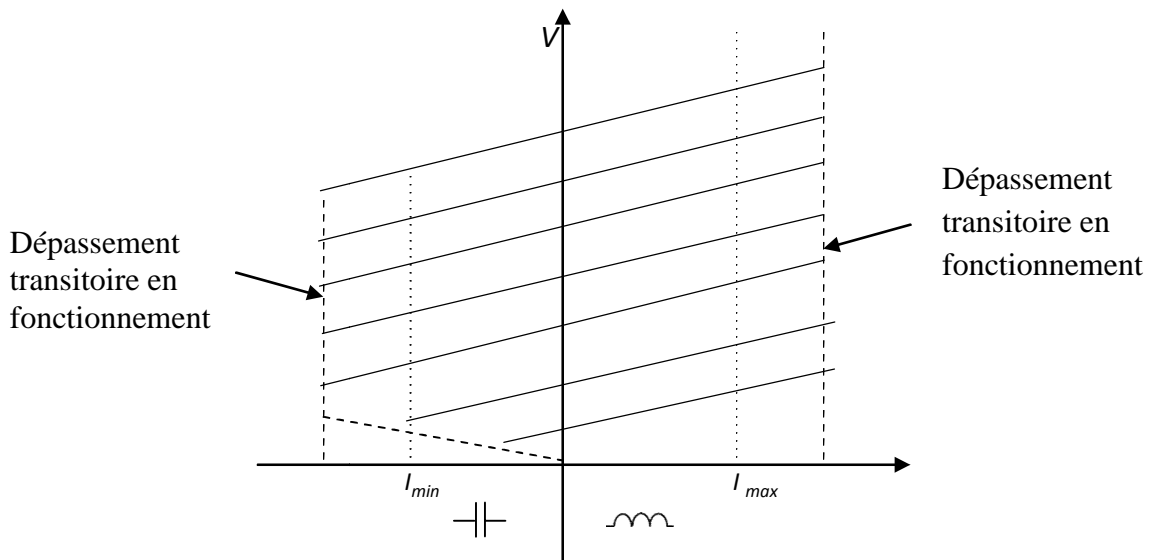


Fig.II.11: Caractéristique du STATCOM[PDF].

### II.4.7 Comparaison entre le SVC et le STATCOM

Le SVC et le STATCOM sont très proches dans leur pouvoir de compensation, mais très différents dans le principe de fonctionnement. Le STATCOM est une source de tension synchronisée en shunt avec le réseau électrique tandis que le SVC est une admittance (inductive ou capacitive) shunte contrôlée. Le STATCOM présente une caractéristique supérieure au SVC, beaucoup plus performant et surtout ne nécessite pas un même banc de batterie que le SVC pour la même puissance [SSC].

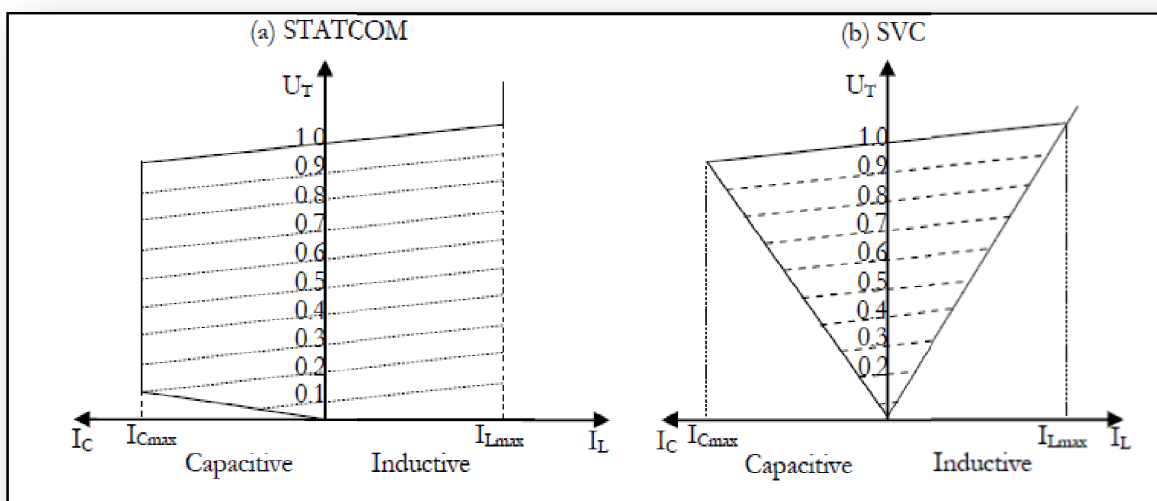


Fig. II.12: Caractéristique tension courant V-I a. STATCOM b. SVC [MAR 07].

## II.5.Application des FACTS

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [GYU 88].L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base (II.1) de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif.

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \text{ (II.11)}$$

La Fig. II.1 représente la puissance transmise entre deux nœuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de du déphasage entre les deux systèmes. Les différents dispositifs FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et l'amélioration de la stabilité de tension aux nœuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être résumées comme suit :

- ✚ Systèmes maillés : Commande du transit de puissance.
- ✚ Systèmes radiaux et lignes parallèles : commande de l'impédance.
- ✚ Systèmes faiblement connectés : commande de la tension.

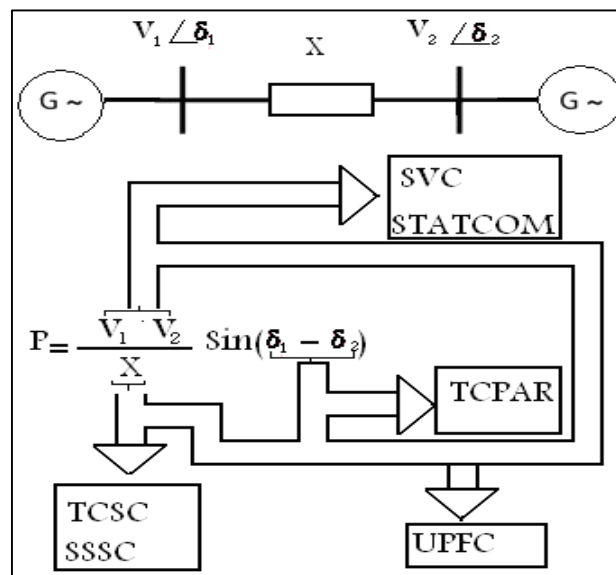


Fig. II.13: Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.

Le tableau II.1 résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique [Pov 00].

**Tableau II.1** Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau.

	Contrôle de charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC SRARCOM	★	★★★★	★	★★
TCSC	★★	★	★★★★	★★
SSSC	★★★★	★	★★★★	★★
TCPAR	★★★★	★★	★	★★
UPFC	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★

#### Influence:

Petite ★. Moyenne ★★. Forte ★★★

## II.6. Avantages et Inconvénients de la Technologie des Dispositifs FACTS [20]

### Avantages

- ✚ Contrôle le transit de la puissance active.
- ✚ Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- ✚ Réduit le transit de l'énergie réactive.
- ✚ Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- ✚ Améliore l'interconnexion et l'échange énergétique.

### Inconvénients

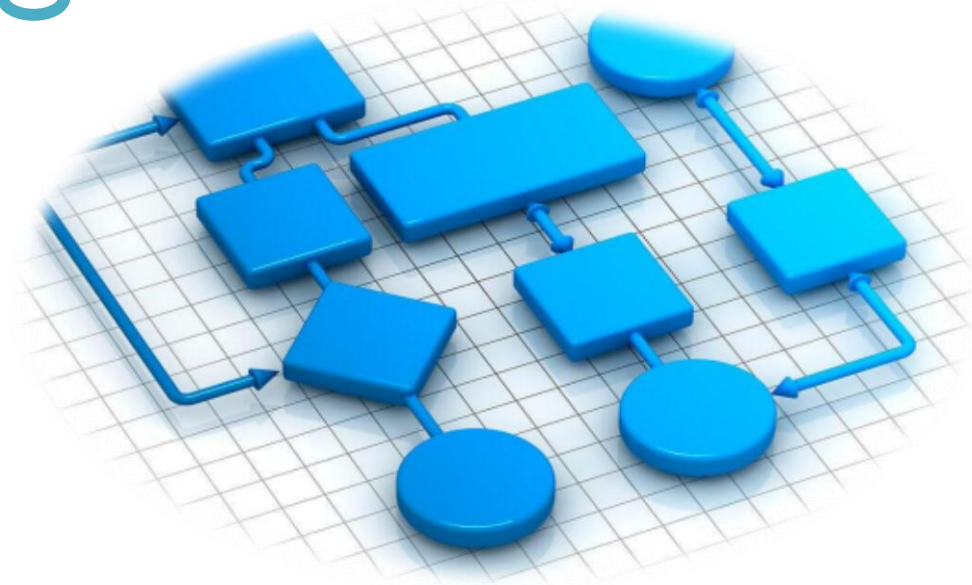
L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable au sur-tensionnement aux commutations répétitives.

### Conclusion

Dans ce chapitre Une analyse efficace de la stabilité de tension reste la solution appropriée pour s'éloigner du point d'effondrement. Dans ce mémoire, nous avons présenté les deux types d'analyse qui existent, à savoir, l'analyse statique et l'analyse dynamique. Puis nous avons focalisé notre étude sur l'analyse statique de la stabilité de tension

Puis nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu, nous avons donné une brève description et des définitions des divers types de dispositifs FACTS. Cette description est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux, Nous avons choisi d'étudier le STATCOM et le SVC comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive. Le chapitre suivant (chapitre III) sera dédié l'amélioration de la stabilité statique par des systèmes FACTS.

# *Chapitre III*





## Introduction

Puisque dans la réalité la demande de l'électricité est toujours en augmentation, donc la surcharge est très probable ou bien elle est très sur pour faire face à cette surcharge et garder la stabilité de notre réseau, il y a la solution la plus simple ; c'est d'augmenter la puissance générée c'est à dire construire des centrale électrique donc donner plus de pollution plus de perte économique, alors pour éviter Tout ça, on a pensé à un recoure aux FACTS. Est-ce que les systèmes FACTS peuvent améliorer notre réseau ? Voilà ce que nous allons examiner dans ce chapitre

### III.1. Etude de la stabilité statique du modèle de 30 jeux de barre par PSAT

#### III.1.1. Le Power System Analyses Toolbox (PSAT)

PSAT est un logiciel librement distribués conçu par Federico Milano basé sur MATLAB pour l'analyse et l'optimisation des réseaux électriques. L'interface graphique interactive du PSAT permet à l'utilisateur d'effectuer les fonctions statiques et dynamiques suivantes [MIL 13]:

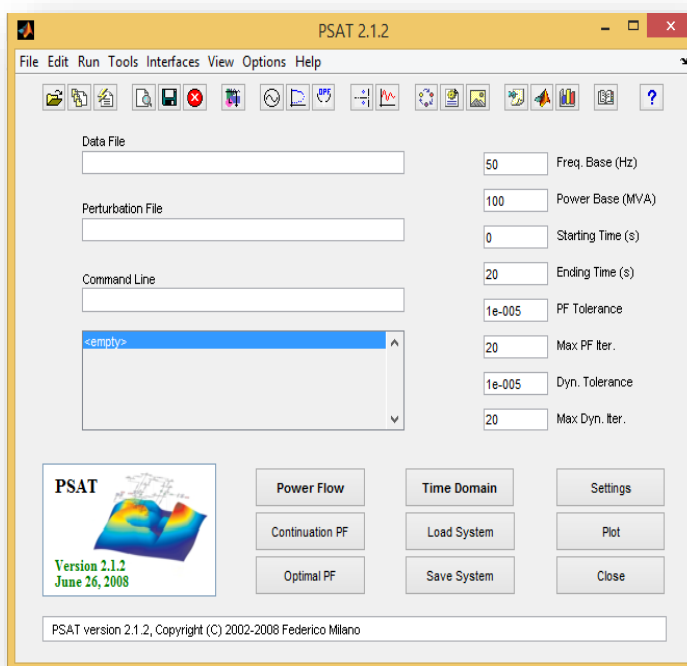
- ✓ Calcul d'écoulement de puissance (*Power Flow- PF*).
- ✓ Calcul d'écoulement de puissance Optimal (*Optimal Power Flow- OPF*).
- ✓ Calcul continu de l'écoulement de puissance (*Continuation Power Flow- CPF*).
- ✓ Analyse de la stabilité de petites perturbations (*Small Signal Stability Analysis SSSA*).
- ✓ Simulation temporelle (*Time Domaine Simulation- TDS*).
- ✓ Analyse transitoire d'électromagnétique (*Electro Magnetic Transient Analysis EMT*)

Interface graphique (*Graphical User Interface- GUI*).

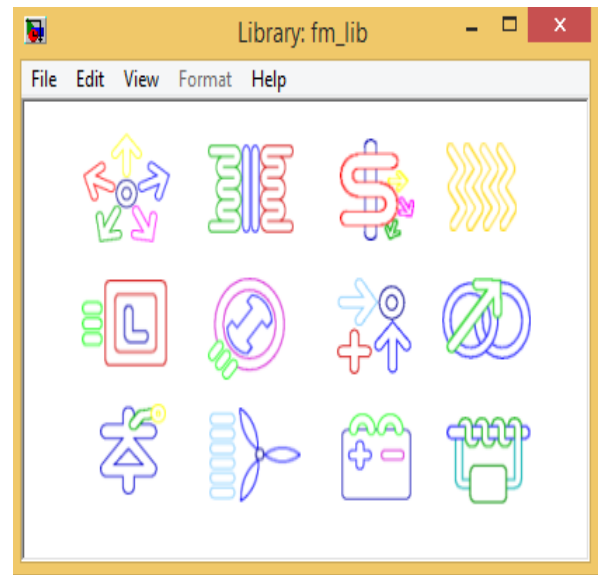
- ✓ Éditeur de réseau graphique (*Graphical Network Editor- GNE*) Toutes les opérations de PSAT peuvent être réparties en deux genres d'analyse: - La première analyse est de résoudre les problèmes de l'écoulement de puissance.

Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la figure (III.1). - La seconde analyse est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque

de Simulink qui contient de nombreux modèles pour l'implantation des systèmes électriques, comme montré dans la figure (III.2)



**Fig.III.1:** Page d'accueil du PSAT



**Fig. III.2 :** Bibliothèque de Simulink

Quoique le PSAT fonctionne sous l'environnement MATLAB, il ne peut être lancé qu'à partir de la version MATLAB 9.0.0 et plus.

Après l'enregistrement du dossier PSAT dans le répertoire « work », pour lancer le PSAT, il faut suivre les étapes suivantes :

- Ouvrir Le Matlab 9.0.
- Aller au dossier PSAT dans work
- Taper « psat » dans le Matlab commande.
- Cliquer sur 'data file' afin de charger le modèle.
- Une fois le modèle chargé, cliquer sur 'Power Flow', pour effectuer l'écoulement de puissance.
- Pour avoir les variables en fonction du temps cliquer sur 'Time Domain'.

En fin pour visualiser les différents paramètres du réseau modèle cliquer sur 'Plot'. [MIL 13]

### III.1.1.2 Réseaux d'études

Dans ce mémoire nous allons appliquer cet impact sur un réseau électrique de transport.

#### III.1.1.3 IEEE 30 Jeu de barre

Le choix du réseau IEEE 30JB est justifié par la possibilité d'établir des comparaisons avec les travaux de recherche similaires vue qu'il est très utilisé.

