

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté : Technologie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique

Présenté par : Adoui Sohaib

Encadrant : Mesbah.T

Professeur Encadreur

Université Badji-Mokhtar

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
Azzag EB	Professeur	Université Sidi Amar	Président
Tourab W	MCB	Université Sidi Amar	EXAMINATEUR

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir permis de faire ce

trajet et qui m'a guidé pour arriver la

Je tiens à exprimer ma gratitude à **Mr.Mesbah T.** pour son encadrement, expertise et son soutien constant tout au long de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail.

Un dernier mot et non le moindre : je tiens à remercier mon père **Adoui.Messaoud.** Bien qu'il ait été parfois difficile à gérer, ses précieux conseils, ses mots d'encouragement et sa disponibilité constante ont joué un rôle essentiel dans la réussite de cette recherche.

Dédicaces

JE dédie ce travail aux êtres les plus chers dans ma vie,

<< A toi maman sans toi je ne serai jamais arrivé là et pour toi et avec tes prières je sais que je peux aller très loin, A toi papa, ton soutien et tes conseils m'ont façonné en l'homme que je suis aujourd'hui. A mon grand frère, et ma sœur >>

Sans vous le chemin aurait été trop long, sombre et difficile, je vous aime très fort

RÉSUMÉ

Les sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie éolienne et hydroélectrique, ont attiré une attention considérable en raison de leur potentiel pour atténuer les problèmes environnementaux et réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, l'intégration de ces sources dans un réseau électrique présente des défis techniques importants, notamment la gestion de la variabilité de la production d'électricité et la garantie de la stabilité du réseau.

Parmi les sources renouvelables, l'énergie solaire s'est imposée comme une solution prometteuse en raison de sa disponibilité abondante et des progrès technologiques.

Cette étude se concentre sur l'intégration de l'énergie solaire dans le réseau électrique et examine les performances d'un panneau photovoltaïque et d'un générateur en utilisant les logiciels MATLAB/SIMULINK, ETAP, et PvSyst. L'étude comprend la modélisation de la chaîne photovoltaïque, et l'évaluation de l'impact des changements météorologiques sur la génération photovoltaïque. De plus, l'étude explore l'utilisation du stockage d'énergie pour assurer une alimentation électrique continue et propose une technique de contrôle utilisant différentes méthodes, pour résoudre l'instabilité de la tension de sortie causée par l'intégration du système d'énergie solaire dans le réseau électrique. Les résultats de la simulation soulignent l'importance d'un système de contrôle robuste pour une intégration stable et efficace de l'énergie solaire dans le réseau électrique.

ABSTRACT

Renewable energy sources, including wind and hydropower, have gained significant attention due to their potential in mitigating environmental issues and reducing dependency on fossil fuels. However, integrating these sources into an electrical grid presents significant technical challenges, including managing the variability of the power output and ensuring grid stability.

Among renewable sources, solar power has emerged as a promising solution due to its abundant availability and advancements in technology.

This study focuses on the integration of solar power into the electrical grid and investigates the performance of a photovoltaic panel and generator using MATLAB/SIMULINK, ETAP, and PvSyst softwares. The study includes modeling the photovoltaic chain, and evaluating the impact of weather changes on photovoltaic generation. Furthermore, the study explores the use of energy storage to ensure a continuous power supply and proposes a control technique using different methods, to address the instability of the voltage output caused by the integration of the solar power system into the electrical grid. The results of the simulation highlight the importance of a robust control system in achieving a stable and efficient integration of solar power into the electrical grid.

SOMMAIRE

Chapitre -I- Généralités sur les sources d'energies renouvelables

I.1. Introduction :	1
I.2. Production d'énergie électrique.....	1
I.3. Les sources d'énergie renouvelables.....	2
I.3.1. La biomasse :	2
I.3.1.1. Fonctionnement d'une centrale biomasse :	3
I.3.2. L'énergie hydraulique :	3
I.3.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique :	4
I.3.3. L'énergie géothermique :	4
I.3.3.1. Fonctionnement d'une centrale géothermique :	5
I.3.4 L'énergie éolienne :	5
I.3.4.1. Fonctionnement d'une centrale éolienne :	6
I.3.5. L'énergie solaire :	6

Conclusion :	8
--------------------	---

Chapitre -II- Etude du reseau actuel

II.1 Choix de la variante :	9
-----------------------------------	---

II-1.1 Topologie du reseau :	9
------------------------------------	---

II-2 Description du reseau a etudie :	10
---	----

II-2.1 Calcul de la repartition de la puissance dans les reseau :	11
---	----

II-2.2 Choix des sections des conducteurs :	12
---	----

II-3 Etude du reseau en "Régime normal"	13
---	----

II-3.1 Calcul les puissances réactives transversales :	13
--	----

II-3.2 Détermination des puissances qui transit dans les lignes :	15
---	----

II-3.3 Détermination des chutes de tension :	16
--	----

II-3.4 Détermination des tensions en chaque nœud :	17
--	----

II-3.5 Détermination des écarts de tension :	18
--	----

II-3.6 Déviation de tension :	18
-------------------------------------	----

II-4 Etude du reseau futur :	24
------------------------------------	----

II-4.1 Détermination des puissances qui transit dans les lignes :.....	25
II-4.2 Détermination des chutes de tension :.....	26
II-4.3 Détermination des tensions en chaque nœud :.....	27
II-4.4 Détermination des écarts de tension :.....	28
II-5 Etude du réseau en régime "après avarie" :.....	31
II-5.1 En la rupture de la ligne (A-3) :.....	32
II-6 Calcul du courant de court-circuit :.....	37
Conclusion :.....	48

Chapitre -III- Energie Photovoltaïque.

III-1. INTRODUCTION :.....	49
III.2 GÉNÉRALITÉS :.....	49
II.3 Les Propriétés De Semi-conducteurs :.....	51
III.3.1 Le silicium :.....	51
III.3.2.Dopage de silicium :.....	52
III.3.3-La jonction (PN) :.....	53

III.4 Matériaux utilisés dans les cellules PV :	54
III.4.1.Silicium monocristallin :	54
III.4.2. le silicium poly-cristallin (multi-cristallin) :	55
III.4.3.le silicium amorphe :	56
III.4.4.Cellules organiques et plastiques :	57
III.5 Avantages et inconvénients du PV :	58
III.6 L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:.....	59
III.6.1 La cellule photovoltaïque :	59
III.6.2 L'effet photovoltaïque :	60
III.7 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :	62
III.7.1 Modèle à une seule diode :	62
III.7.2 Modèle électrique d'un générateur à une seule diode :	65
III.7.3 Modèle à deux diodes :	67
III.7.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes :	68
III.8 SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS :	69

III.8.1 Logiciel Pvsyst :	70
III.8.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un photovoltaïque :	71
III.8.2.1 Influence de l'éclairement :	72
III.8.2.2 Influence de la température :	73
III.8.2.3 Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement :	74
III.9 MODÉLISATION D'UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE :	75
III.9.1 Association en série :	76
III.9.2 Association en parallèle :	76
III .10 STOCKAGE D'ÉNERGIE :	77
III.12 CONCLUSION :	85

Chapitre -IV- Intégration photovoltaïque sur le réseau électrique

IV-1. INTRODUCTION :	86
----------------------------	----

IV-3. IMPACT DE L'INTEGRATION DES SYSTEME PV SUR LA TENSION DU RÉSEAU ÉTUDIÉE :	88
IV-3-1 Connexion au point (4) :	89
IV-3-2 Connexion au point (2) :	91
IV-4. CONCLUSION :	94

Introduction
Générale

Introduction Générale :

L'énergie est un besoin primordial pour l'humanité, et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz et charbon), la science s'est tournée vers l'énergie renouvelable et la source la plus importante de ces énergies renouvelables reste le soleil.

Dans Algérie, comme dans tout autres pays industrialisé, l'électricité joue un rôle très important dans toutes les branches de l'économie nationales tel que l'industrie, l'agriculture, l'usage domestique et le transport.

Cependant, le progrès technique et sociale exige le développement de tout ce qui est lié au processus de production, de transport de distribution et de consommation de l'énergie électrique.

Hors la demande de l'énergie électrique croit considérablement pour l'usage industriel et domestique, ce qui nécessite la production en plus et le transport aux consommateurs.

Les statistiques montrant qu'en Algérie la consommation moyenne double tous les 7ans, cette augmentation s'accompagne par l'augmentation de la puissance fournie par les centrale qui augmentant les problèmes de la tension aux différents nœuds de réseau.

C'est pourquoi l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans le réseau électrique est devenue un aspect crucial des systèmes énergétiques modernes. Il est

essentiel de développer des systèmes efficaces et robustes pour assurer l'intégration stable des énergies renouvelables dans le réseau électrique.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'intégration de l'énergie solaire dans le réseau électrique et nous étudions les performances d'un panneau photovoltaïque. De plus, nous explorons l'utilisation de stockage d'énergie pour assurer une alimentation électrique continue. En développant des systèmes efficaces et fiables pour l'intégration de l'énergie solaire dans le réseau électrique, nous pouvons réduire considérablement notre dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et atténuer l'impact environnemental de la production d'électricité.

Chapitre I
Généralités sur les
différents sources d'énergie renouvelables

I.1. Introduction :

Depuis toujours, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se réchauffer, se mouvoir... L'énergie est multiple. Celle-ci, composante essentielle de l'univers, se présente sous de nombreuses formes (calorifique, électrique...) et provient de diverses sources.

Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, soleil, eau, vent...).

En Algérie la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles. Un recours systématique aux carburants fossiles reste rentable mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Et ceci n'est pas le cas des combustibles fossiles.

I.2. Production d'énergie électrique

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes.