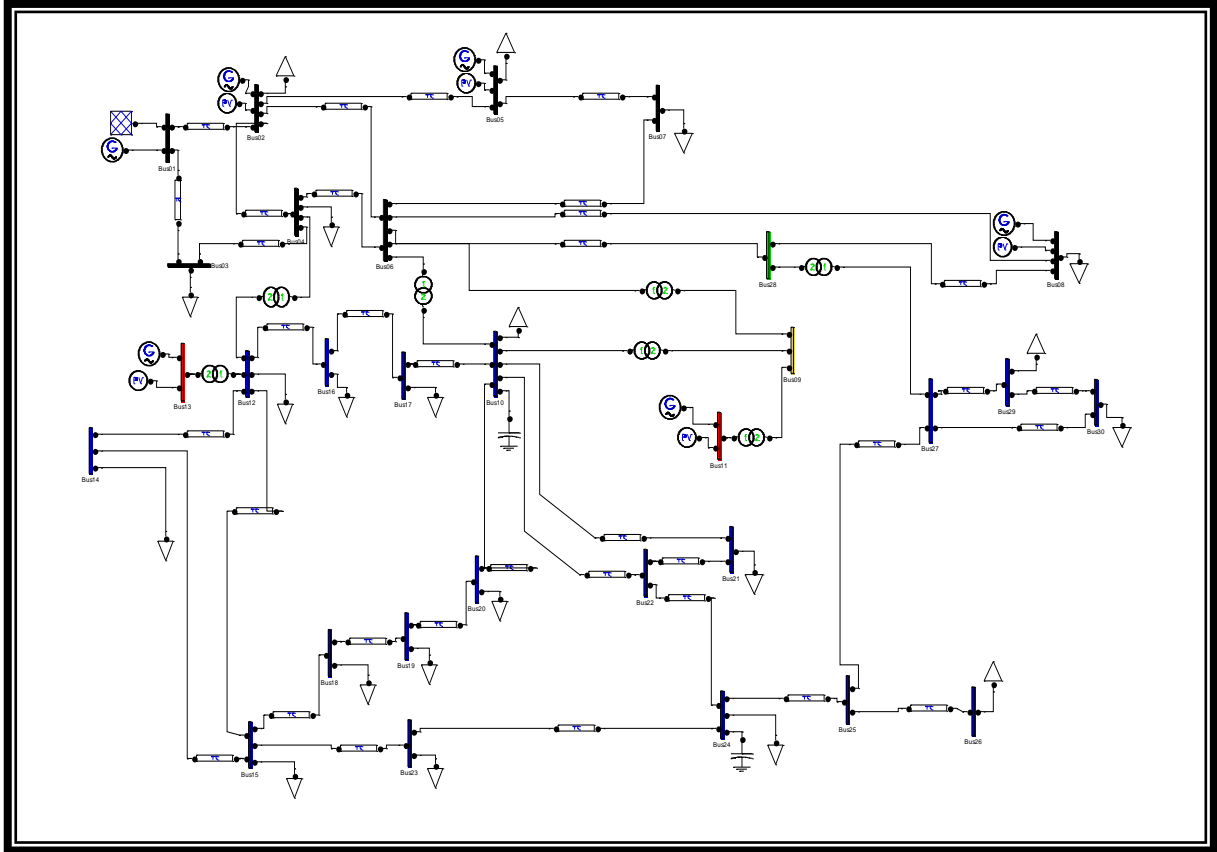


Fig.III.3. Caractéristique du Modèle d'étude 30JB

Tableau III.1: Données techniques du modèle d'étude

Nombre de jeux de barres	Nombre de Charges	Nombre de ligne de transmission	Nombre de générateurs	Nombre de transformateur
30	21	33	6	7

## III.2 Analyse de réseau de modèle 30JB

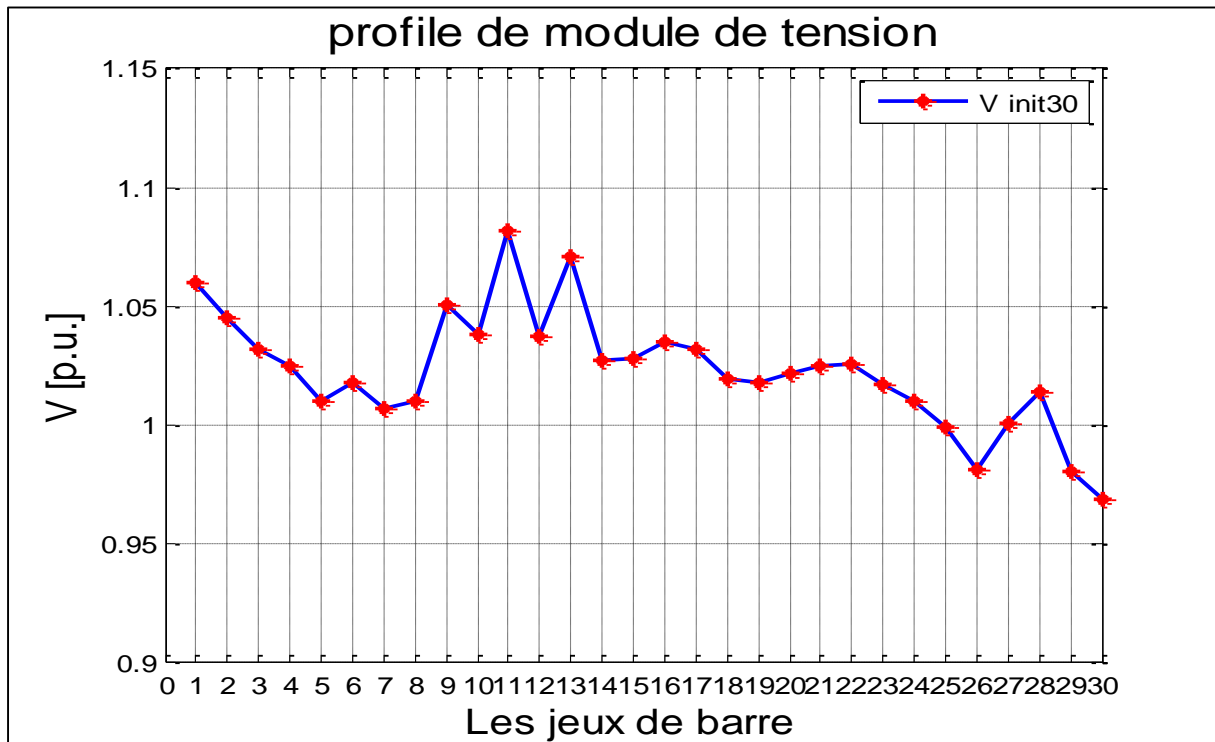
### III.2.1 état initiale

Cas primaire Nous comptons sur le modèle de réseau de la (Fig.III.3) avec les blocks de générateur.

**Tableau III.2 : Résultats de l'écoulement de puissance**

Jeu de Barre (JB)	La tension de JB [pu]	Angle [rad]	Pgen [pu]	Qgen [pu]	Pcharge [pu]	Qcharge [pu]
Bus01	1.06	0	2.1157	-0.16385	0	0
Bus02	1.045	-0.07733	0.4	0.37487	0.217	0.127
Bus03	1.0316	-0.11333	0	0	0.024	0.012
Bus04	1.0247	-0.13639	0	0	0.076	0.016
Bus05	1.01	-0.20995	0.1	0.27728	0.942	0.19
Bus06	1.0182	-0.1596	0	0	0	0
Bus07	1.0071	-0.18942	0	0	0.228	0.109
Bus08	1.01	-0.16615	0.1	0.1533	0.3	0.3
Bus09	1.051	-0.1971	0	0	0	0
Bus10	1.0384	-0.22864	0	0	0.058	0.18488
Bus11	1.082	-0.18549	0.12	0.30522	0	0
Bus12	1.0375	-0.21557	0	0	0.112	0.075
Bus13	1.071	-0.20045	0.12	0.25739	0	0
Bus14	1.0275	-0.23042	0	0	0.062	0.016
Bus15	1.0282	-0.23277	0	0	0.082	0.025
Bus16	1.0348	-0.22274	0	0	0.035	0.018
Bus17	1.0323	-0.23056	0	0	0.09	0.058
Bus18	1.0196	-0.24364	0	0	0.032	0.009
Bus19	1.0176	-0.2467	0	0	0.095	0.034
Bus20	1.022	-0.24321	0	0	0.022	0.007
Bus21	1.0251	-0.23679	0	0	0.175	0.112
Bus22	1.0254	-0.23663	0	0	0	0
Bus23	1.0172	-0.24047	0	0	0.032	0.016
Bus24	1.01	-0.24407	0	0	0.087	0.02314
Bus25	0.999	-0.23983	0	0	0	0

<b>Bus26</b>	0.98099	-0.24743	0	0	0.035	0.023
<b>Bus27</b>	1.0009	-0.23262	0	0	0	0
<b>Bus28</b>	1.0136	-0.16859	0	0	0	0
<b>Bus29</b>	0.98061	-0.25508	0	0	0.024	0.009
<b>Bus30</b>	0.96885	-0.27122	0	0	0.106	0.019



**Fig.III.4.**profil de tension à l'état initiale

### III.2.2 Méthode d analyses

Pour examiner l'influence de la surcharge dans le réseau électrique sur la stabilité de ce dernier et identifier la limite de cette sur charge on a adopté sur :

- ✓ Augmenter graduellement la charge au niveau de la charge (avec la méthode de CPF)
- ✓ Varier la valeur de la puissance au niveau de chaque charge (puissance active et réactive)
- ✓ Remarquer l influence de cette variation sur les résultats du PSAT (rapport)
- ✓ Comparer avec le résultat initial
- ✓ C'est la limite de surcharge obtenir, extrait les profils de la module de tension, phase et puissance

III.2.3 Analyse de réseau avec la méthode de CPF

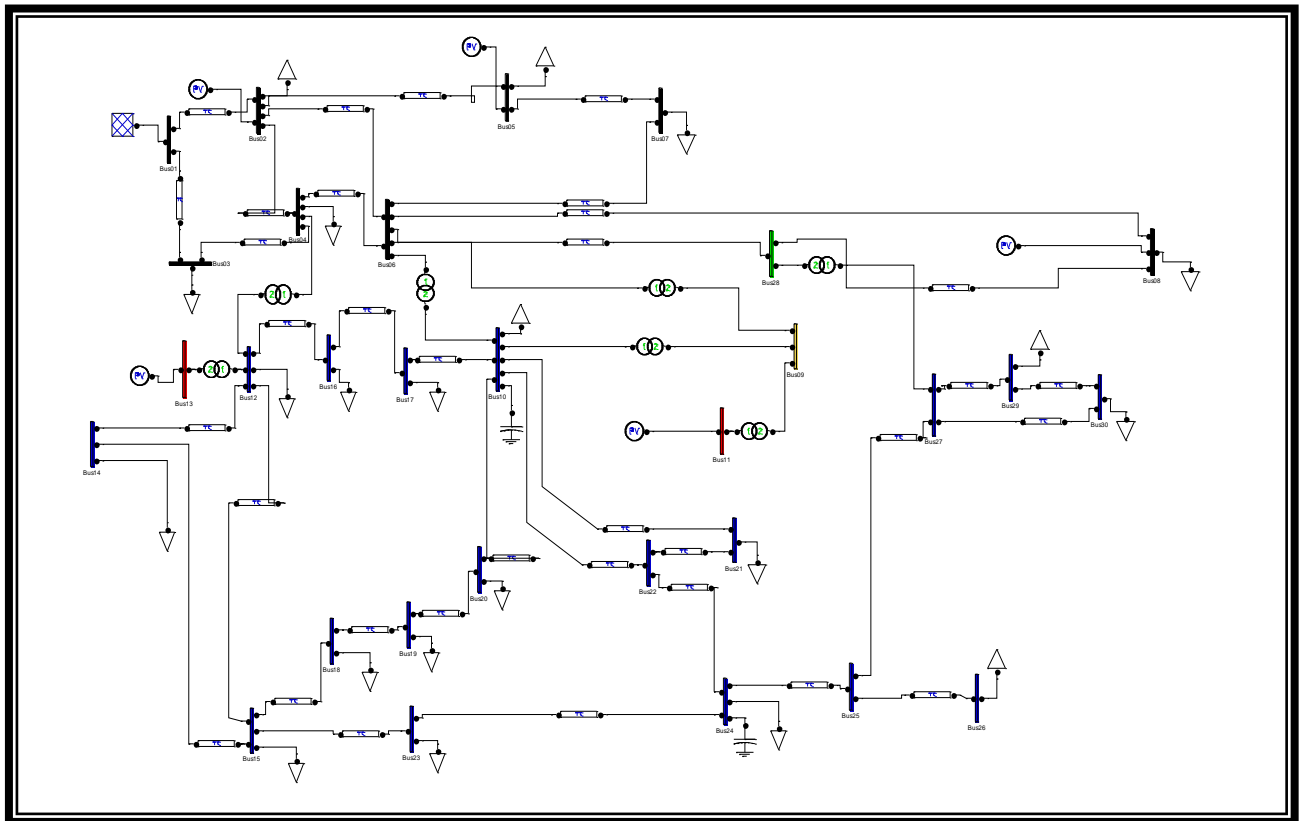


Fig.III.5 : Caractéristique du Modèle d'étude 30JB sans les blocks de générateur

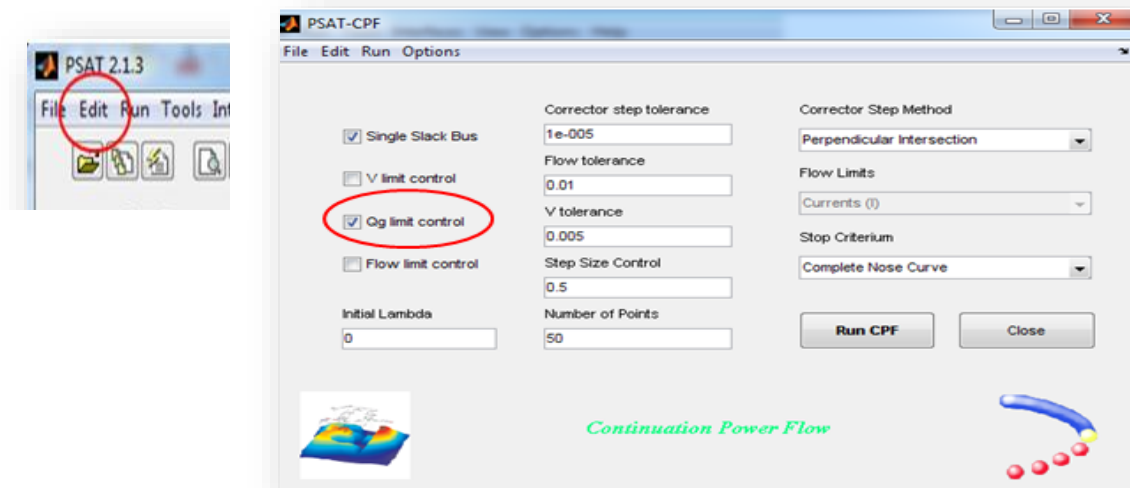


Fig. III.6. La modification du paramètre de CPF

L'étude de 30-JB dans cet état se base sur la méthode de « CPF » (continuation power flow) ; alors la modification du paramètre de CPF comme suite

- ✚ Cliquer sur « Edit »
- ✚ Choisir « CPF Setting »
- ✚ Poser les limites pour la puissance réactive Q.

### III.2.4 L objectif principal de l'analyse par la méthode CPF (continuation power flow)

Le but de 'Ecoulement de puissance continue 'c est l'augmentation graduellement de la charge afin d'arriver au point où le réseau ne peut plus supporter cette charge

Elle permet de :

- ✓ Connaitre la capacité maximale que le réseau peut supporter pour une surcharge
- ✓ Conclure les JB les plus sensibles pour la variation de la charge pour ses JB soit des JB candidat pour un éventuel emplacement des éléments de compensation comme les condensateurs de compensation et les FACTS

Après avoir suivi les étapes ci-dessus ; cliquer sur «Run CPF » pour obtenir les résultats suivant :

**Tableau III.3 : Résultats de l'écoulement de puissance continue (CPF)**

Jeu de Barre (JB)	La tension de JB [pu]	Angle [rad]	Pgen [pu]	Qgen [pu]	Pcharge [pu]	Qcharge [pu]
01	1.06	0	3.9265	3.0181	0	0
02	0.91179	-0.1237	0.6436	0.5	0.34915	0.20434
03	0.8291	-0.19679	0	0	0.03862	0.01931
04	0.78245	-0.2447	0	0	0.12228	0.02574
05	0.75293	-0.45528	0.1609	0.4	1.5157	0.30571
06	0.74431	-0.30342	0	0	0	0
07	0.72767	-0.39298	0	0	0.36685	0.17538
08	0.73191	-0.32699	0.1609	0.4	0.4827	0.4827
09	0.6839	-0.433	0	0	0	0
10	0.62528	-0.56439	0	0	0.09332	0.03218
11	0.71994	-0.38985	0.19308	0.24	0	0
12	0.65716	-0.52339	0	0	0.18021	0.12067
13	0.70378	-0.46491	0.19308	0.24	0	0

14	0.62503	-0.58737	0	0	0.09976	0.02574
15	0.622	-0.59675	0	0	0.13194	0.04022
16	0.64069	-0.55148	0	0	0.05631	0.02896
17	0.61645	-0.57783	0	0	0.14481	0.09332
18	0.58757	-0.64256	0	0	0.05149	0.01448
19	0.57635	-0.65482	0	0	0.15285	0.05471
20	0.58601	-0.63599	0	0	0.0354	0.01126
21	0.58765	-0.60192	0	0	0.28157	0.18021
22	0.58844	-0.601	0	0	0	0
23	0.58047	-0.6286	0	0	0.05149	0.02574
24	0.54601	-0.63739	0	0	0.13998	0.1078
25	0.54658	-0.64356	0	0	0	0
26	0.48783	-0.68852	0	0	0.05631	0.03701
27	0.57628	-0.62199	0	0	0	0
28	0.71731	-0.3279	0	0	0	0
29	0.49992	-0.74524	0	0	0.03862	0.01448
30	0.45569	-0.85356	0	0	0.17055	0.03057

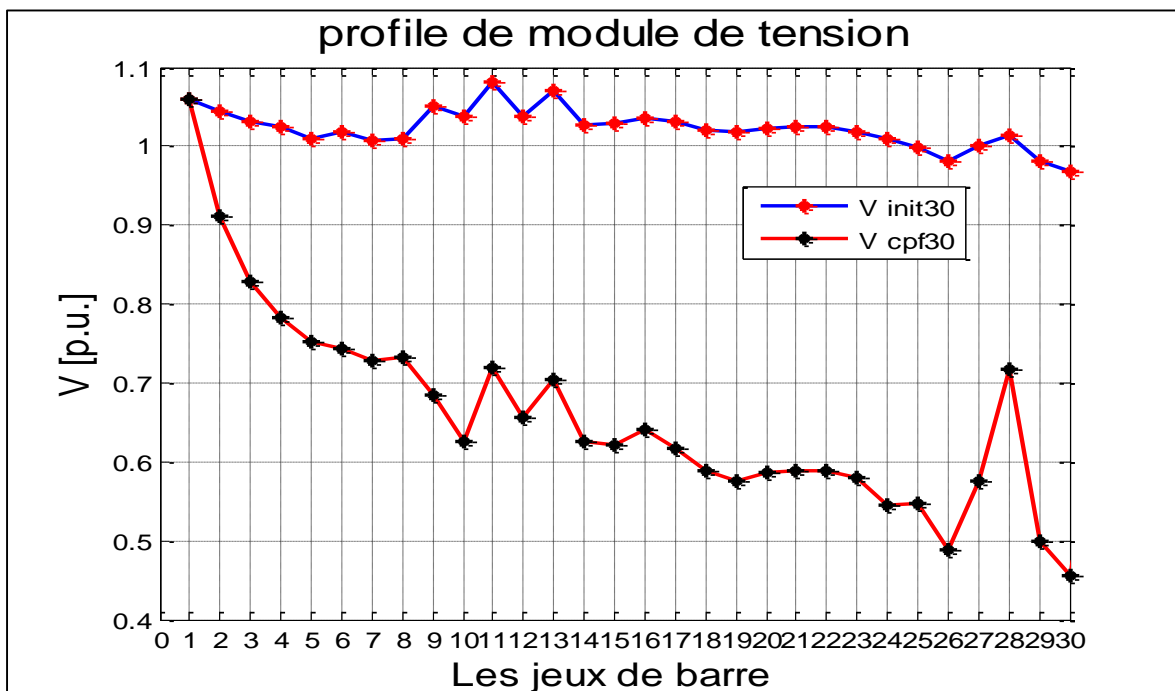


Fig.III.7.. Profile de Variation des modules de tension entre  $V_{int}$  et  $V_{CPF}$  de chaque JB



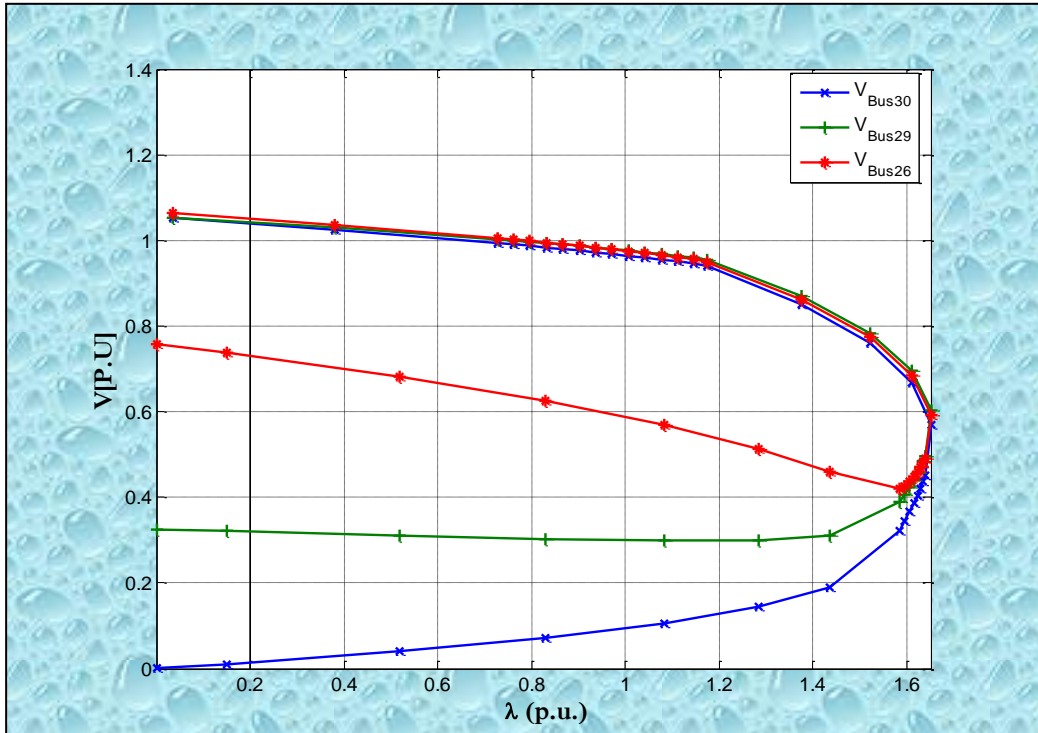


Fig.III.8. Coefficient de surcharge maximale

### III.2.5 Comparaison et interprétation

La figure (III.7) peut expliquer comme suite

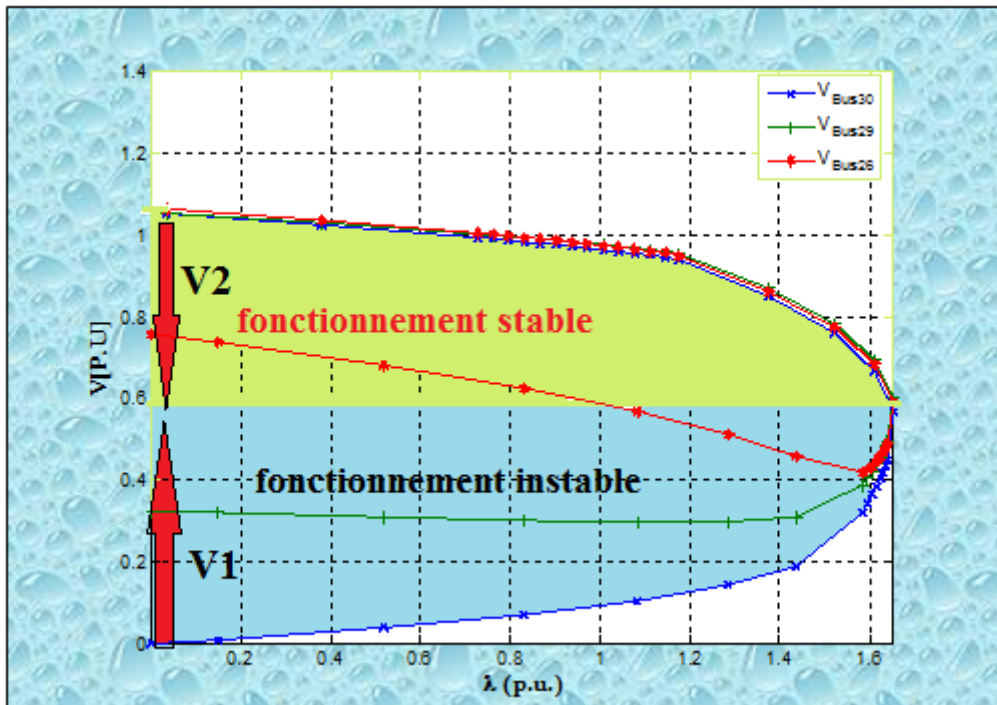


Fig.III.9. Coefficient de surcharge maximale

✚ D'après les résultats de « Run CPF » on constate que  $\lambda_{\max} = 1.6517$

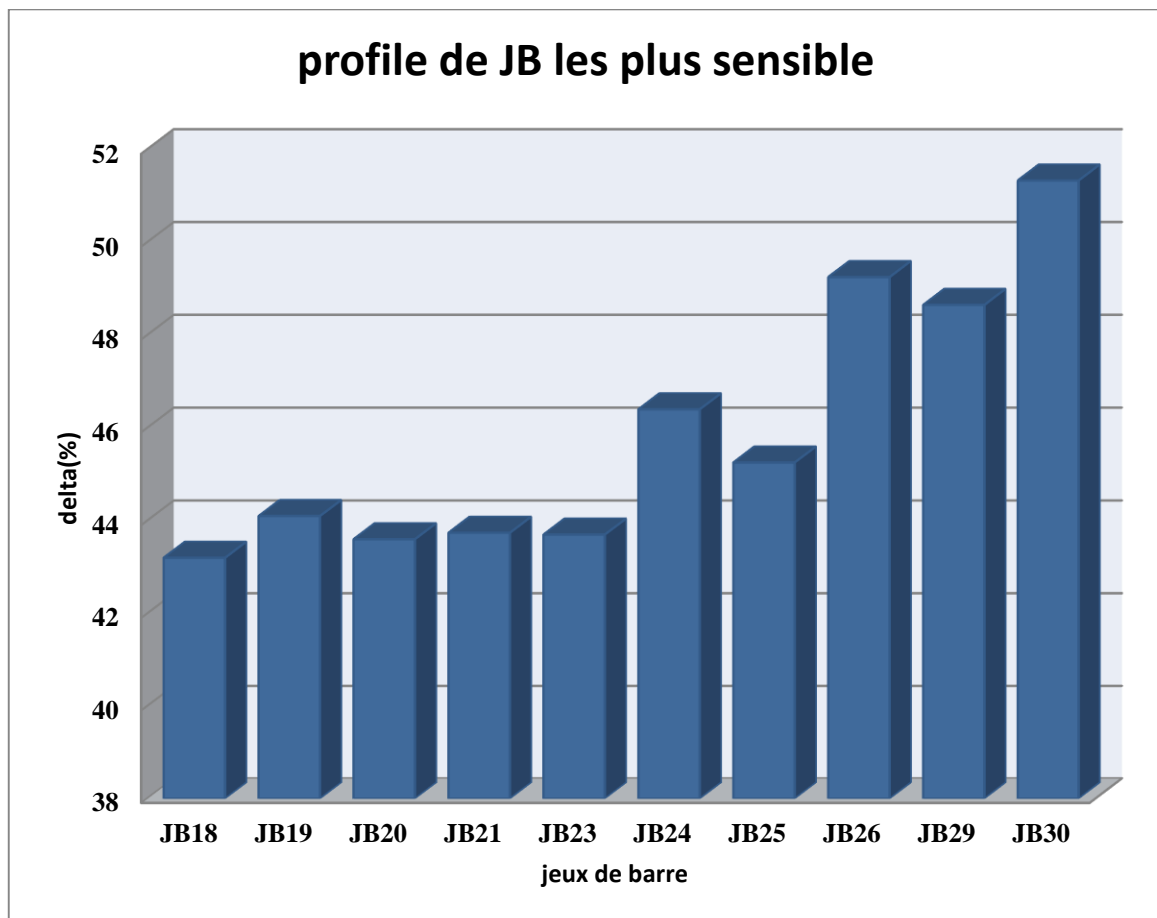
$\lambda_{\max}$  : Le facteur de charge maximal que le réseau peut supporter sans perdre sa stabilité c'est à dire notre réseau peut supporter 65.17% de la charge sans perdre sa stabilité, après cette valeur le réseau sera instable

✚ A partir de les deux profile de module de tension on peut extraire les variations de les charges les plus évidentes

**Tableau III.4** .la variation de module de tension entre l'état initiale et l'analyse par CPF

Nb de JB	18	19	20	21	22	24	25	26	29	30
$\Delta V\%$	43.2	44.13	43.6	43.74	43.7	46.41	45.25	49.33	48.65	51.33

$\Delta V$  : la variation du module de tension entre l'état initial et l'état de l'analyse par la méthode CPF ( $\Delta V = V_{\text{init}} - V_{\text{CPF}}$ )



**Fig.III.10** :profile de JB sensibles par la méthode CPF

### III.3. Analyse par la compensation FACTS

#### III.3.1. Choix optimal de l'emplacement du SVC/ STATCOM

Tension de référence du SVC/STATCOM est fixe Dans cette phase le compensateur SVC / STATCOM est installé dans le réseau afin résoudre le problème de variation de tension du au chutes de tensions et aussi aux problèmes liés aux sur tensions. Pour ce cas la tension de contrôle du SVC/ STATCOM est considéré fixe. Au début nous avons intégré le SVC/ STATCOM au JB les plus sensibles puis le comportement du réseau est évalué par l'intégration du SVC/ STATCOM dans différents points. la figure suivante représente l'emplacement de compensateur SVC/STATCOM 30JB bien sur au JB sensible.

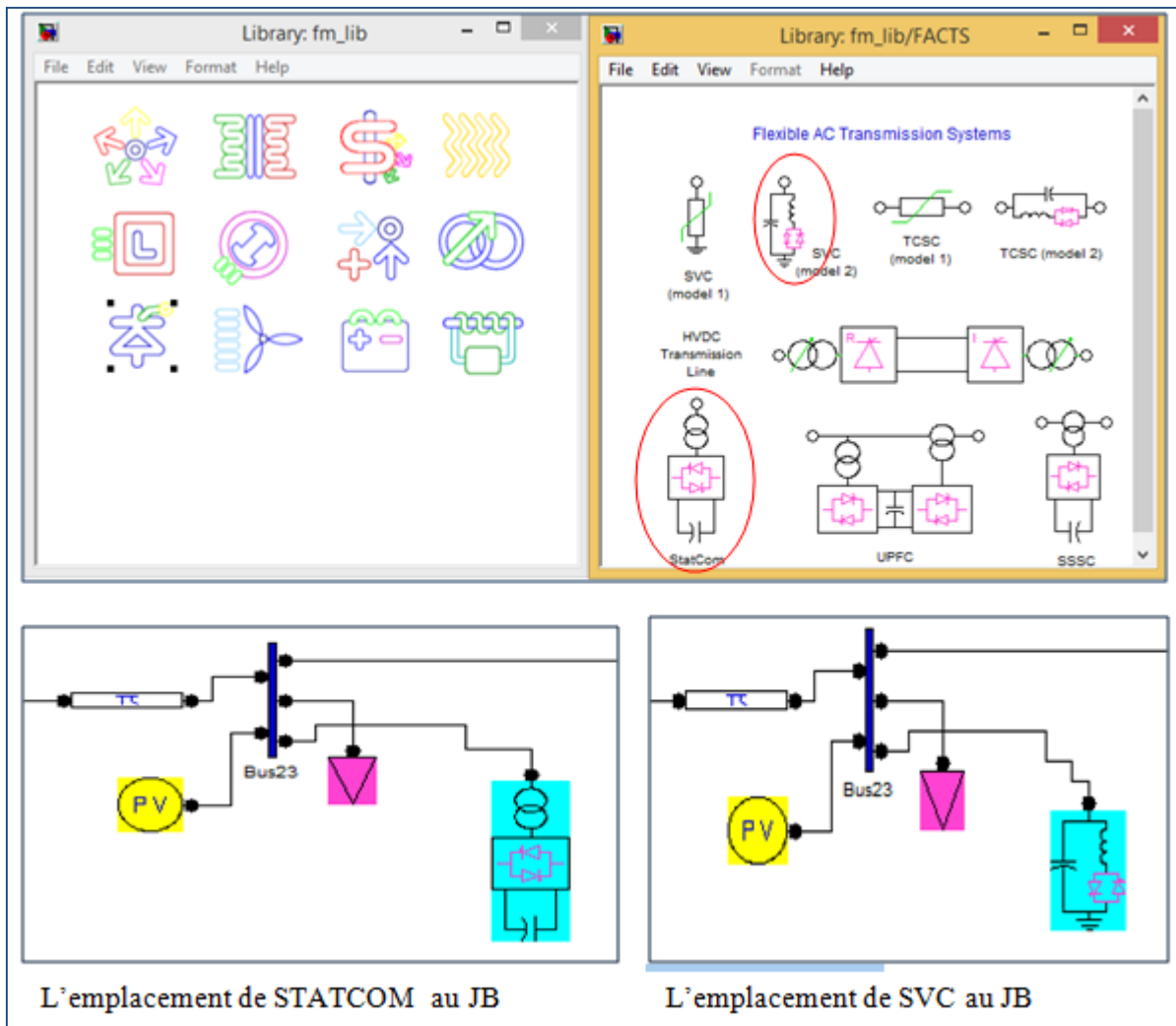
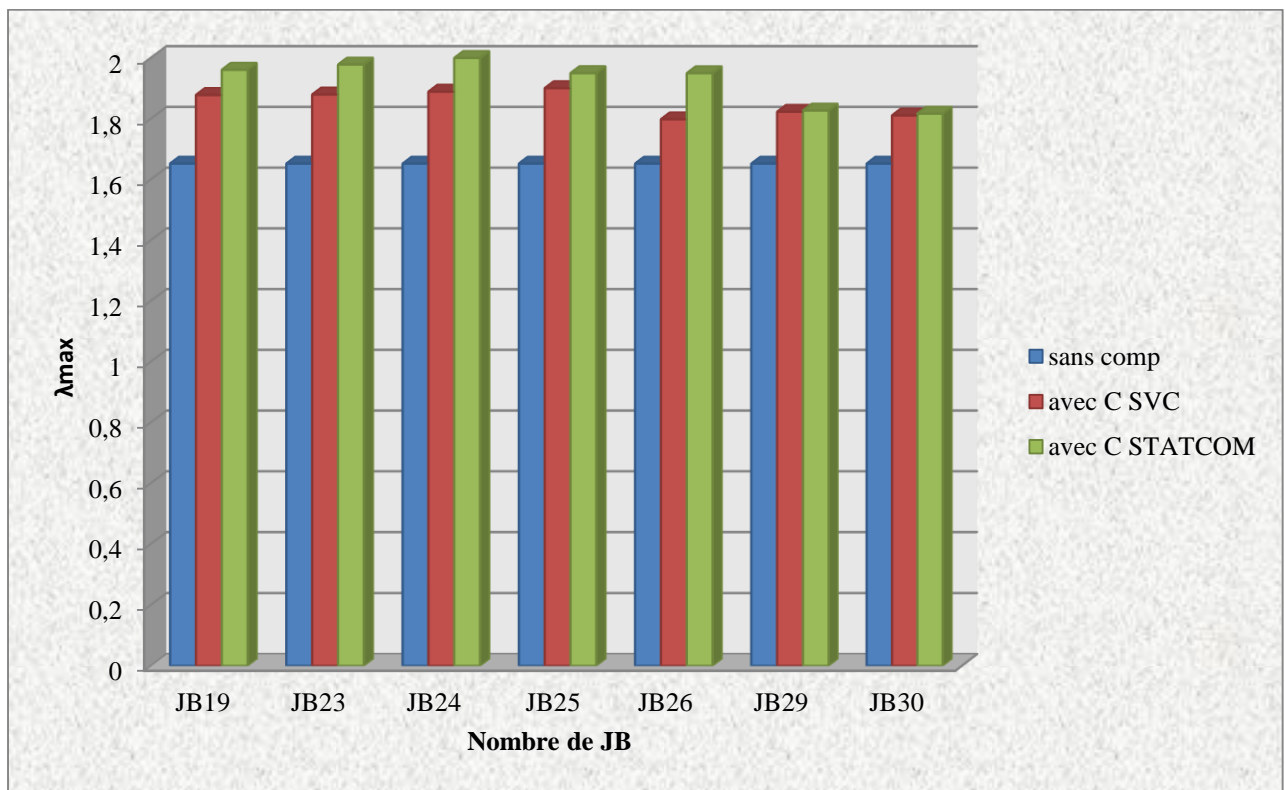