I.3. Les sources d'énergie renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui soit ne s'épuise jamais, soit peut se renouveler rapidement à l'échelle humaine. Le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Les énergies renouvelables n'engendrent pas de déchets ni d'émissions polluantes de manière directe. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Il y a cinq sources essentielles d'énergies dites renouvelables : le vent (éoliennes), l'eau (barrages hydroélectriques, marémotrice), le soleil (panneaux solaires), les végétaux (biocarburants) et la chaleur du sol (géothermie).

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

I.3.1. La biomasse :

L'énergie de la biomasse, ou bioénergie, est l'énergie qui est extraite des matières organiques non fossiles comme le bois, la paille, les huiles et les déchets

végétaux des secteurs forestier, agricole et industriel. Tout comme l'énergie des combustibles fossiles, la bioénergie provient de l'énergie solaire emmagasinée dans les plantes par la photosynthèse. À l'heure actuelle, l'énergie de la biomasse provient en très grande partie des solides (copeaux, granulats, charbon, ordures ménagères) et des liquides (lessives de cuisson) provenant de la cuisson du bois dans l'industrie papetière.

Il existe trois principales catégories d'énergie relatives à la biomasse (Bois, Biogaz et Biocarburant).

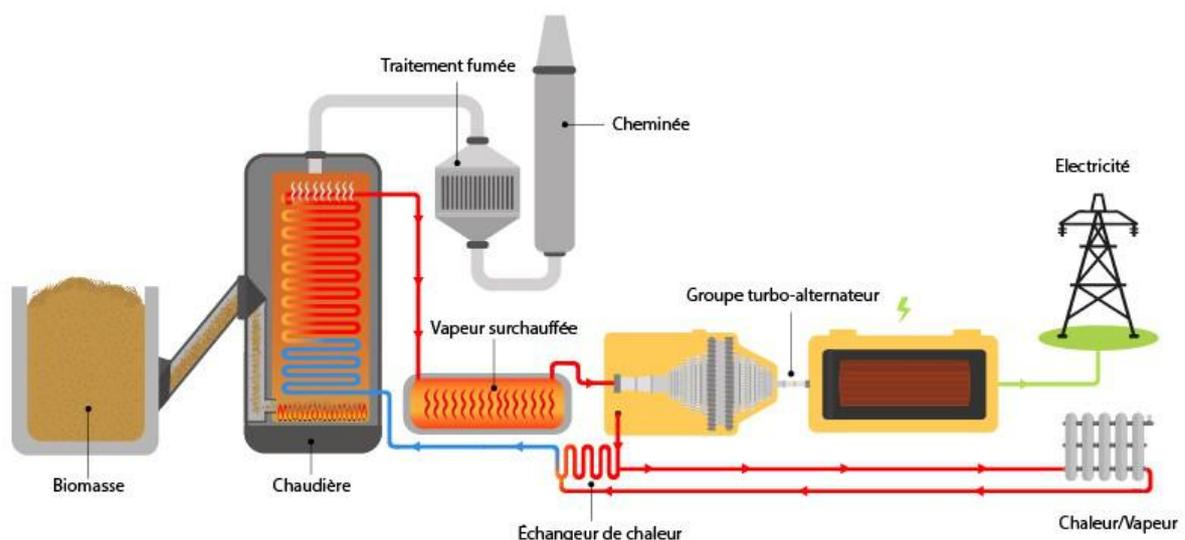


Fig I.1: Centrale biomasse.

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

I.3.1.1. Fonctionnement d'une centrale biomasse :

L'énergie de la biomasse est transformée en énergie thermique par combustion. Cette énergie transforme de l'eau en vapeur, qui actionne ensuite une turbine à

vapeur accouplée à un alternateur, qui transforme enfin l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou énergie thermique restante peut être utilisée, par exemple, pour alimenter un circuit de chauffage. Il s'agit alors de cogénération.

I.3.2. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes (chutes d'eau, cours d'eau, courant marin, marée, vagues). Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute (Les centrales de haute chute, moyenne chute et de basse chute).

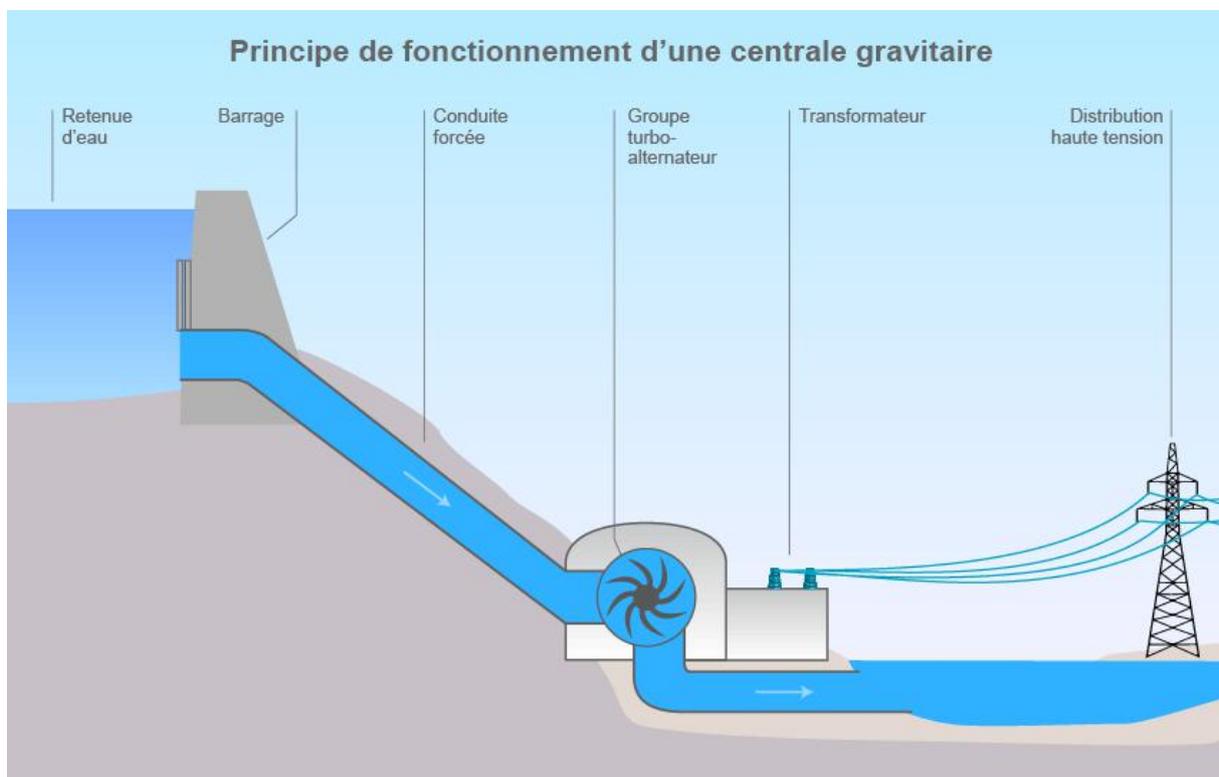


Fig I.2: Centrale hydroélectrique.

I.3.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique :

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

I.3.3. L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 ou même

30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères.

On distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie

I.3.3.1. Fonctionnement d'une centrale géothermique :

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur.

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

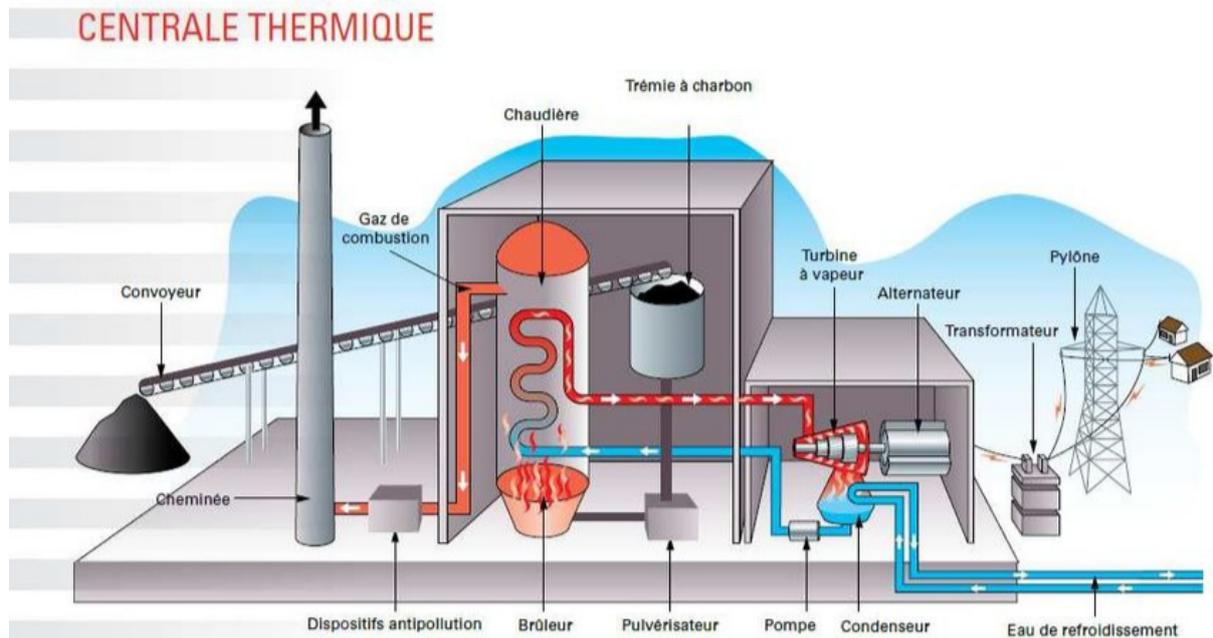


Fig I.3: Centrale géothermique.