Fig.III.11: Les étapes de l'emplacement du compensateur SVC/STATCOM.

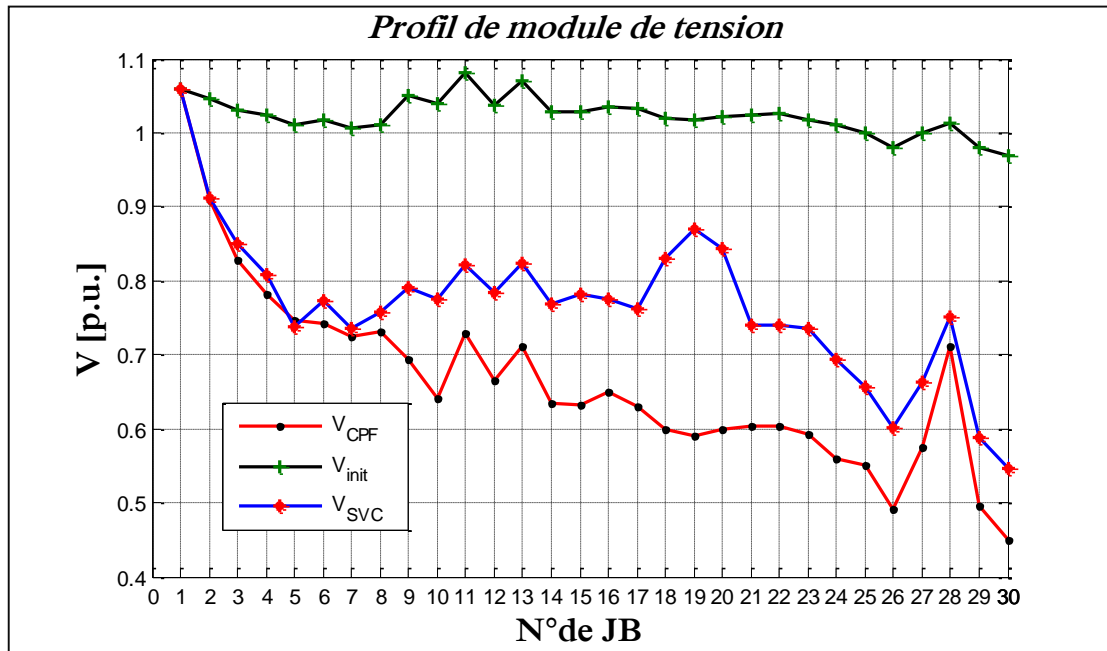
**Tableau III.5** : le facteur de charge maximale pour le cas de compensation avec le SVC ou le STATCOM

	Nombre de JB	JB19	JB23	JB24	JB25	JB26	JB29	JB30
$\lambda_{max}$	Le compensateur SVC	1.8778	1.8722	1.8887	1.9002	1.7976	1.8223	1.8102
	Le compensateur STATCOM	1.9608	1.9779	2.0153	1.9498	1.9498	1.8262	1.8162

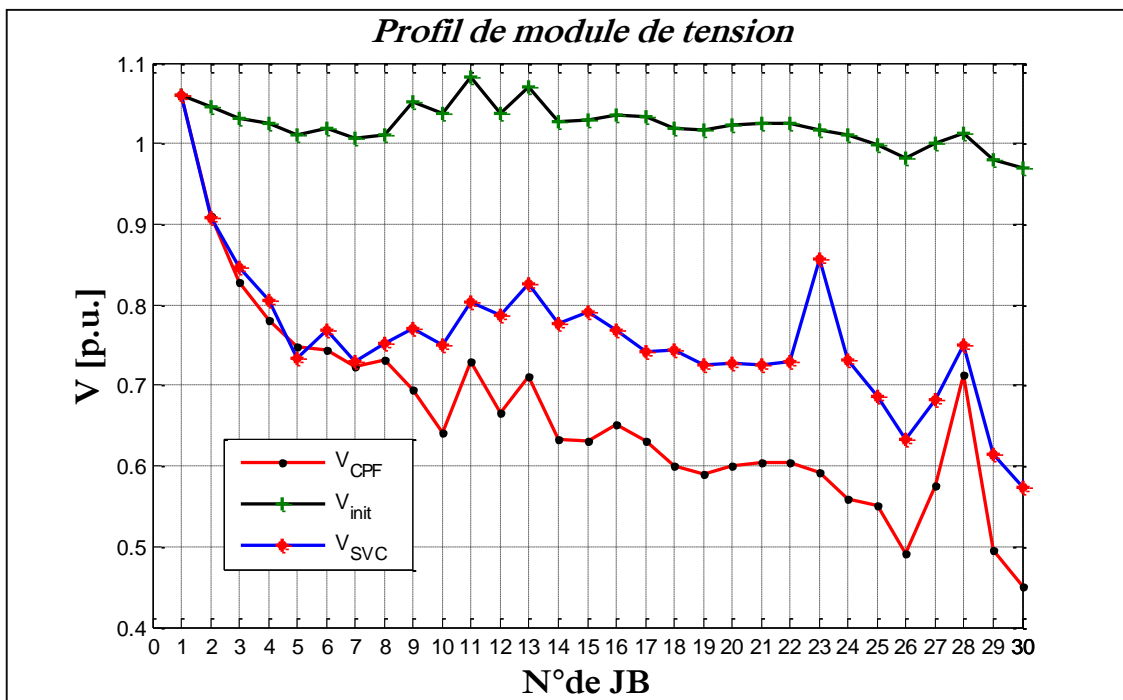
**Fig.III.12.** Variation de facteur de charge sans compensation et avec compensation (SVC /STATCOM) au niveau de JB sensible

Les figures suivantes, illustrent clairement les résultats de programmation correspondant à cette étape. Nous avons présenté la variation des modules de tension état initiale, sans compensation et avec compensation au niveau des différents points dans le réseau.

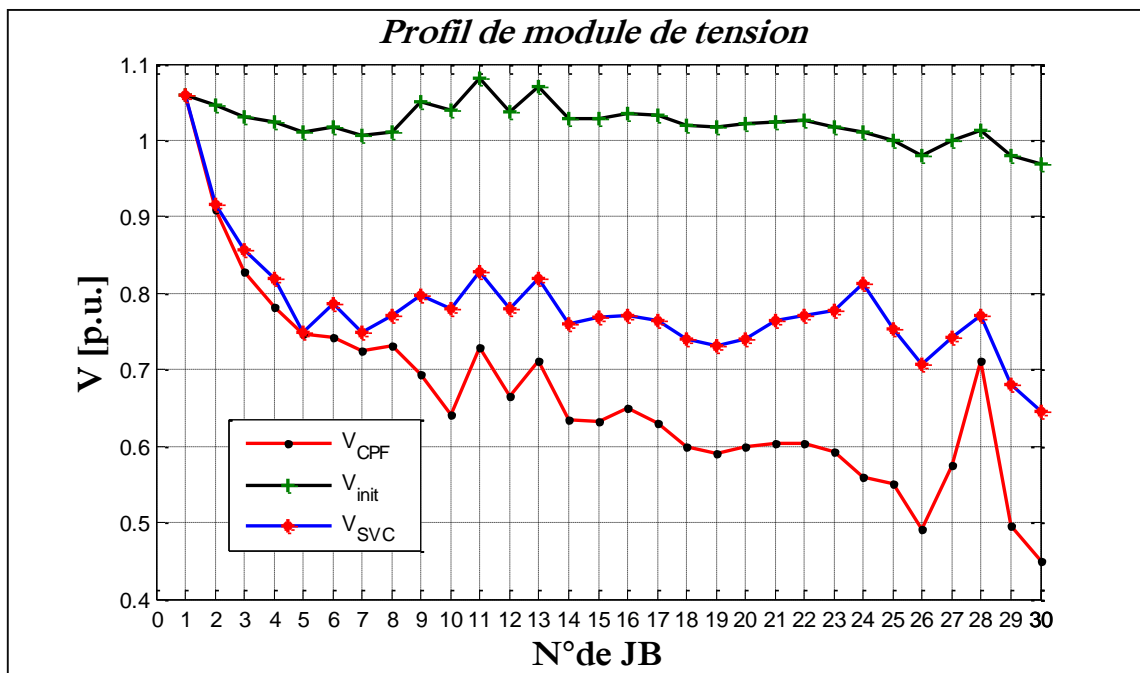
Fig (III.12), Fig(III.13), Fig(III.14), Fig(III.25), Fig(III.17), Fig(III.18) et Fig(III.19) montrent les tensions aux niveaux des jeux de barres, pour un seul **SVC** installée au niveau au jeu de barre sensible



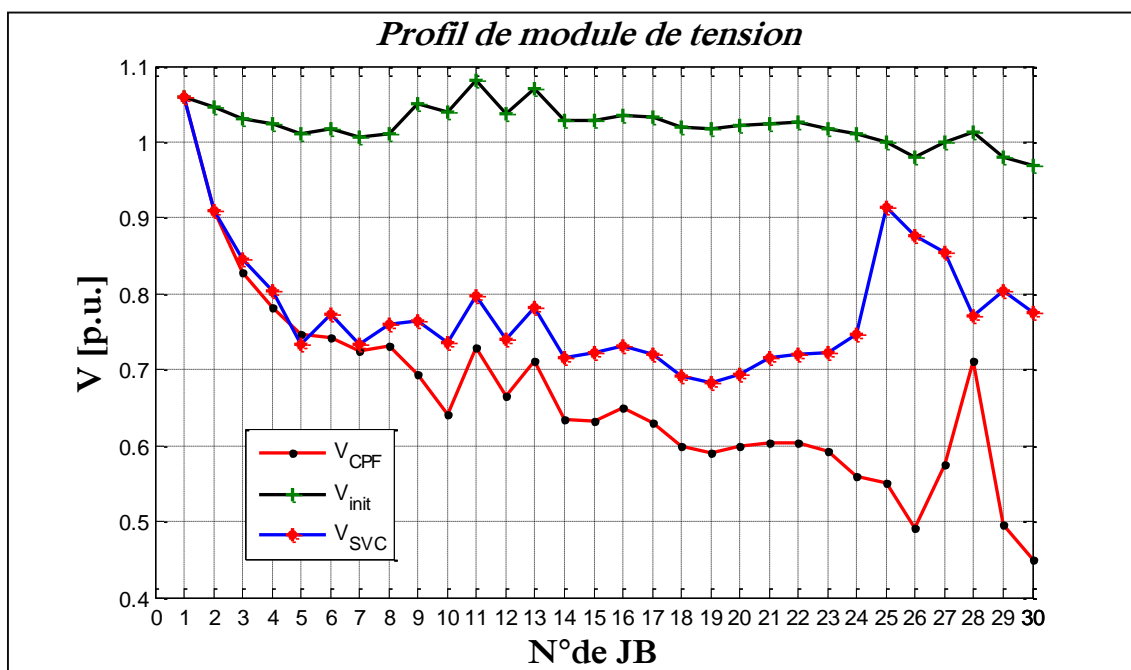
**Fig.III.13.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19