I.3.4 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est produite par la force que le vent exerce sur les pales d'une éolienne. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer (respectivement dites onshore et offshore) dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

Pour produire de l'électricité, le vent doit souffler à une certaine vitesse pour que le démarrage du rotor puisse se faire. Ce seuil est habituellement de 4 m/s (14,4 km/h). Le rotor entraînera le mouvement de l'arbre qui est relié à l'alternateur, qui pourra ainsi changer l'énergie mécanique en énergie électrique. Plus la vitesse du vent augmente, plus la génératrice pourra produire d'énergie.

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

L'augmentation s'arrête cependant quand la vitesse nominale est atteinte. Au-delà de cette limite bien souvent située à 12 m/s ou 43 km/h, on restreint la production

pour ne pas abîmer la génératrice. Habituellement, on arrête les éoliennes quand les vents dépassent les 25 m/s ou 90 km/h pour préserver l'intégrité structurelle de l'éolienne.

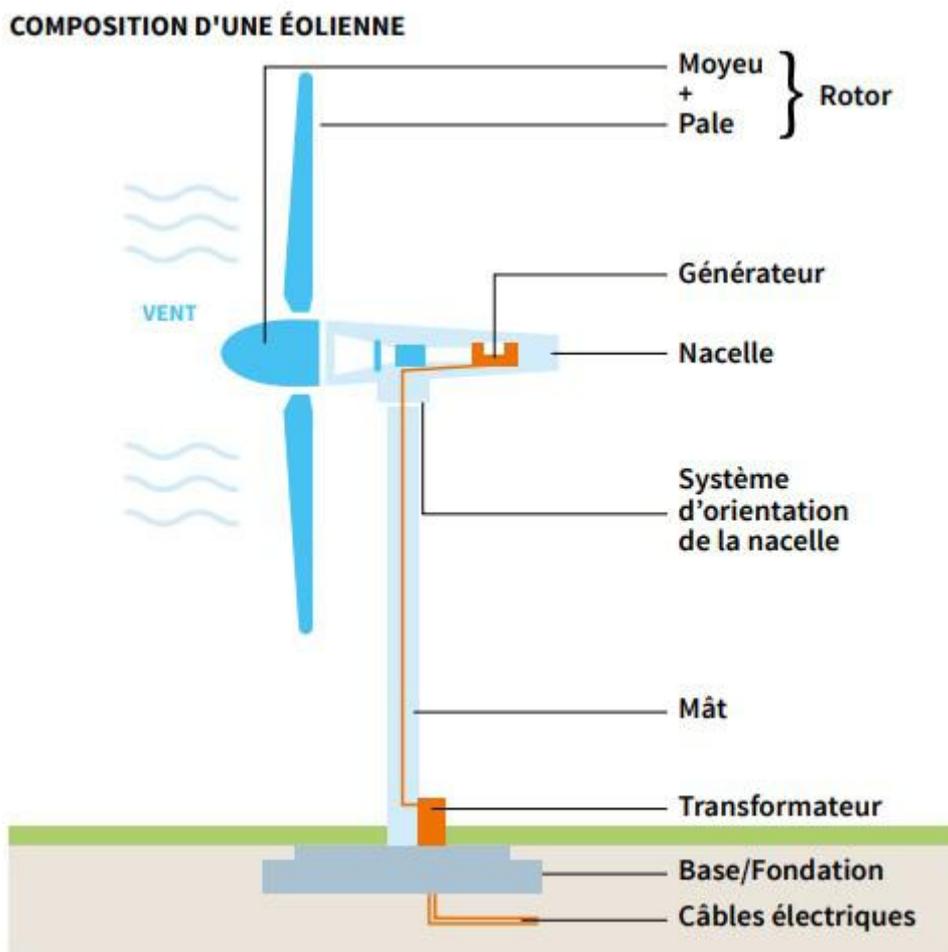


Fig I.4: Centrale éolienne.

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

I.3.4.1. Fonctionnement d'une centrale éolienne :

- 1) La rotation des pales : sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche.

- 2) La production d'électricité : l'hélice entraîne un axe dans la nacelle, relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.

- 3) L'adaptation de la tension : un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur.

I.3.5. L'énergie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m². La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser.

L'énergie solaire est utilisée essentiellement pour deux usages : la production de chaleur et la production d'électricité.

Chapitre I : Généralités sur les différentes sources d'énergie renouvelables

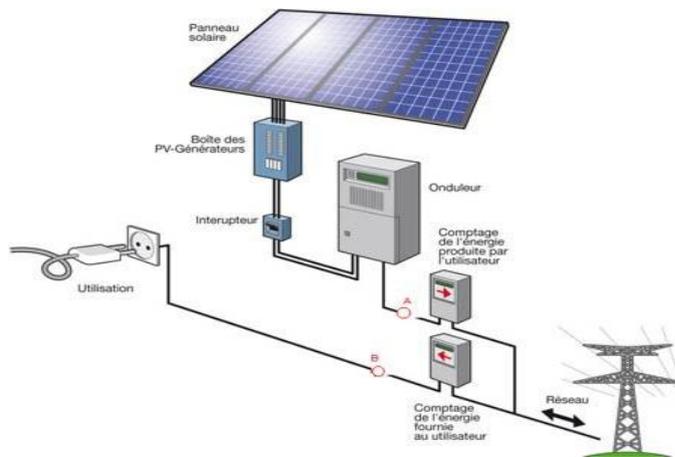


Fig I.4: Installation photovoltaïque.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les énergies renouvelables ainsi que les principes conduisant à produire de l'électricité avec l'utilisation de ces dernières.

Les énergies renouvelables, quant à elles, sont des énergies inépuisables, propres qui peuvent répondre aux besoins énergétiques. En effet, la plus grande utilisation des énergies renouvelables permettra de mieux assurer la pérennité des ressources de la terre et des énergies fossiles pour les générations de demain.

Dans le troisième chapitre, on s'intéressera à l'énergie photovoltaïque avec plus de détails.

Chapitre II

Etude du réseau actuel

II.1 Choix de la variante :

II-1.1 Topologie du réseau :

La réalisation de projet concernant les réseaux électrique nécessitent certaines données de départ tel-que :

-La puissance des différents nœuds donnés. Soit sous la forme de puissance active(P) et de puissance réactive de calcul ou bien sous la forme de diagramme de charge.

-Les distances entre les différent nœuds de ces paramètres nous permettent de choisir la configuration du réseau considère qui dépend en générale de la catégorie des récepteurs de la tension nominale de la puissance à transporter ainsi que la distance "nœud-source" et "nœud-consommateur".

Il existe différent types de configuration dont les plus courant sont le réseau radicale, magistrale, bouclé maillé.....etc.

Vue la disposition des différents nœuds par apport à la source ainsi que la catégorie de récepteur.

La structure bouclé ou maillé repent parfaitement aux différents refondateur en particulier satisfaire la continuité de la provisionnements en énergie électrique de différents récepteurs ainsi assurés une bonne qualité en énergie électrique.

II-2 Description du réseau a étudié :

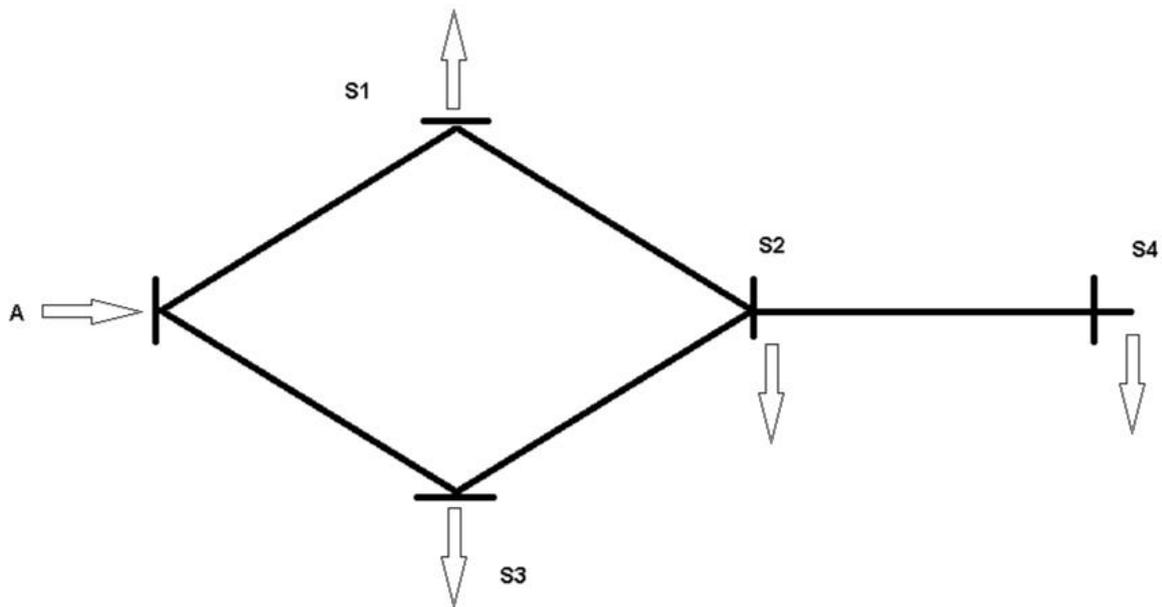


Fig II.1

Les données du réseau sont :

- ◆ Poste-1- charge: $S_1 = 21.45 + j14.35$ [MVA]
- ◆ Poste-2- charge: $S_2 = 29.25 + j 19.5$ [MVA]
- ◆ Poste-3- charge: $S_3 = 28.6 + j 19.5$ [MVA]
- ◆ Poste-4- charge: $S_4 = 13.65 + j 9.1$ [MVA]

Longueurs :

$L_{A1} = 32.5 \text{ Km}$

$L_{24} = 26 \text{ Km}$

$L_{12} = 39 \text{ Km}$

$L_{23} = 45.5 \text{ Km}$

$L_{A3} = 39 \text{ Km}$

II-2.1 Calcul de la répartition de la puissance dans les réseaux

Dans ce cas, on exécute un calcul préalable en supposant que les chutes de tension son négligeable et que les paramètres linéiques des différents tronçons sont égaux.

Après le déplacement de la charge (4) vers la charge (2) :

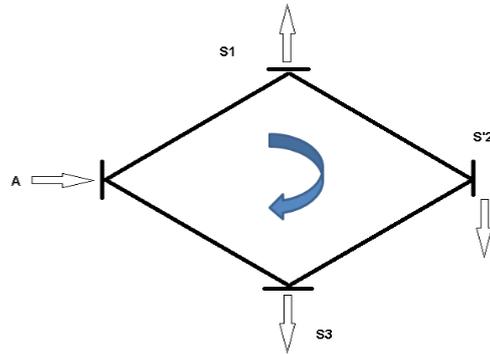


Fig II.2

$$S'_2 = S_2 + S_4$$

$$S'_2 = 42.9 + J28.6$$

$$S_{A1} = \frac{S_2(L_{23} + L_{A3}) + S_3L_{A3} + S_1(L_{12} + L_{23} + L_{A3})}{L_{A1} + L_{12} + L_{23} + L_{A3}}$$

$$S_{A1} = 47.36875 + J 31.6875$$

$$S_{12} = S_{A1} - S_1$$

$$S_{12} = 25.91875 + J 17.3875$$

$$S_{23} = S'_2 + S_1 + -S_{A1}$$

$$S_{23} = 16.98125 + J 11.2125$$

$$S_{A3} = S_1 + S'_2 + S_3 - S_{A1}$$

$$S_{A3} = 45.82125 + J 30.7125$$

$$S_{24} = S_4 = 13.65 + j 9.1$$

II-2.2 Choix des sections des conducteurs :

a) Calcul des courants dans les lignes

$$U_n = 90 \text{ kV}$$

$$I_{A1} = \frac{S_{A1}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{(47.366875)^2 + (31.66875)^2} * 10^3}{\sqrt{3} * 90} = 329.2930 \text{ A}$$

$$I_{12} = \frac{S_{12}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{(25.91875)^2 + (17.3875)^2} * 10^3}{\sqrt{3} * 90} = 200.21662 \text{ A}$$

$$I_{A3} = \frac{S_{A3}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{(45.58125)^2 + (30.7125)^2} * 10^3}{\sqrt{3} * 90} = 323.8866 \text{ A}$$

$$I_{23} = \frac{S_{23}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{(16.98125)^2 + (11.2125)^2} * 10^3}{\sqrt{3} * 90} = 130.53908 \text{ A}$$

$$I_{24} = \frac{S_{24}}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{(13.65)^2 + (9.1)^2} * 10^3}{\sqrt{3} * 90} = 105.23978 \text{ A}$$

b) Choix des sections :

$$F = \frac{I}{J_{eco}}$$

Tableau de la densité économique du courant :

Tmax (heures)	1000-2000	>2000-5000	>5000-8760
J(A/mm ²)	1.3	1.1	1.0

$$F_{A1} = \frac{I_{A1}}{J_{eco}} = \frac{329.293}{1.1} = 299.3573 \text{ mm}^2$$

◆ D'après le catalogue la section normalisé : AC-300

$$F_{12} = \frac{I_{12}}{J_{eco}} = \frac{200.21662}{1.1} = 182.0510 \text{ mm}^2$$

◆ D'après le catalogue la section normalisé : AC-185

$$F_{A3} = \frac{I_{A3}}{J_{eco}} = \frac{323.8866}{1.1} = 294.4423 \text{ mm}^2$$

◆ D'après le catalogue la section normalisé : AC-300

$$F_{23} = \frac{I_{23}}{J_{eco}} = \frac{130.53908}{1.1} = 118.67189 \text{ mm}^2$$

◆ D'après le catalogue la section normalisé : AC-120

$$F_{24} = \frac{I_{24}}{J_{eco}} = \frac{105.23978}{1.1} = 95.6725 \text{ mm}^2$$

◆ D'après le catalogue la section normalisé : AC-95

A-1	AC-300	0.105	0.416	2.85	3.4125+j13.52
1-2	AC-185	0.156	0.393	2.76	6.084+j15.327
A-3	AC-300	0.105	0.416	2.85	4.095+j16.224
2-3	AC-120	0.25	0.42	2.70	11.375+j19.11
2-4	AC-95	0.316	0.43	2.65	8.216+j11.18

II-3 Etude du réseau en "Régime normal"

II-3.1 Calcul les puissances réactives transversales :

$$\Delta Q_{Tj} = 1/2 b_0 L_j U_n^2$$

◆ $\Delta Q_{TA1} = 1/2 * 2.85 * 10^{-6} * 90^2 * 32.5 = 0.37513$

◆ $\Delta Q_{T12} = 1/2 * 2.76 * 10^{-6} * 90^2 * 39 = 0.435942$

◆ $\Delta Q_{TA3} = 1/2 * 2.85 * 10^{-6} * 90^2 * 39 = 0.45015$

$$\diamond \Delta Q_{T23} = 1/2 * 2.70 * 10^{-6} * 90^2 * 45.5 = 0.49754$$

$$\diamond \Delta Q_{T24} = 1/2 * 2.65 * 10^{-6} * 90^2 * 26 = 0.279045$$

- Calcul des puissances dans les nœuds

┆◆ **Nœud 1 :**

$$S'_1 = S_1 - j(\Delta Q_{TA1} + \Delta Q_{T12})$$

$$S'_1 = (21.45 + j14.3) - j(0.37513 + 0.435942)$$

$$S'_1 = 21.45 + j13.48892$$

◆ **Nœud 2 :**

$$S'_2 = S_2 - j(\Delta Q_{T23} + \Delta Q_{T12} + \Delta Q_{T24})$$

$$S'_2 = (29.25 + j19.5) - j(0.94754 + 0.435942 + 0.279045)$$

$$S'_2 = 29.25 + j18.28747$$

◆ Nœud 3 :

$$S'_3 = S_3 - j(\Delta Q_{TA3} + \Delta Q_{T23})$$

$$S'_3 = (28.6 + j19.5) - j(0.45015 + 0.49754)$$

$$S'_3 = 28.6 + j18.55231$$

◆ Nœud 4 :

$$S'_4 = S_4 - j\Delta Q_{T24}$$

$$S'_4 = (13.65 + j9.1) - j0.279045$$

$$S'_4 = 13.65 + j8.820955$$

II-3.2 Détermination des puissances qui transit dans les lignes :

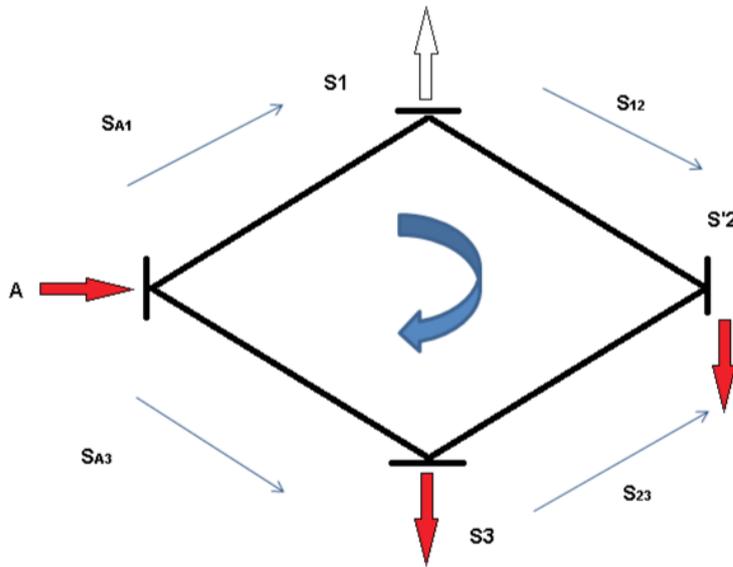


Fig II.3

$$S_{A1} = \frac{S''_2 (\check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3}) + S'_3 \check{Z}_{A3} + S'_1 (\check{Z}_{12} + \check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3})}{\check{Z}_{12} + \check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3} + \check{Z}_{A3}}$$

$$S''_2 = S_2 + S_4$$

$$S''_2 = 42.9 + J27.10842$$

◆ Après le calcul en trouve :

$$S_{A1} = 47.63255 + J31.089057$$

◆ L'application de lois de Kirchhoff donne :

$$S_{12} = S_{A1} - S'_1$$



$$S_{12} = 26.18255 + J17.60013$$

$$S_{23} = S''_2 - S'_1 + -S_{A1}$$



$$S_{23} = 16.71745 + j9.50828$$

$$S_{A3} = S'_1 - S''_2 + S'_3 - S_{A1}$$



$$S_{A3} = 45.31745 + j28.060593$$

$$S_{24} = S'_4 = 13.65 + j8.82095$$

II-3.3 Détermination des chutes de tension :