**Fig.III.14.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23



**Fig.III.15.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24



**Fig.III.16.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25

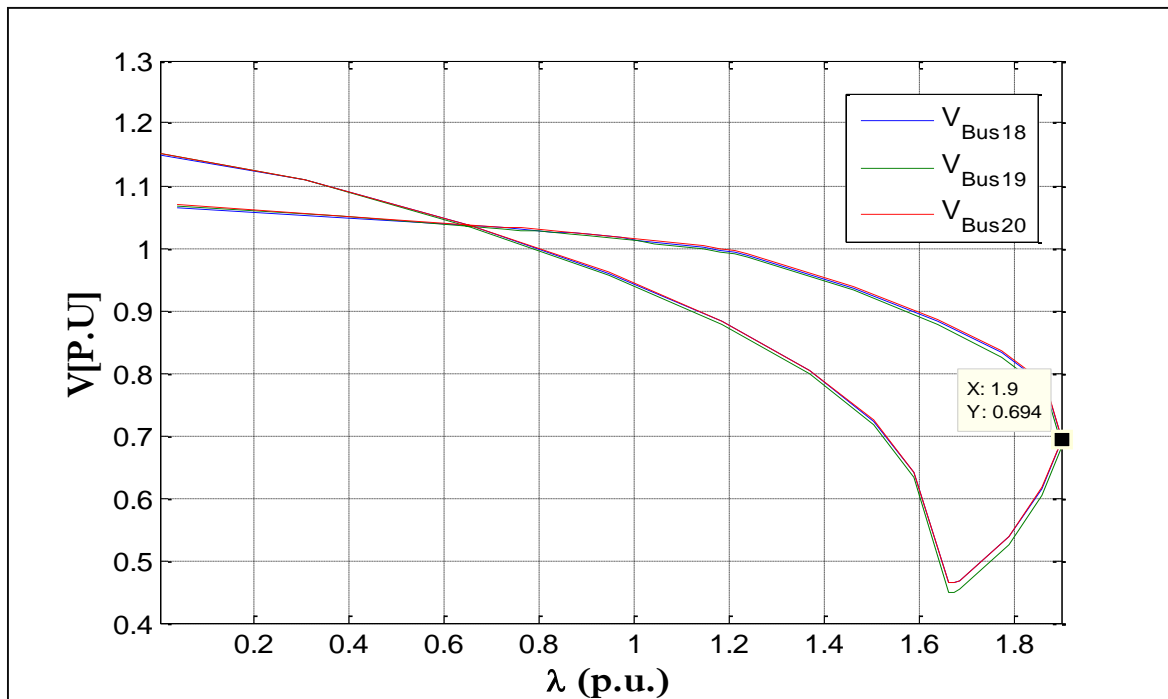


Fig.III.17.Coefficient de surcharge maximale JB N°25

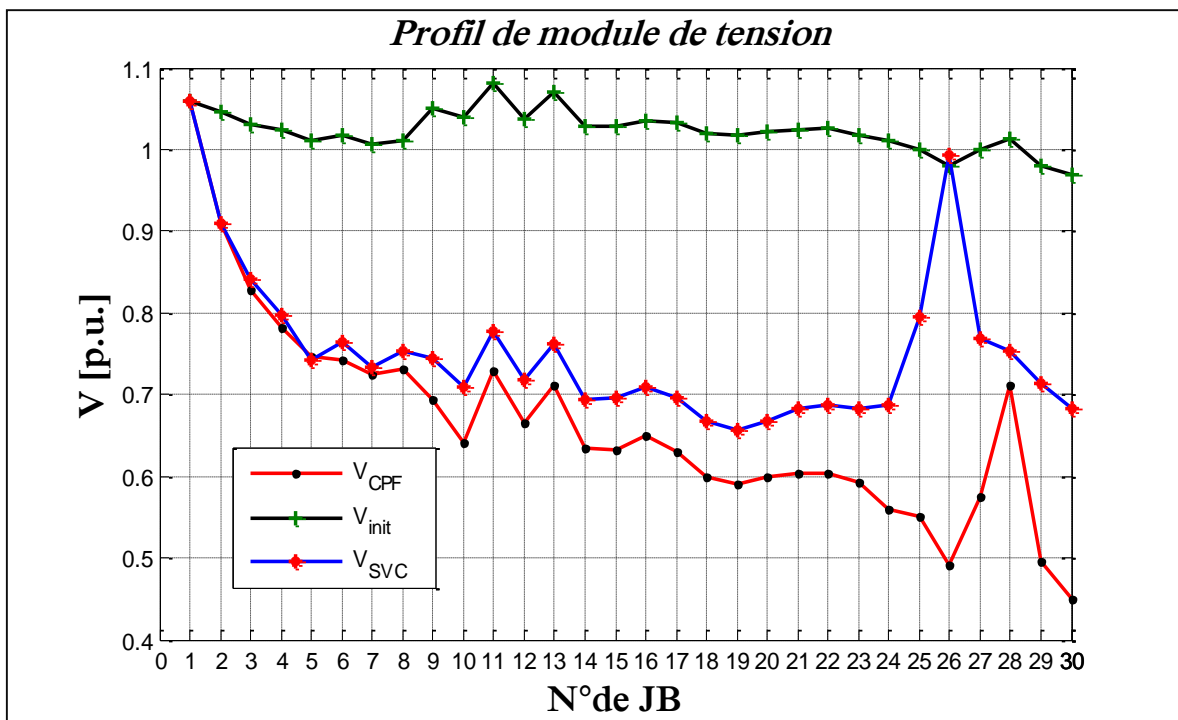
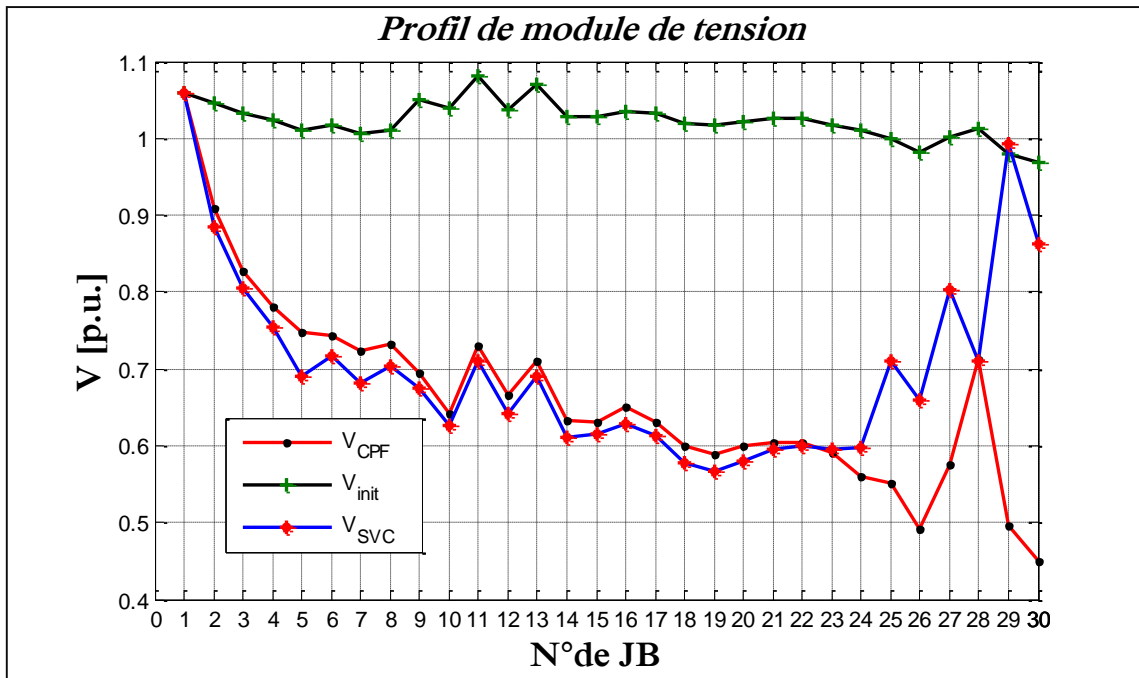
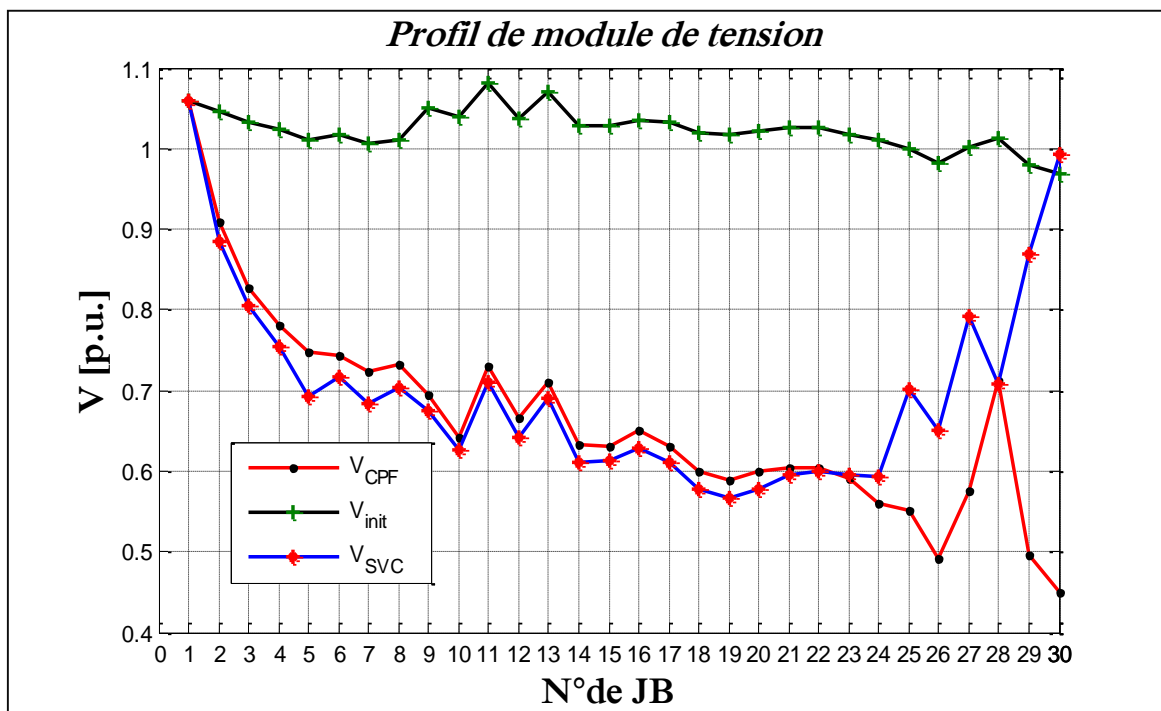


Fig.III.18.Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°26



**Fig.III.19.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°29



**Fig.III.20.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°30



Fig (III.20), Fig(III.21), Fig(III.22), Fig(III.24), Fig(III.25), Fig(III.25) et Fig(III.27) montrent les tensions aux niveaux des jeux de barres, pour un seul **STATCOM** installée au niveau au jeu de barre sensible

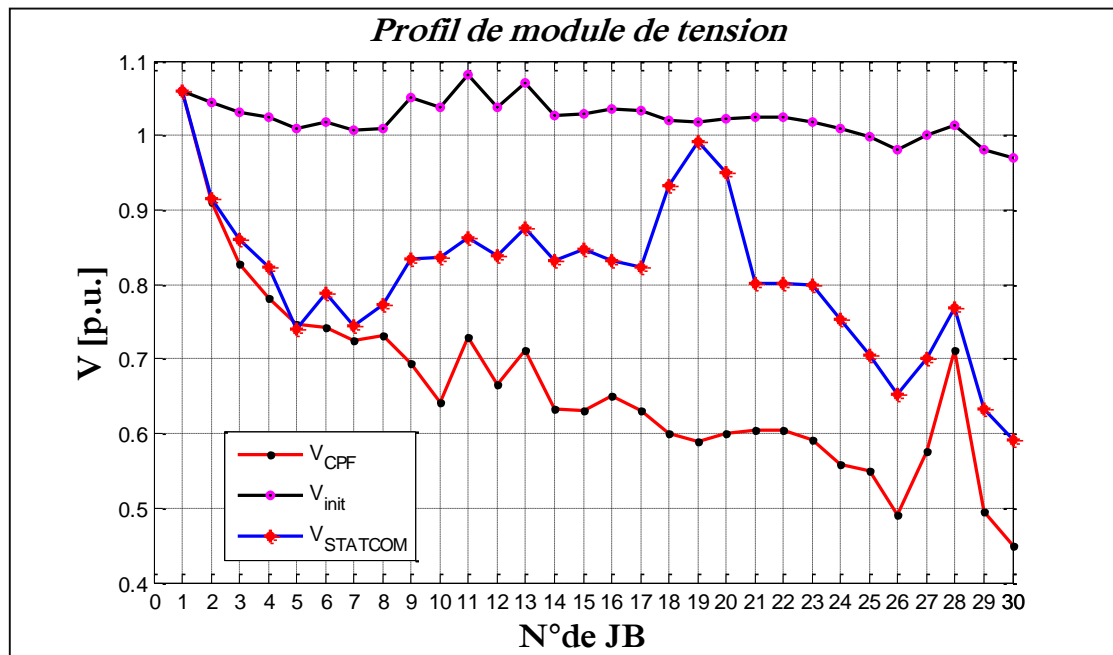


Fig.III.21. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19

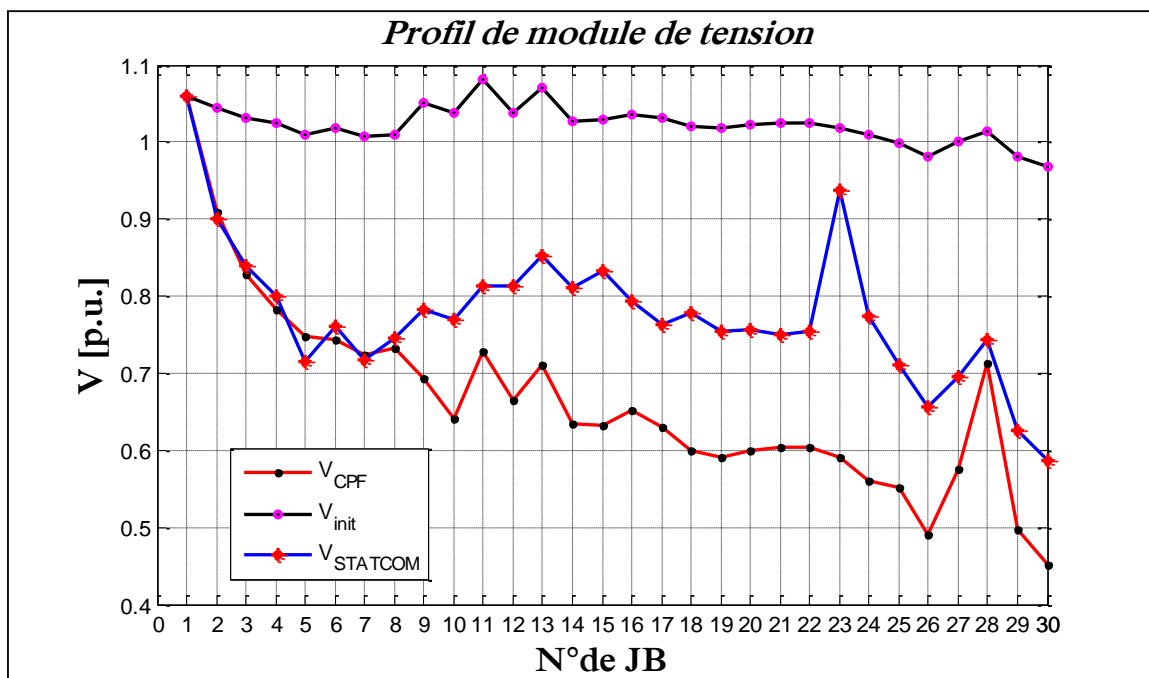


Fig.III.22. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23

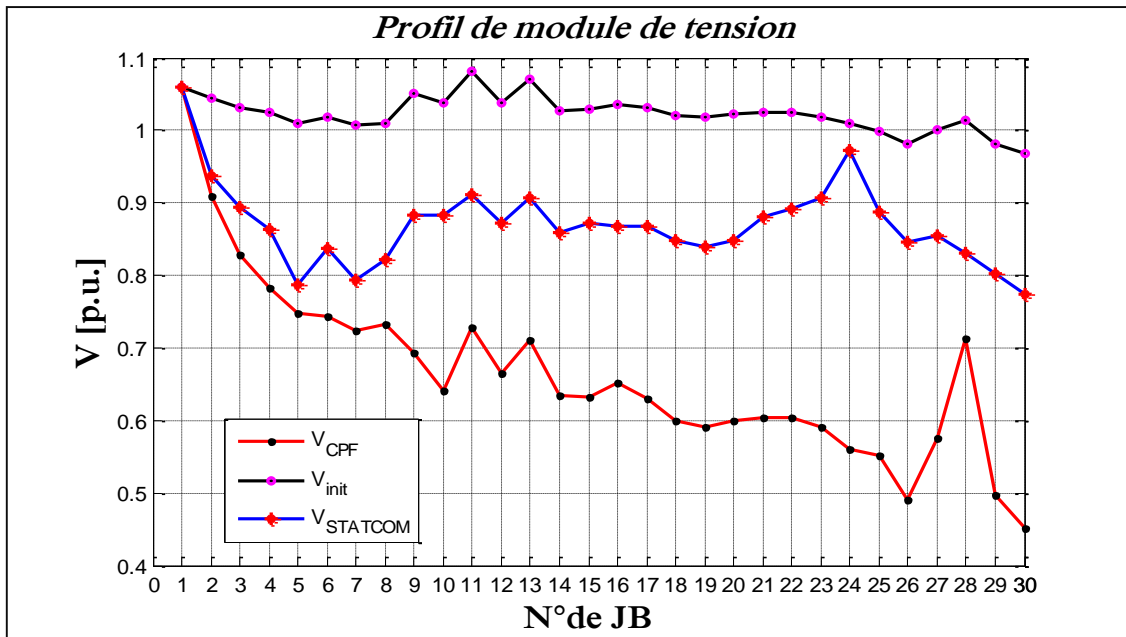


Fig.III.23. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24

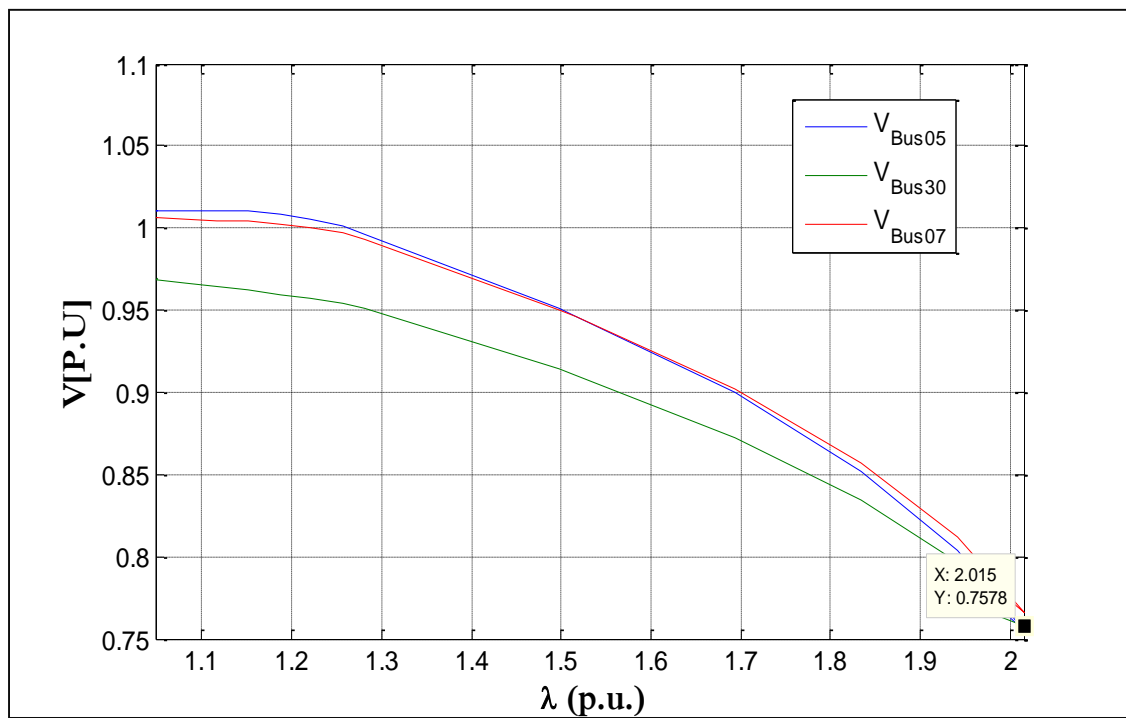


Fig.III.24. Coefficient de surcharge maximale JB N°24

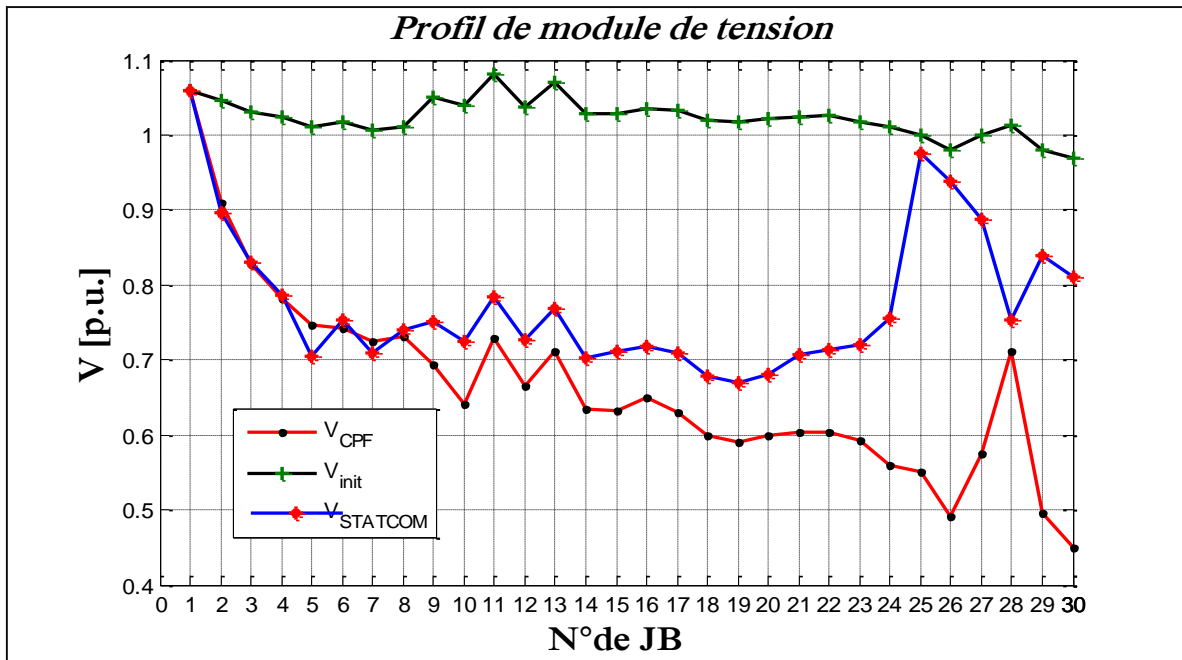


Fig.III.25. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25

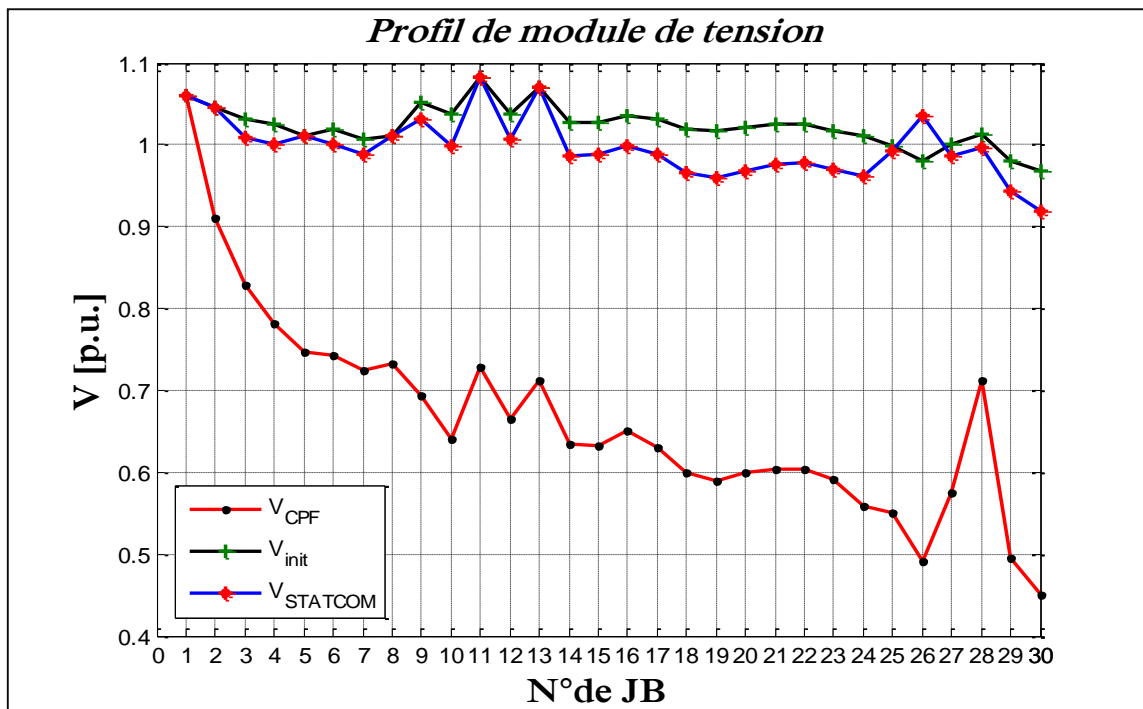


Fig.III.26. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°26

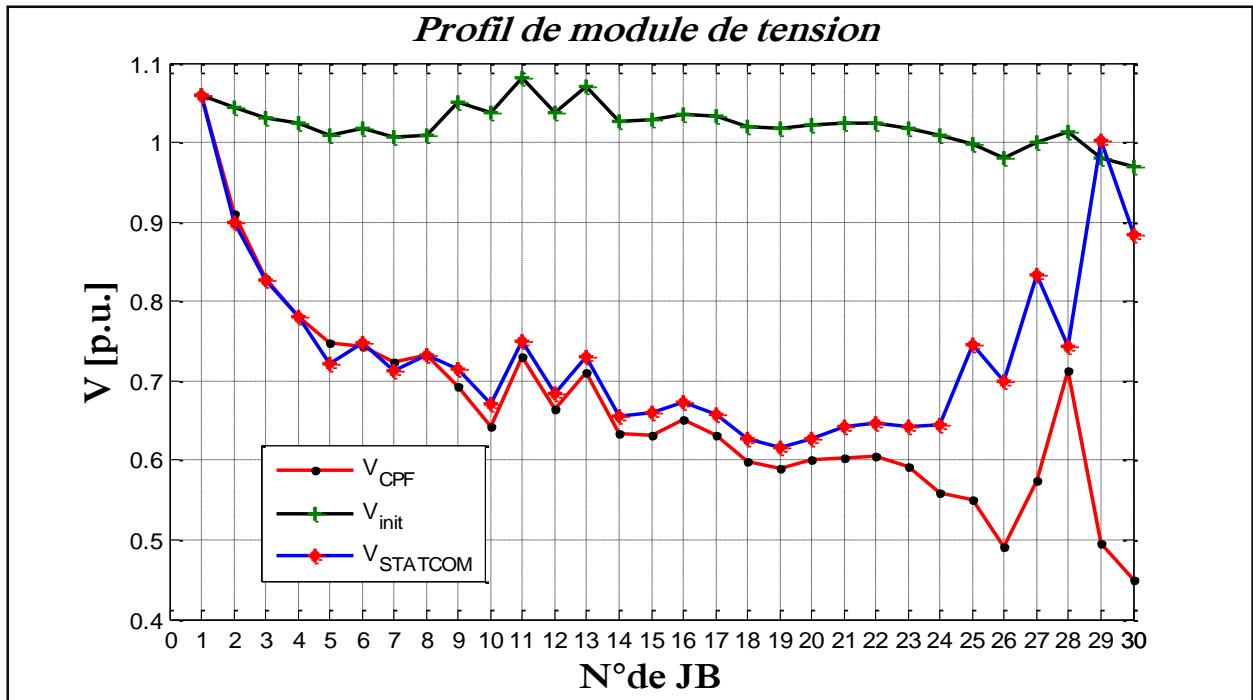


Fig.III.27. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°29

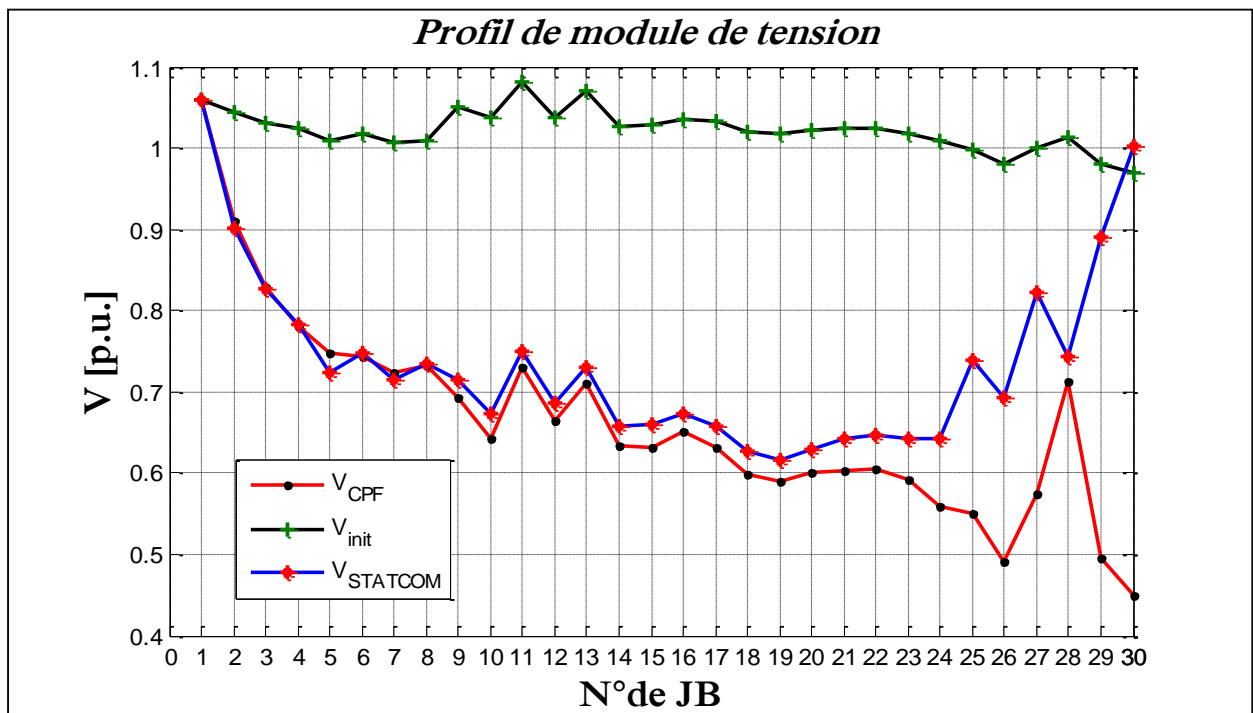


Fig.III.28. Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°30

III.3.2. Etude comparative entre le SVC et le STATCOM

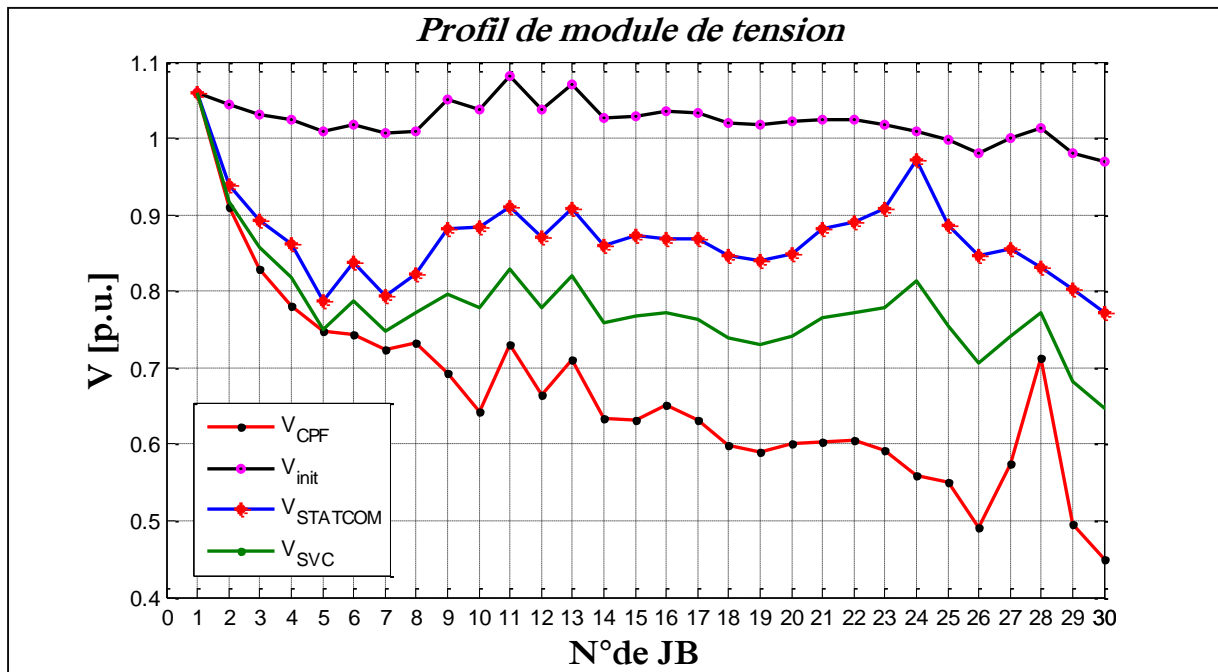


Fig.III.29 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24(meilleure emplacement de STATCOM)

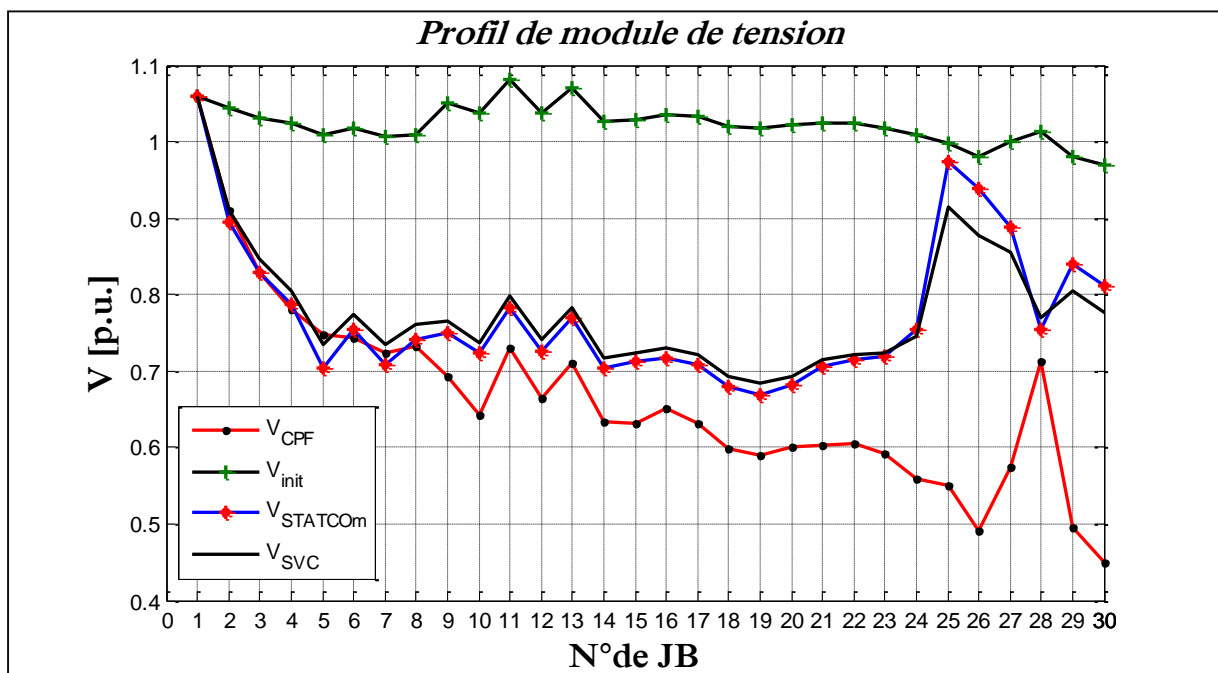
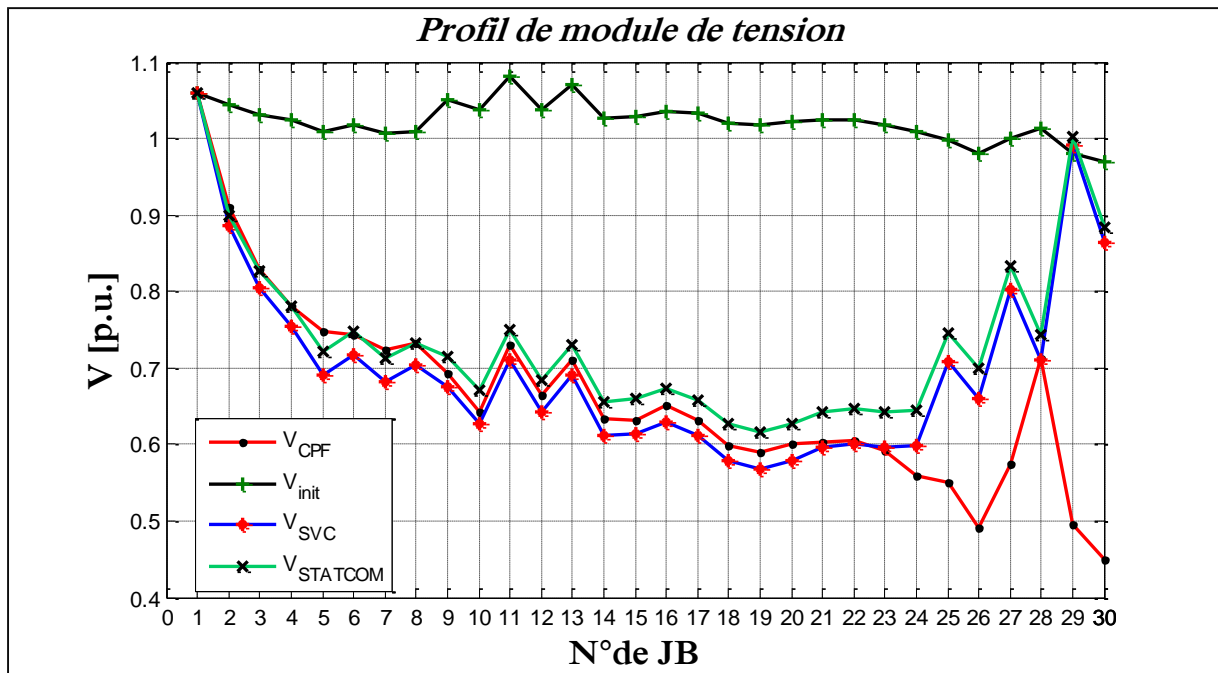