Les chutes de tension sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}}{Un} + j \frac{P_j X_{ij} - Q_j R_{ij}}{Un}$$

$$\Delta U_{A1} = \frac{17.63255 * 3.4125 + 31.08905 * 13.52}{90} + j \frac{17.63255 * 13.52 - 31.08905 * 3.4125}{90}$$

$$\Delta U_{A1} = 6.4763 + j1.47000$$

$$\Delta U_{12} = \frac{26.18255 * 6.184 + 15.327 * 17.6013}{90} + j \frac{26.18255 * 15.327 - 17.60013 * 6.184}{90}$$

$$\Delta U_{12} = 4.76724 + j3.24956$$

$$\Delta U_{23} = \frac{16.71745 * 11.375 + 9.5082 * 19.11}{90} + j \frac{16.71745 * 19.11 - 9.5082 * 11.375}{90}$$

$$\Delta U_{23} = 4.31180 + j2.34794$$

$$\Delta U_{A3} = \frac{4.095 * 45.31745 + 28.065 * 16.224}{90} + j \frac{45.31745 * 16.224 - 28.065 * 4.095}{90}$$

$$\Delta U_{A3} = 7.12112 + j6.89267$$

II-3.4 Détermination des tensions en chaque nœud :

$$U_A = 90 \text{KV}$$

◆ Calcul de la tension au point 1 :

$$U_1 = U_A - \Delta U_{A1} = 90 - (6.4763 + j1.47000)$$

$$U_1 = 83.93839 - j1.47$$

$$U_1 = 83.95126 \text{ KV}$$

♦ Calcul de la tension au point 2 :

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12} = (83.93839 - j1.47) - (4.76724 + j3.24956)$$

$$U_2 = 78.75656 - j4.71956$$

$$U_2 = 78.89784 \text{ KV}$$

♦ Calcul de la tension au point 3 :

$$U_3 = U_A - \Delta U_{A3} = 90 - (7.12112 + j6.89267)$$

$$U_3 = 82.87888 - j6.89267$$

$$U_3 = 83.16500 \text{ KV}$$

♦ Calcul de la tension au point 4 :

$$U_4 = U_2 - \Delta U_{24} = (78.756566 - j4.71956) - (2.34 + j.89037)$$

$$U_4 = 76.41646 - j5.60993$$

$$U_4 = 76.62210 \text{ KV}$$

II-3.5 Détermination des écarts de tension :

Les écarts de tension sont généralement déterminés par la formule :

$$\Delta U_i \% = \frac{U_i - U_n}{U_n} * 100\%$$

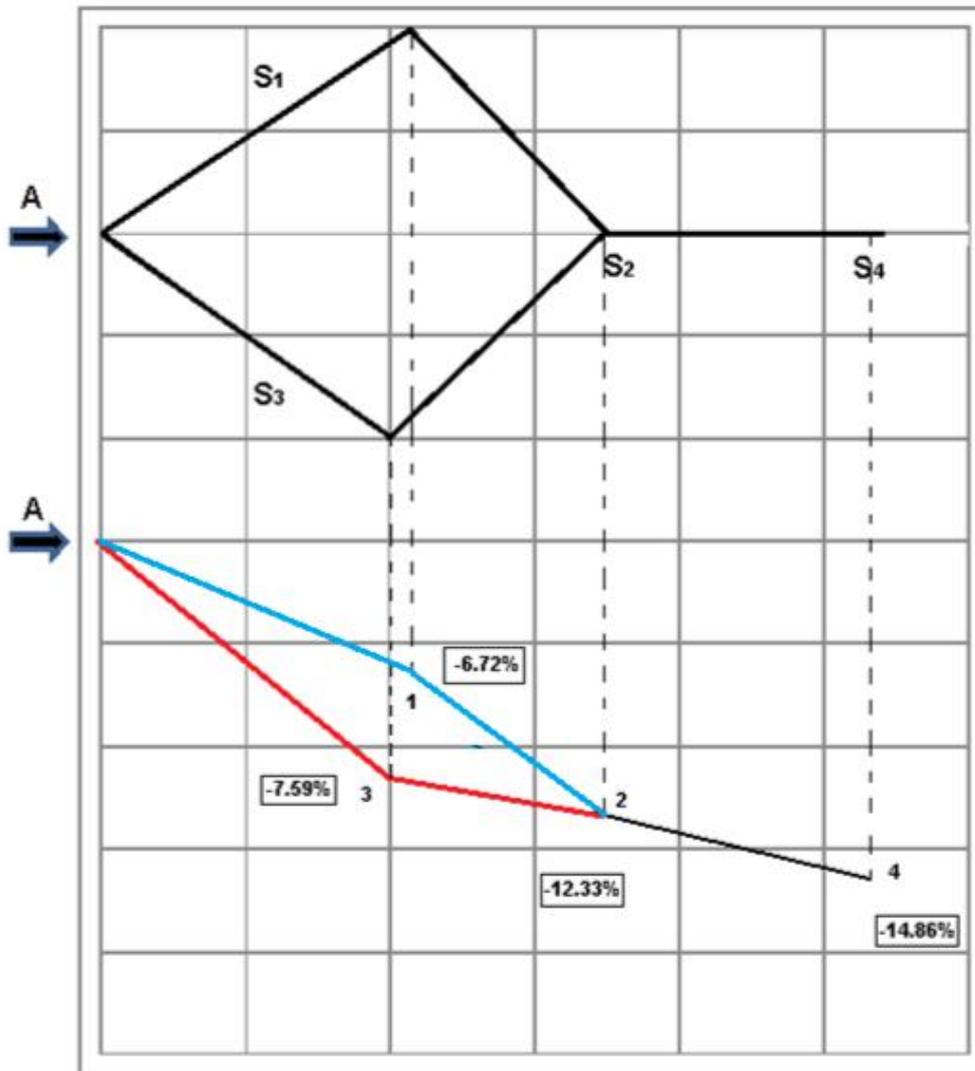
♦ Nœud 1 :
$$\Delta U_1 \% = \frac{83.95126 - 90}{90} * 100\% = -6.72\% < -10\%$$

◆ Nœud 2 :
$$\Delta U_2 \% = \frac{78.89784 - 90}{90} * 100\% = -12.33\% > -10\%$$

◆ Nœud 3 :
$$\Delta U_3 \% = \frac{83.16500 - 90}{90} * 100\% = -7.59\% < -10\%$$

◆ Nœud 4 :
$$\Delta U_4 \% = \frac{76.62210 - 90}{90} * 100\% = -14.86\% > -10\%$$

II-3.6 Déviation de tension :



A- Simulation (ETAP V12.6.0) :

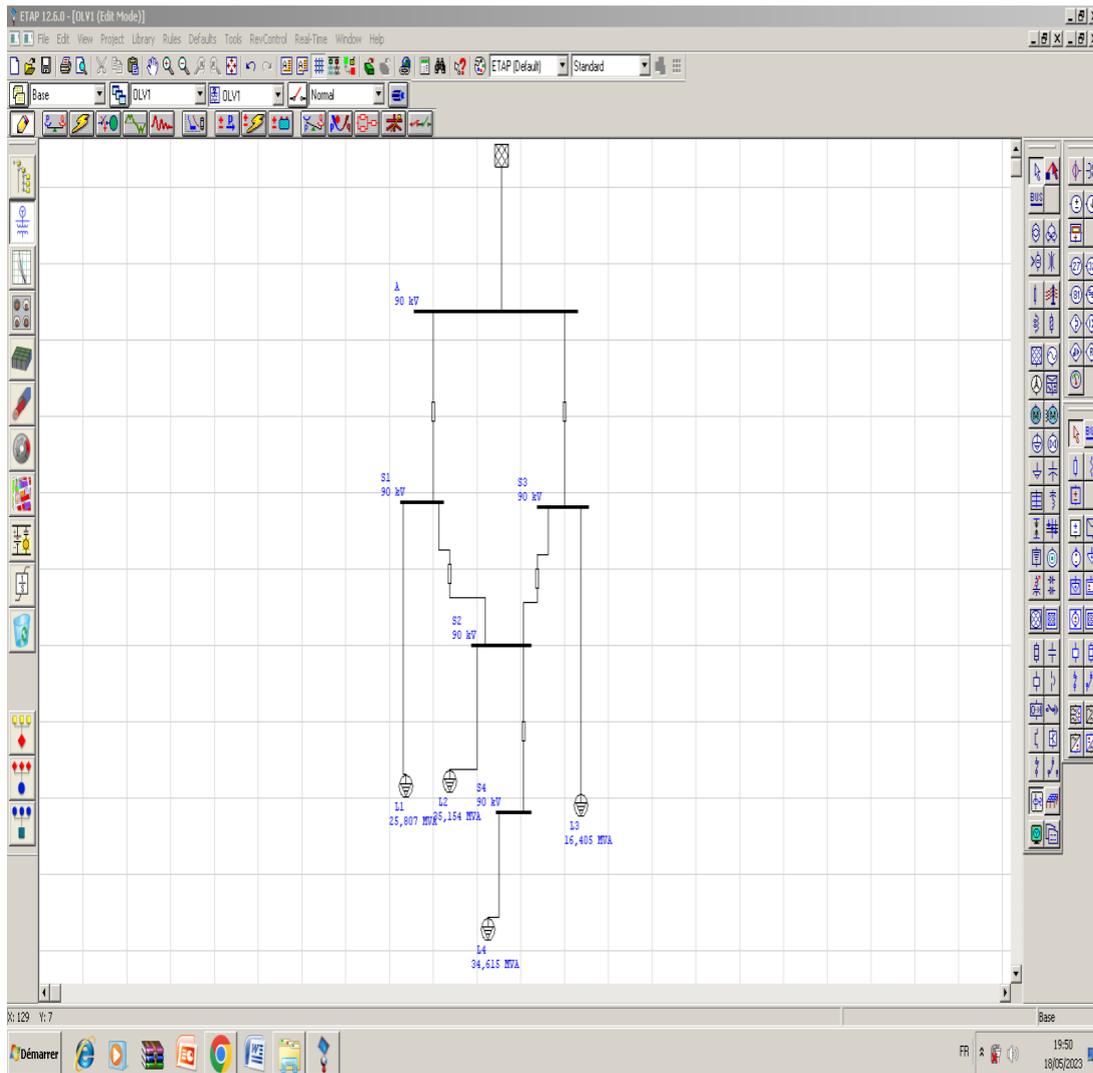


Fig II.4 : Réseau étudié (ETAP V12.6.0)