Fig.III.30 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°25(meilleure emplacement de SVC)



**Fig.III.31.** Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N° 30 ( $\lambda_{\max\_SVC} = \lambda_{\max\_STATCOM}$ )

#### III.4. Discussions des résultats

D'après les courbes précédentes, on peut remarquer qu'après compensation par un seul SVC ou un seul STATCOM le profil de tension s'améliore relativement à l'emplacement de ces derniers.

Dans le cas où la compensation avec le SVC est placée au niveau du jeu de barre 19, 23, 25, 26, 29, et 30 le profil de la tension s'est amélioré mais d'une façon très faible représentant des chutes de tension au niveau du jeu de barre qui rendent leur tension au dessous de la normale

Après la détermination du JB fragile du réseau considéré et qui a besoin d'être soutenus, les valeurs nominales du STATCOM doivent être choisies, il est à prévoir que par l'introduction du STATCOM aux nœuds critiques, le profil de tension sera plat et le facteur de charge du système va augmenter

Quand le STATCOM est connecté au JB24 on observe, d'après la figure (III. ) que ont un profil de tension plus plat que l'état de sans compensation et introduire le STATCOM va augmenter le facteur de charge à la valeur maximale. Comme attendu, survient à une valeur de charge supérieure  $\lambda = 2.0153P.U$

Les profils des tensions du cas de sans compensation et du système avec le SVC ou bien le STATCOM sont illustrés à la figure (III.). Il est évident à partir de cette figure que le dernier fournit un meilleur profil de tension au point d'effondrement de tension comparé à l'état de base. Cela est dû au fait que le STATCOM est installé au nœud le plus faible.

### **Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en y insérant deux systèmes FACTS : le STATCOM (**Static Synchronous Compensator**), et le SVC (**Static Var Compensator**).

Le réseau utilisé pour les simulations est le réseau d'IEEE\_30 JB. L'analyse des performances du réseau porte sur le support du profil de tension. l'augmentation de la stabilité en tension et la diminution des pertes actives et réactives et ce, pour l'effondrement de tension.

Le programme utilisé est un logiciel de calcul d'écoulement de puissance (PF) et le calcul continu de l'écoulement de puissance (CPF) le PSAT.D après les résultats on a constaté que l'intégration ou le recoure de FACTS a réellement améliore notre réseau

# *Chapitre IV*





## Introduction

malgré les FACTS donne des bons résultats pour l'amélioration de notre réseau au chapitre précédent, mais le développement du réseau électrique (extension, la surcharge ...) inévitable c'est à dire l'évolution de la charge est toujours disponible. Cela nécessite la construction de centrales électriques, tout en évitant le problème de la pollution et pour éviter ce dernier nous allons avoir intégré une source d'énergie renouvelable. Dans ce chapitre on va intégrer une source photovoltaïque et voire calculer l'écoulement de puissance continu et le facteur de charge par le logiciel PSAT 2.1.9

### IV.1 Le besoin de l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le Réseau électrique

Une des conséquences de l'ouverture du marché de l'électricité est le développement d'une production décentralisée, de sources d'énergie renouvelable.

L'intégration dans les réseaux électriques des sources à énergie renouvelables, et plus particulièrement celles soumises aux aléas du climat telles que les énergies éolienne et solaire, et d'une manière plus générale de la production décentralisée va nécessiter d'importants aménagements de ces réseaux, ainsi que la mise en œuvre de nouveaux équipements et de nouvelles méthodes de gestion. Le défi est de maintenir la fiabilité et la qualité de l'alimentation des particuliers et des entreprises en énergie électrique malgré la libéralisation du marché de l'électricité et l'utilisation croissante de sources à énergies renouvelables [HEI 05].

### IV.2 Les avantages d'intégration des sources d'énergie renouvelable

- ✚ Sources inépuisables (n'est pas limitée), par contre les centrales classiques sont épuisables.
- ✚ Réduction de dégagement des gazes toxiques, par contre les centrales classiques (effet de serre, le trou de zone).
- ✚ Augmentation de la durée de vie des réserves des fossiles.
- ✚ Minimisation de prix de consommation.

### IV.3 Les inconvénients d'intégration des sources d'énergie renouvelable

- ✚ L'intégration déstabiliser le réseau.
- ✚ La limitation de la quantité d'énergie renouvelable intégrée au réseau

## VI.4.Méthode d'analyse

Pour l'intégration d'une source photovoltaïque au réseau 30jb on a travaillé avec le logiciel PSAT 2.1.9 qui contient de modèle de générateur PV au contraire les versions précédent

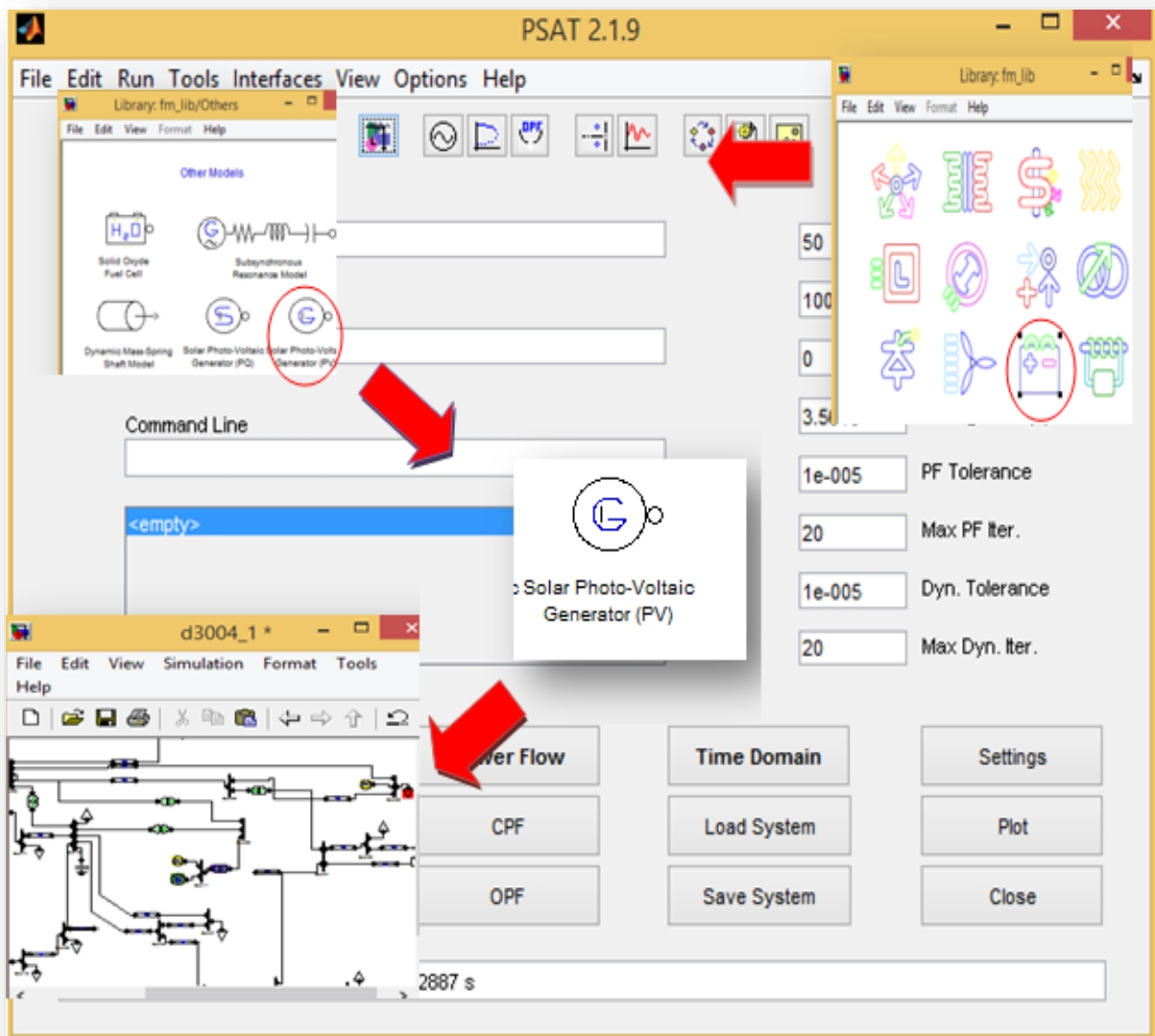
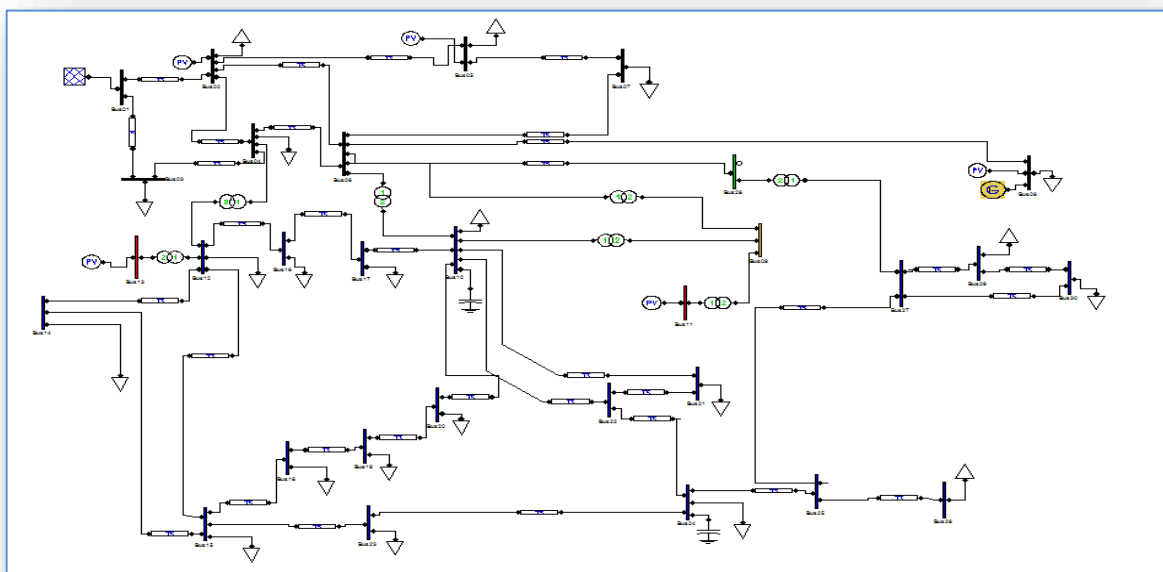


Fig.VI.1: Page d'accueil du PSAT et leur bibliothèque de Simulink

Dans ce chapitre nous devons traiter les points suivants :

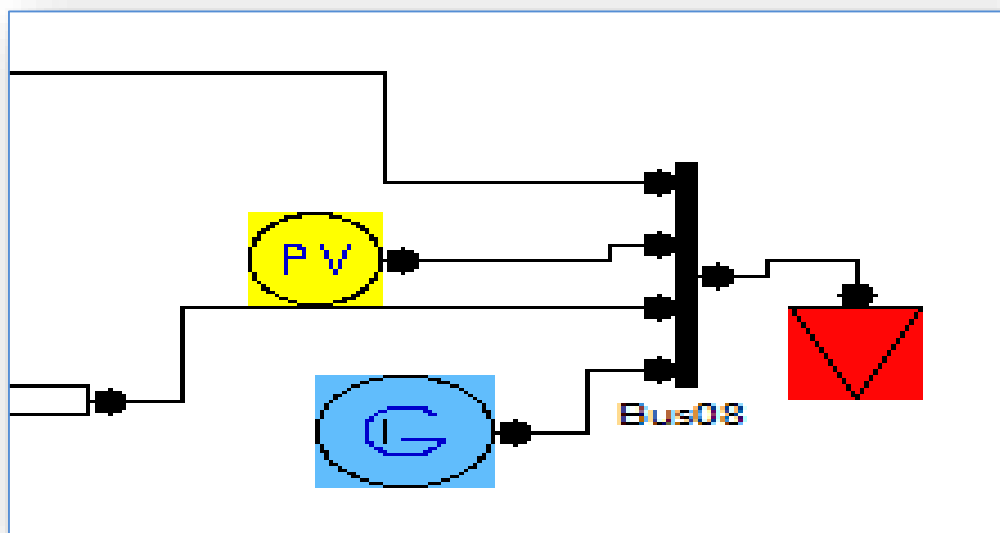
- ✓ Garder la même puissance de nature différente
- ✓ Intégrer le générateur photovoltaïque au JB de génération 50% par rapport à la puissance générée du JB puis de 80%, et voir l'influence de changement de la nature de la puissance générée sur l'écoulement de puissance continue « CPF »



**Fig.IV.2 :** Intégration un photovoltaïque dans le réseau de 30JB

#### IV.5 Influence du lieu d'une source photovoltaïque

Dans ce cas, on va calculer le taux d'intégration dans notre modèle d'étude (réseau de 30 JB) avec source photovoltaïque et en observant le comportement statique du modèle et calculer l'écoulement de la puissance continue après la pose de 5MW de puissance active dans le générateur photovoltaïque et le même dans le générateur de PV et en observant le comportement statique du modèle.