-En utilisant le "Load Flow Analysis" on obtient les resultats suivantes :

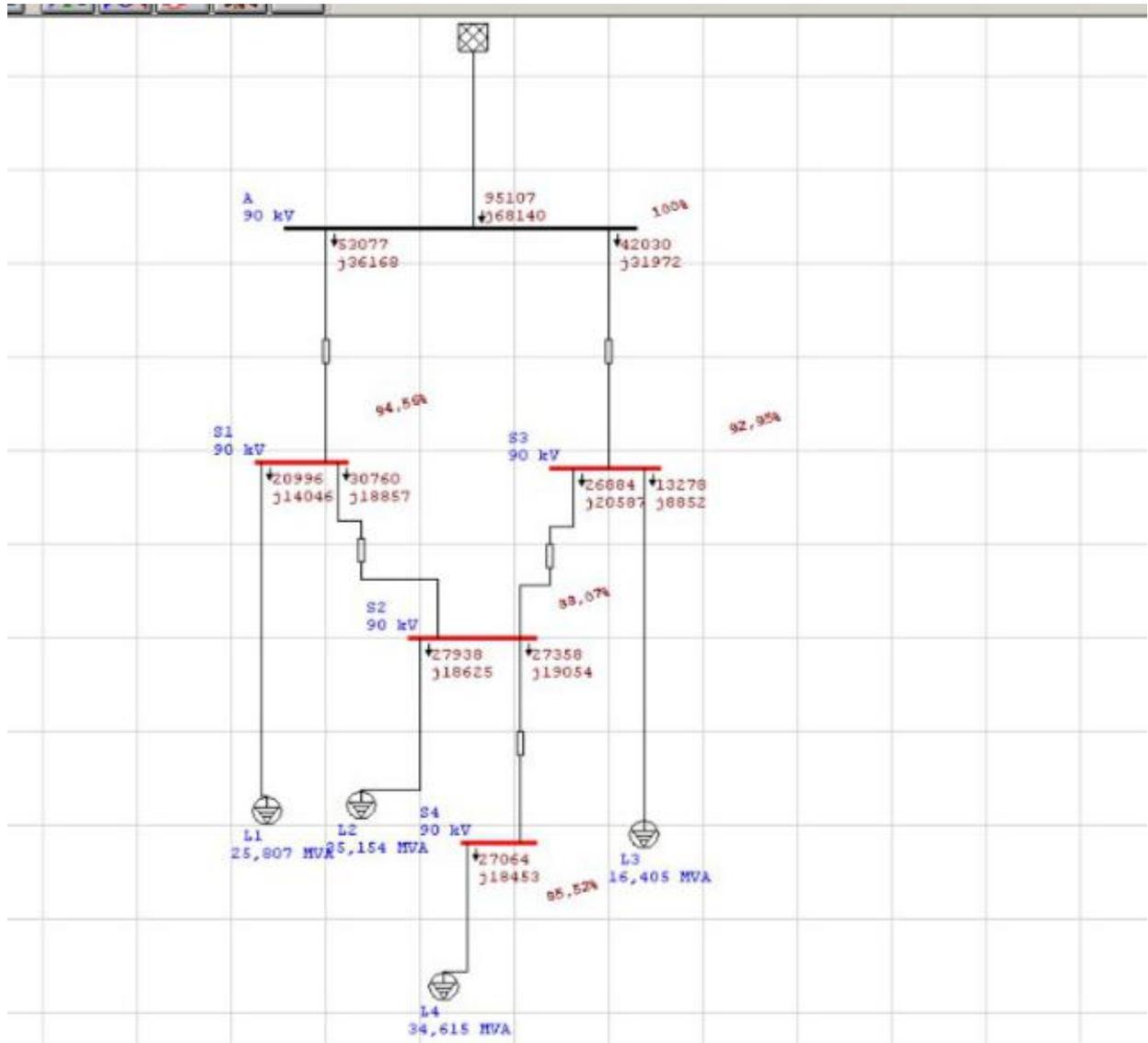


Fig II.5 : ETAP "Load flow analysis"

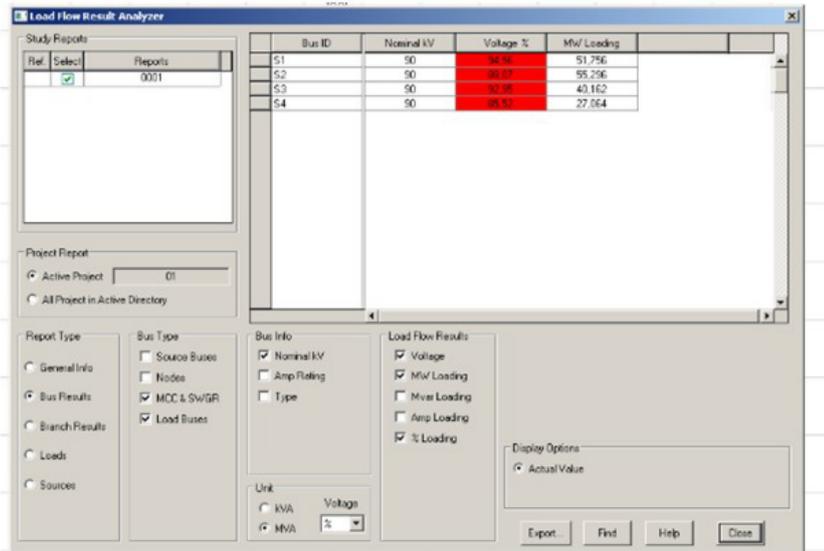


Fig II.6 : Resultats du "Load flow analysis"

Project: Voltage drop simulation
 Location: Refes Zehouene
 Contract:
 Engineer: (Student / Adoui sohaib)
 Filename: 01

ETAP
 12.6.0H

Study Case: LF

Page: 4
 Date: 05-18-2023
 SN:
 Revision: Base
 Config: Normal

Line/Cable Input Data

Line/Cable ID	Ohms or Siemens/1000 ft per Conductor (Cable) or per Phase (Line)							
	Library	Size	Length		#Phase	T (°C)	R	X
			Adj. (ft)	.				
S-12		182	127952.8		1	50	0.156	0.393
S-23		118	149278.2		1	50	0.25	0.42
S-24		92	85301.8		1	50	0.316	0.43
S-A1		300	106627.3		1	50	0.105	0.416
S-A3		300	127952.8		1	50	0.105	0.416

Line / Cable resistances are listed at the specified temperatures.

Fig II.7 : Données d'entrée de ligne/câble

Project: Voltage drop simulation
 Location: Refes Zehouene / Annaba
 Contract:
 Engineer: (Student : Adoui Sohaib)
 Filename: 01

ETAP
 12.6.0H

Study Case: LF

Page: 5
 Date: 05-18-2023
 SN:
 Revision: Base
 Config.: Normal

Voltage drop % in BUS(S1-S2-S3-S4)

Nodes	1	2	3	4
V.d%	5.44	11.93	7.05	14.48

Fig II.8 : Chutes de tension en % dans les nœuds (1-2-3-4)

b) Simulation (Matlab r2014) :

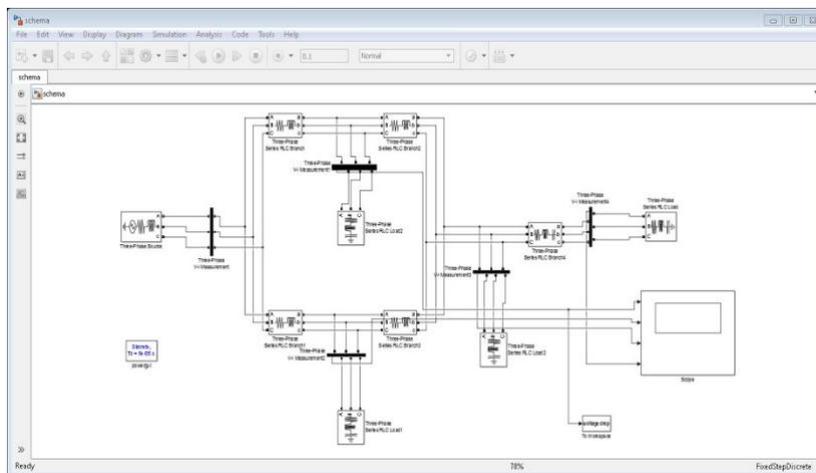


Fig II.9 : Réseau étudié (Matlab r2014)

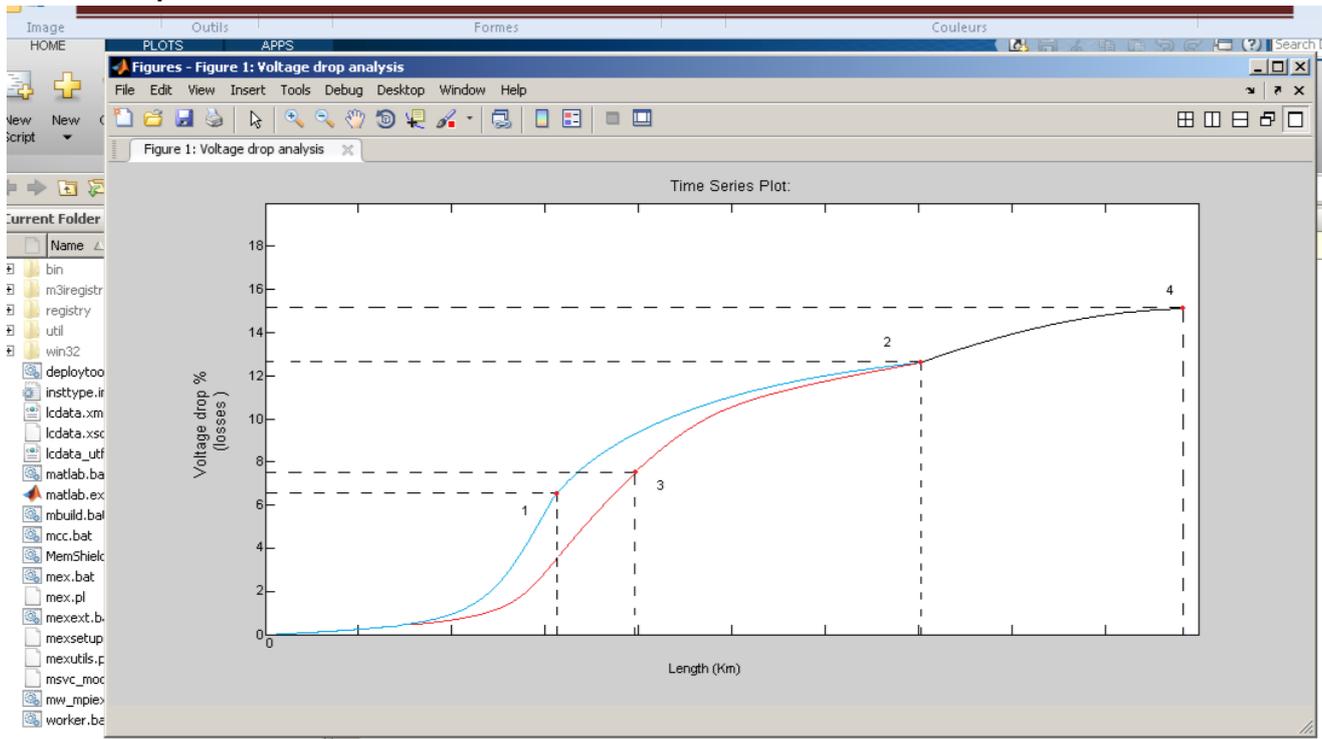


Fig II.10 : Graphique de chutes de tension en % dans les nœuds (1-2-3-4)

c) Comparaison des resultats :

Nœuds	Calculés	ETAP	Matlab
1	6.72%	5.44%	6.42%
2	12.33%	11.93%	12.23%
3	7.59%	7.05%	7.60%
4	14.86%	14.48	15.07%

Comme prévu, les résultats de la simulation (ETAP / Matlab) sont presque identiques aux valeurs calculées.

II-4 Etude du réseau futur :

L'étude du régime futur consiste déterminer les tensions dans les différents nœuds et vérifier l'exploitation dans les normes c'est-à-dire si les écarts de tension en % en chaque nœud sont inférieurs à 10%, mais cette fois nous augmentera toute les charges e 50% donc :

$S_{future} = 1.5 S_{actuel}$ pour déterminer la durée dans laquelle les charges atteindrons les 50% nous considérons que les augmentations de charge ou de puissance sont d'après les 5% par an.

$$5\% \longrightarrow 1 \text{An}$$

$$50\% \longrightarrow X \text{An}$$

$$X_{An} = 10 \text{ans.}$$

$$\blacklozenge S_{1f} = 1.5S_1 = 1.5(21.45 + j14.3) = 32.75 + j21.45$$

$$\blacklozenge S_{2f} = 1.5S_2 = 1.5(29.28 + j19.5) = 42.9 + j29.25$$

$$\blacklozenge S_{3f} = 1.5S_3 = 1.5(28.6 + j19.5) = 42.9 + j29.25$$

$$\blacklozenge S_{4f} = 1.5S_4 = 1.5(13.65 + j9.1) = 2.475 + j13.65$$

$$\diamond S'_{1f} = S_{1f} - j(\Delta Q_{TA1} + \Delta Q_{T12}) = 32.75 + j2.63893$$

$$\diamond S'_{2f} = S_{2f} - j(\Delta Q_{T23} + \Delta Q_{T12} + \Delta Q_{T24}) = 43.875 + j28.03748$$

$$\diamond S'_{3f} = S_{3f} - j(\Delta Q_{TA3} + \Delta Q_{T23}) = 42.9 + j28.300231$$

$$\diamond S'_{4f} = S_{4f} - j\Delta Q_{T24} = 2.475 + j13.37096$$

$$\diamond S''_{2f} = S'_{2f} - S'_{4f} = 64.35 + j43.40844$$

II-4.1 Détermination des puissances qui transit dans les lignes :

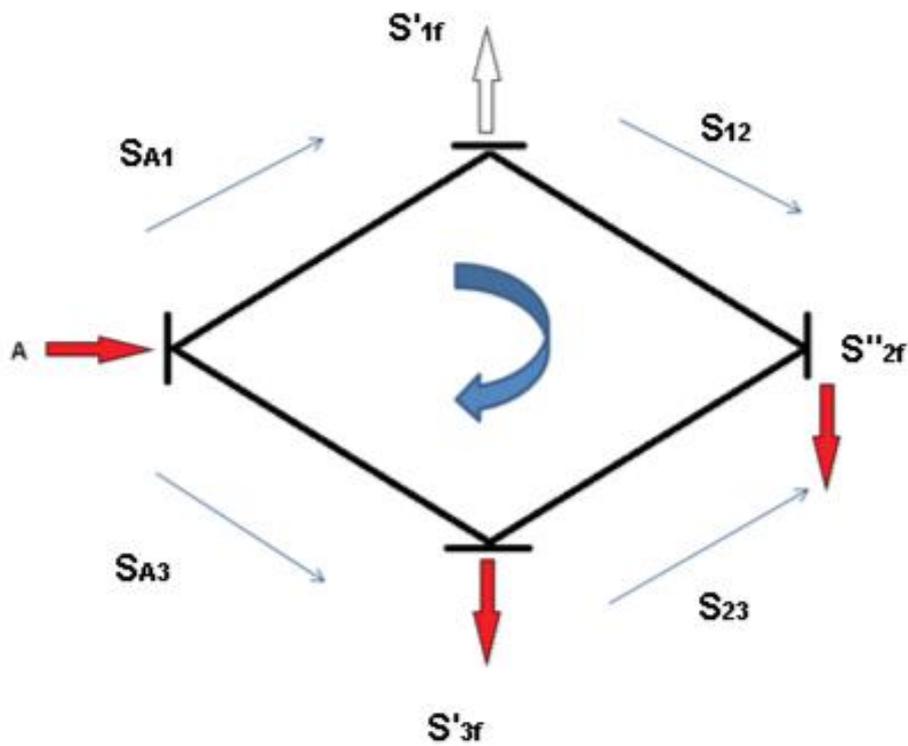


Fig II.11 : Schéma des puissances transit dans les lignes (S_{A1} - S_{A3} - S_{12} - S_{23})

$$S_{A1} = \frac{S''_2 (\check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3}) + S'_3 \check{Z}_{A3} + S'_1 (\check{Z}_{12} + \check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3})}{\check{Z}_{12} + \check{Z}_{23} + \check{Z}_{A3} + \check{Z}_{A3}}$$

- Après le calcul en trouve :

$$S_{A1} = 71.89119 + j47.52314$$

- L'application de lois de Kirchhoff donne :

$$\diamond S_{12} = S_{A1} - S'_{1f} \quad \text{—————} \quad S_{12} = 39.14119 + j26.88421$$

$$\diamond S_{23} = S''_{2f} - S'_{1f} + S_{A1} \quad \text{—————} \quad S_{23} = 25.2881 + j14.52423$$

$$\diamond S_{A3} = S'_{1f} - S''_{2f} + S'_{3f} - S_{A1} \quad \text{—————} \quad S_{A3} = 68.10881 + j42.82654$$

$$\diamond S_{24} = S'_{4f} = 2.475 + j13.37096$$

II-4.2 Détermination des chutes de tension :

-Les chutes de tension sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_{ij} R_{ij} + Q_{ij} X_{ij}}{U_n} + j \frac{P_{ij} X_{ij} - Q_{ij} R_{ij}}{U_n}$$

$$\Delta U_{A1} = \frac{71.8911 \cdot 3.4125 + 47.52314 \cdot 13.52}{90} + j \frac{71.8911 \cdot 13.52 - 47.52314 \cdot 3.4125}{90}$$

$$\Delta U_{A1} = 9.8649 + j8.99773$$

$$\Delta U_{12} = \frac{39.14119 * 6.084 + 15.327 * 26.88421}{90} + j \frac{39.14119 * 15.327 - 26.88421 * 6.084}{90}$$

$$\Delta U_{12} = 7.22432 + j4.84837$$

$$\Delta U_{23} = \frac{25.20881 * 11.375 + 14.52423 * 19.11}{90} + j \frac{25.20881 * 19.11 - 14.52423 * 11.375}{90}$$

$$\Delta U_{23} = 6.27009 + j3.51696$$

$$\Delta U_{A3} = \frac{4.095 * 68.10881 + 42.82654 * 16.224}{90} + j \frac{68.10881 * 16.224 - 42.82654 * 4.095}{90}$$

$$\Delta U_{A3} = 10.81914 + j10.23914$$

$$\Delta U_{24} = \frac{2.457 * 8.216 + 13.37096 * 11.18}{90} + j \frac{2.457 * 11.18 - 13.37096 * 8.216}{90}$$

$$\Delta U_{24} = 3.52846 + j1.32059$$

II-4.3 Détermination des tensions en chaque nœud :

$$U_A = 90KV$$

♦ Calcul de la tension au point 1 :

$$U_1 = U_A - \Delta U_{A1} = 90 - (9.8649 + j8.99773)$$

$$U_1 = 80.1351 - j8.99773$$

$$U_1 = 80.81753KV$$

♦ Calcul de la tension au point 2 :