**Fig.VI.3 :** L'emplacement de générateur photovoltaïque au JB de générateur le JB08

Le taux d'intégration : c'est la puissance active générée au JB qui nous a intégré la source photovoltaïque divisé par la somme des puissances active par chaque JB de génération (la puissance total)

Dans notre cas le taux d'intégration au niveau du JB08 = 11%

Le facteur de charge maximale de l'état initial = 1.6512

Les résultats de calcul de CPF après l'intégration donne :

- Pour 50% →  $\lambda_{\max} = 2.3127$
- Pour 80% →  $\lambda_{\max} = 2.2834$

#### IV.5.1. Discussions au résultat

Malheureusement, cette méthode nous a donné des résultats déraisonnables. Ceci peut s'expliquer par les obstacles de la version de logiciel qui nous ont fait changer d'aspect en changeant les caractéristiques de la génératrice, c'est-à-dire en rendant la valeur d'énergie réactive  $Q_{\max}$  et  $Q_{\min}$  égale à zéro, de sorte que cette dernière devient équivalente à une source d'énergie produisant du courant continu (photovoltaïque), la l'élimination de la puissance

réactive au niveau du JB08 sera montré par la figure ci-dessous

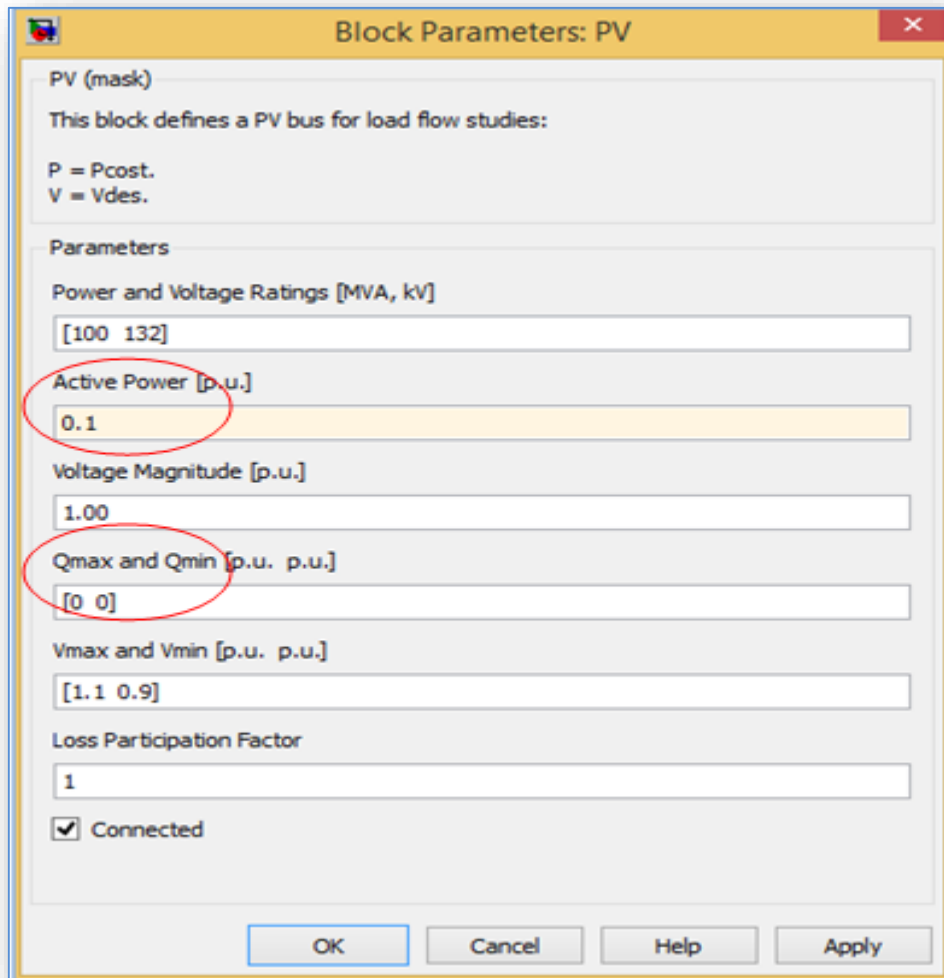


Fig.IV.4 : Changement du paramètre de génératrice PV

### VI.6. Les résultats obtenus :

Le facteur de charge maximale  $\lambda_{max} = 2.97$ ; Les résultats trouvés sont invraisemblables.

Par la logique le facteur de charge maximale dans ce cas normalement être inférieur à la valeur initiale de ce dernier ( $\lambda_{max_{inti}} = 1.65$ ), lorsque on a intégré une source complètement qui n'a pas de puissance réactive c'est à dire une source en continue (photovoltaïque) et on respect les limite de la puissance réactive donc la capacité du réseau à répondre à la demande d'énergie réactive réduite

Puisque toutes nos tentatives d'analyse de la stabilité statique du réseau en présence d'énergie photovoltaïque ont échoué on a pensé d'une nouvelle solution qui nous permet d'analyser cette dernière .alors on va analyser notre réseau IEEE30JB avec le MATPOWER

# MATPOWER



**Fig.VI.5** : le signe de programme MATPOWER

## VI.6.1. Qu'est-ce que le MATPOWER [ZIM 11]

MATPOWER est un ensemble de fichiers M en langage Matlab libre et gratuit pour résoudre les problèmes de simulation et d'optimisation du système d'alimentation en régime permanent tels que l'écoulement de puissance (PF), l'écoulement de puissance continu (CPF), l'écoulement de puissance optimal extensible (OPF) engagement unitaire (UC) et stochastique, sécurisé multi-intervalle OPF / UC. Il est conçu comme un outil de simulation pour les chercheurs et les éducateurs, facile à utiliser et à modifier. MATPOWER est conçu pour donner les meilleures performances possibles tout en gardant le code simple à comprendre et à modifier. Il a été initialement développé dans le cadre du projet PowerWeb.

Après plusieurs simulations on a trouvé La même résultat pour le MATPOWER donc y a pas une influence


### Conclusion

Nous avons essayé l'impact de l'intégration d'une source photovoltaïque sur la stabilité statique sur le logiciel PSAT mais après plusieurs simulations on a constaté que le résultat ne change pas donc y a pas une influence de cette source la s qui rends l'utilisation de ce logiciel dans ce domaine bien définie (a savoir la stabilité statique) en l'écoulement de puissance continue est impossible pour les version actuelle.

Comme une solution nous avons essayé un autre logiciel qui s'appelle le MATPOWER la version 5 qui est version très riche, mais malheureusement on a puis

dégagé du résultat de CPF mais une fois on a simulé un générateur(PV) comme un générateur photovoltaïque donc y'a pas une influence.

Arriver à ce stat nous pouvons conclure que le PSAT les versions actuelle ne peut pas être un outil de calcul continu de l'écoulement de puissance (la stabilité statique) avec l'intégration d'une source photovoltaïque Nous pouvons dire comme une perspective qu'un autre collègue peut reprendre le sujet mais à cette fois il sera obligé de faire la programmation pure de tous les problèmes de CPF et l'intégration d'une source photovoltaïque.



*Conclusion  
générale*



# CONCLUSION GENERALE

---

D'autres partces dernières années, l'échauffement terrestre a pris une grande ampleur vue plusieurs raisons y compris, les gaz toxique dégagés par les différentes centrales électriques implantées à travers toute la planète

Le recours aux énergies renouvelables dans la production électrique représente une solution idéale pour réduire faire face à cette pollution mais malheureusement cette intégration n'estpassans conséquences sur le réseau électrique conventionnel.

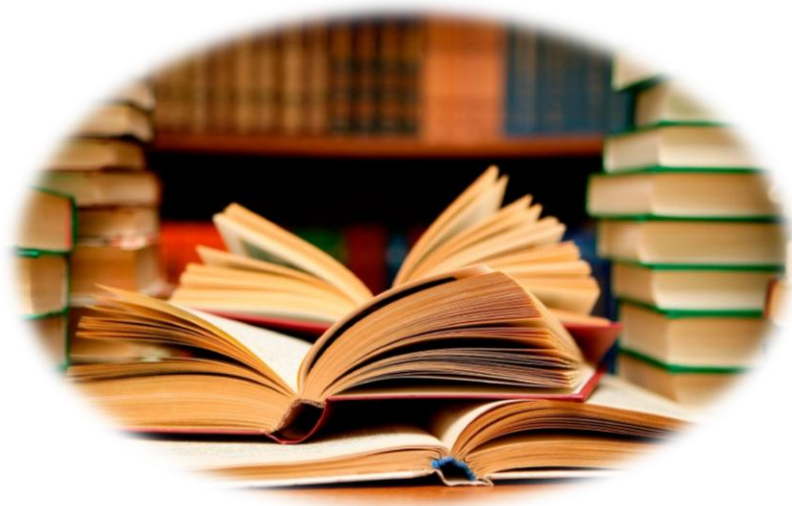
A la fin de cette étude, on a soulevé les points suivants :

- ✓ Maitrise du logiciel PSAT
- ✓ Comprendre la notion de stabilité et essentiellement la stabilité statique
- ✓ Le principe de fonctionnement du système FACTS notamment le SVC et le STATCOM
- ✓ L'influence de l'intégration du système FACTS sur le profil de tension
- ✓ Savoir utiliser l'écoulement de puissance continu « CPF » sous PSAT et MATPOWER
- ✓ Découvrir l'incapacité du PSAT d'analyser le CPF en présence d'une source photovoltaïque

Nous pouvons maintenant énoncer quelques perspectives ayant pour objectif de compléter ce que nous avons présenté dans ce rapport de mémoire:

- ✚ Comparaison entre tous les types des FACTS et leur impact comme le compensateur shunt l'UPFC sur le phénomène de l'effondrement de tension.
- ✚ Pour les besoins de la détermination de l'emplacement optimal des FACTS, nous proposons pour un futur travail de développer un programme basé sur les méthodes heuristiques qui simule l'emplacement optimal des FACTS dans un réseau électrique.
- ✚ Nous proposons aussi d'étudier l'impact de dispositif FACTS sur le réseau électrique de point de vu économique.
- ✚ Nous proposons comme suite à ce travail l'intégration d'autre type d'énergie renouvelable comme la pile à combustible et l'analyse d'autre influence
- ✚ faire la programmation pure de tous les problèmes de CPF et l'intégration d'une source photovoltaïque au réseau électrique

# *Bibliographie*



# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

<b>A</b>	<b>[ABA 11]</b>	S.ABADA : « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur spic », Mémoire Maître es-Sciences, Université Laval, 2011
	<b>[AAE]</b>	Application à l'alimentation en eau potable et au traitement des eaux usées en zones rurales.
	<b>[ALI 09]</b>	Abdelaali.Alibi, "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS", thèse de magister, université des Batna, 13/06/2009..
	<b>[AJJ 92]</b>	Venkataramana Ajarapu and Colin Cristy, "The Continuation Power Flow: A tool For Steady State Voltage Stability Analysis, " IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.416-423,1992.
<b>B</b>	<b>[BEN 07]</b>	Rabah.Benabid; "Optimisation Multi-Objectif de la synthèse des FACTS par les particules en Essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques", thèse de magister, Université de jijel, 04/09/2007.
	<b>[BOU 10]</b>	L.BOUMEDIENE, « Placement Des Dispositifs «D-FACTS» et Contrôle Des Tensions Dans Un Réseau de Distribution » Thèse de doctorat de Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 04 Janvier 2010.
	<b>[Bel 00]</b>	BELACHEHEB K., <i>Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport</i> , Thèse de Doctorat de l'université de Henri POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
	<b>[Bar 84]</b>	BARRET J. P., "Stabilité transitoire.", <i>Séminaire sur le fonctionnement des réseaux SONELGAZ-EDF 10-13 Novembre 1984</i>
	<b>[BRI 08]</b>	S. BRIGAND, « principe du photovoltaïque », complément technique 2008.
	<b>[BER 06]</b>	C. BERNARD, J.CHAUVIN, D. LEBRUN, J.F MURAZ, P. STASSI « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006
	<b>[BEN 09]</b>	BENDJELLOULI Zakaria « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » Mémoire de Magistère, Université de Bechar. 2008/2009,

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

<b>C</b>	<b>[CHE 09]</b>	M. OULD CHEIKHNA et S. GHIBOUB, « L'impact de compensateur shunt (SVC) sur la stabilité des réseaux électriques », Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université de Biskra, Juin 2009
<b>D</b>	<b>[DAH 07]</b>	M. DAHBI «Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
<b>E</b>	<b>[EPIA 11]</b>	Global market outlook for photovoltaic until 2015, European Photovoltaic Industry Association EPIA, mai 2011.
<b>F</b>	<b>[FLE 07]</b>	B. FLECHE, D. DELAGNES : «Energie solaire photovoltaïque», STI ELT, juin 2007.
<b>G</b>	<b>[GER 02]</b>	Olivier GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
	<b>[GON 05]</b>	YANFENG GONG, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement" PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
<b>H</b>	<b>[HAD 11]</b>	R. HADJ ATTOU, "Etude et optimisation d'une chaine VBoost Onduleur Réseau »BT SONELGAZ", mémoire de magistère, Université de Chlef, 2011.
	<b>[HEI 05]</b>	S. Heier, " Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", 2nd ed., Wiley, ISBN: 0-470-86899-6, 2005
	<b>[Hin 00]</b>	N.G. HINGORANI and L. GYUGYI, "Understanding FACTS", <i>IEEE Press.</i> , New York, 2000.
<b>I</b>	<b>[IEE 04]</b>	Task Force on Stability Terms and Definitions IEEE/CIGRE, "Definition and classification of power system stability." <i>IEEE Transaction on Power Systems</i> , Vol. 19, No. 2, May 2004.
<b>K</b>	<b>[KEZ 04]</b>	A. Kazemi, and B. Badrzadeh, " Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study their Limits on Maximum Loadability Point," <i>Electrical Power and Energy Systems</i> , Vol. 26, pp. 619-626, Apr. 2004.
	<b>[LOU 13]</b>	Bekri oum el fadhel loubaba, «Contribution à l'étude des systèmes

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

L		FACTS (Flexible AC Transmission Systems) et leurs emplacements optimaux dans les réseaux électriques», Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2013
	[LAS 13]	Y.LASMI « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes » mémoire de Magistère en Electrotechnique, Université Sétif, 2013.
	[LAK 06]	Talpasai Lakkaraju, "Selection of Pilot Buses for VAR Support and Voltage Stability Risk Analysis", Master of Science thesis, Lane Department of Computer Science and Electrical Engineering Morgantown, West Virginia, USA, 2006
	[LER 91]	LERCH. D. P. E., Xu. L., Advanced SVC control for damping power system oscillations, <i>IEEE transactions on power systems</i> , VOL. 6.pp. 524-535, 1991.
	[LAB 06]	Anne LABURET, Michel VILLOZ « énergie solaire photovoltaïque » 3e édition Du nod, Paris, 2006
	[LAL 09]	LALOUNI Sofia : « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique » Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009
M	[MEF 12]	M. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magistère, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID -TLEMCEM, 2012.
	[MOU 05]	R. MAOUED], « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire De Magistère, Décembre 2005.
	[MES 06]	M.MESSOUDE : «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage «mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2006.
	[MAR 07]	M. Marcelo G, M. Pedro E, and H. Edson, "Static synchronous compensator with superconducting magnetic energy storage for high power utility applications," <i>Energy Conversion and Management</i> , vol.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

		48, pp. 2316-2331, 2007.
N	[NIS 03]	K.NISHIOKA, N.SAKITANI, K.KUROBE, Y.YAMAMOTO. Y.ISHIKAWA, Y. URAOKA, T.FUYUKI, « Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline » Si solar cells using modified equivalent circuit model, Journal Appliqué de physique, vol. 42, pp: 7175-7179,2003.
	[NOB 85]	B. DE METZ-NOBLAT, G. JEANJEAN « Stabilité dynamiques des réseaux électriques industriels » Cahier Technique Schneider n° 185.
R	[RIF 09]	Yann RIFFONNEAU: « gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau», thèse de doctorat Université Joseph FOURIER, octobre 2009.
	[ROY 98]	Jimmy ROYER et Eric SCHILLER, Pompage photovoltaïque, édition Multi mondes, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
S	[Sad 98]	S.M. SADEGHZADEH, "Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC", Thèse de doctorat de l'INPG 13 Mars 1998.
	[Sam 83]	F. SAMOUHI, "Application de la méthode de Lyapunov a l'aide de la stabilité dynamique de réseaux de transport d'énergie soumis à des perturbations", Thèse de doctorat de l'INPG, 21 Avril 1983.
	[Son 99]	A. SONNENMOSER and P.W. LEHN, "Line current balancing with a Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14,No. 3, pp. 1151-1157, July 1999.
	[sit1]	<a href="http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-autonome-1/rendement-modules-photovoltaïques.php">www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-autonome-1/rendement-modules-photovoltaïques.php</a>
	[sit5]	<a href="https://www.ecolodis-solaire.com">https://www.ecolodis-solaire.com</a>
	[SAA 10]	N.SAADAoui : "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque », mémoire de Magistère, département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif, 2010.
	[SIN 10]	A.T. SINGO, « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

		hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, 2010.
	[Sit2]	<a href="https://www.google.dz/url?sa">https://www.google.dz/url?sa</a>
	[sit3]	<a href="http://glloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg">http://glloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg</a>
	[SEO]	<a href="http://solarelectripower.org">solarelectripower.org</a>
	[sit4]	<a href="http://www.economiedenergie.fr/Schema-d-un-module-photovoltaïque--pop-up-.html">www.economiedenergie.fr/Schema-d-un-module-photovoltaïque--pop-up-.html</a>
<b>O</b>	[OUD 17]	OUDAYA Mohamed Bachir « Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS » mémoire de Master Saïda le 3 juillet 2017.
	[PAN 04]	Y. PANKOW : « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, Centre National de Recherche Technologique de Lille, 2004.
<b>P</b>	[PAS 98]	J.C. Passelergue, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques ", Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
	[Pas 98]	J.C. PASSELERGUE, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
	[PSS 94]	P.KUNDUR, « Power System Stability and Control », New York: McGraw-Hill, 1994.
	[Pet 97]	P. PETITCLAIR, "Modélisation et Commande de structures FACTS : Application au STATCOM", Thèse de doctorat de l'INPG 16 Juillet 1997.
	[Pov 00]	POVH. D., « Use of HVDC and FACTS, » <i>Proc. of the IEEE, vol. 88, pp. 235-45, February 2000.</i>
<b>Z</b>	[ZIM 11]	R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," <i>Power Systems, IEEE Transactions on</i> , vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.