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12} = (80.1351 - j8.99773) - (7.22432 + j4.84837)$$

$$U_2 = 72.91078 - j13.8461$$

$$U_2 = 74.39070KV$$

♦ Calcul de la tension au point 3 :

$$U_3 = U_A - \Delta U_{A3} = 90 - (10.81914 + j10.23914)$$

$$U_3 = 79.18086 - j1.23914$$

$$U_3 = 79.84014KV$$

◆ **Calcul de la tension au point 4 :**

$$U_4 = U_2 - \Delta U_{24} = (73.09078 - j13.8461) - (3.52846 + j1.32059)$$

$$U_4 = 69.566232 - j15.16669$$

$$U_4 = 71.19652KV$$

II-4.4 Détermination des écarts de tension :

Les écarts de tension sont généralement déterminés par la formule :

$$\Delta U_i \% = \frac{U_i - U_N}{U_N} * 100\%$$

◆ Nœud 1 :
$$\Delta U_1 \% = \frac{8.81753 - 90}{90} * 100\% = - 10.20\% > - 10\%$$

◆ Nœud 2 :
$$\Delta U_2 \% = \frac{74.39070 - 90}{90} * 100\% = - 17.34\% > - 10\%$$

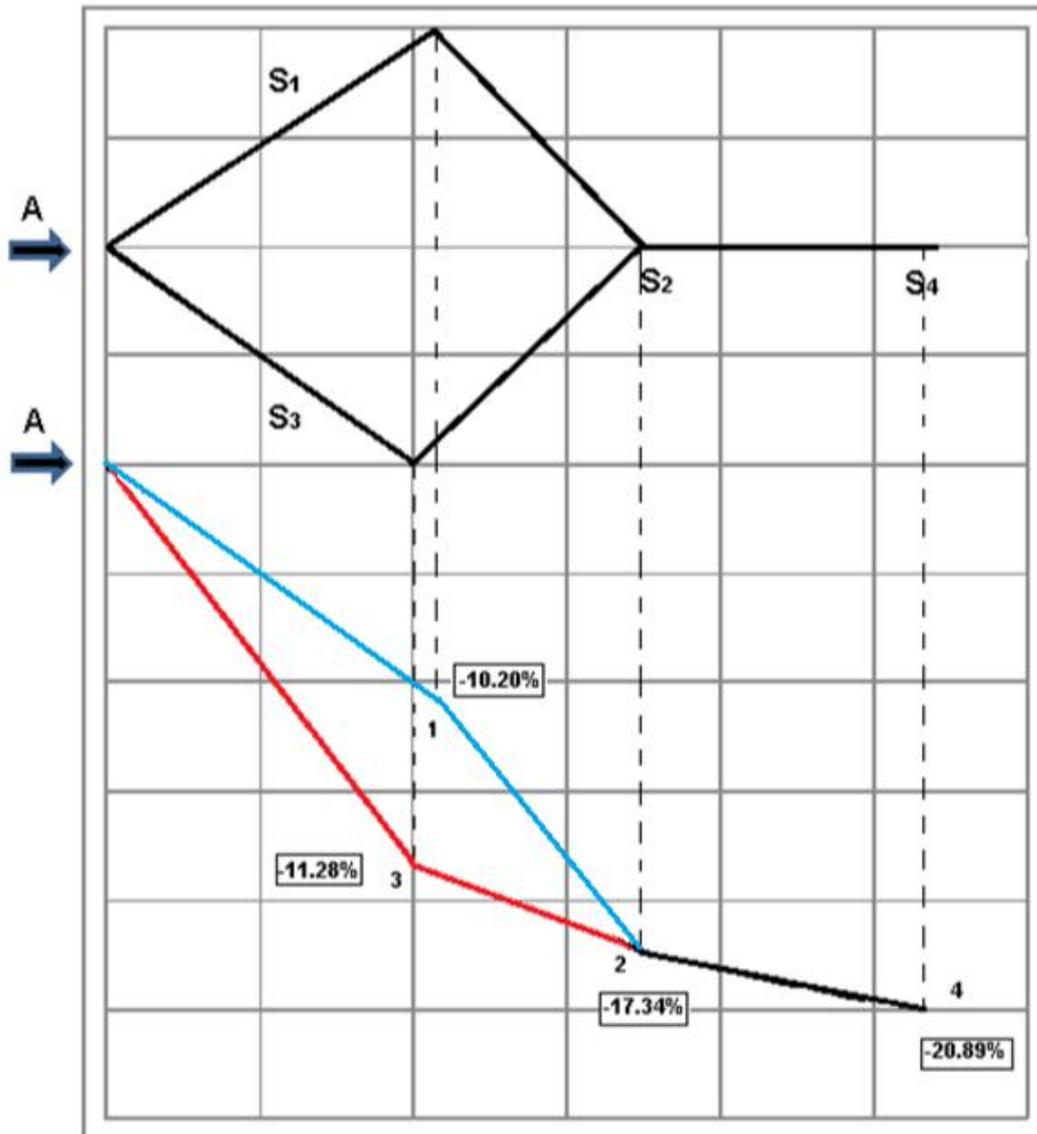
◆ Nœud 3 :
$$\Delta U_3 \% = \frac{79.84014 - 90}{90} * 100\% = - 11.28\% > - 10\%$$

◆ Nœud 4 :
$$\Delta U_4 \% = \frac{71.19652 - 90}{90} * 100\% = - 20.89\% > - 10\%$$

Disposition de la tension dans le réseau :

Nœuds	U%
1	-10.20%
2	-17.34%
3	-11.28%
4	-20.89%

II-4.5 Déviation de tension :



b) Simulation (ETAP V12.6.0) :

S = 1.5 S actuel.

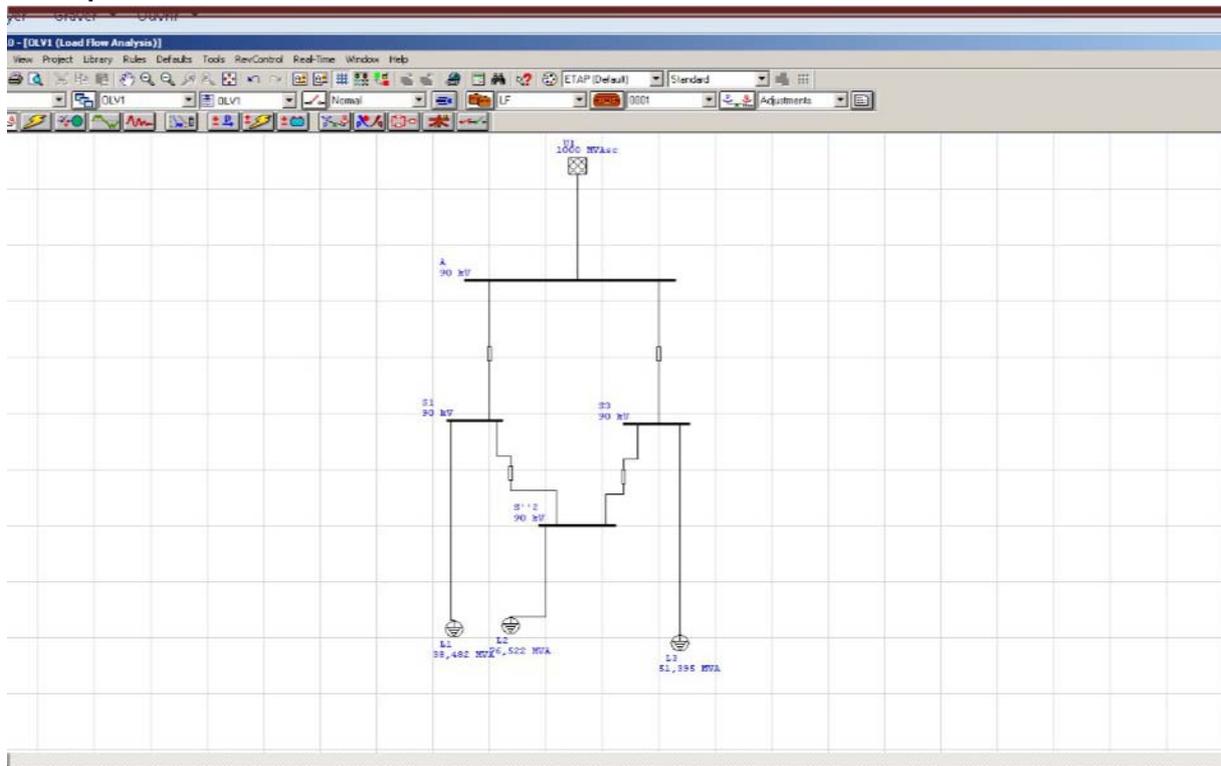


Fig II.12

Project: Voltage drop simulation
 Location: Refes Zehouene / Annaba
 Contract:
 Engineer: (Student/Adoui Sohaib)
 Filename: 01

ETAP
 12.6.0H

Study Case: LF

Page: 5
 Date: 05-19-2023
 SN:
 Revision: Base
 Config: Normal

Branch Connections

ID	Type	Connected Bus ID	
		From Bus	To Bus
S-12	Line	S'1f	S'2f
S-23	Line	S'2f	S'3f
S-A1	Line	A	S'1f
S-A3	Line	A	S'3f

Fig II.13 : Connexions des branches

Project: Voltage drop simulation
Location: Refes Zehouene / Annaba
Contract:
Engineer: (Student / Adoui Sohab)
Filename: 01

ETAP
12.6.0H
Study Case: LF

Page: 8
Date: 05-19-2023
SN:
Revision: Base
Config: Normal

Voltage drop % analysis :

Nodes	1	2	3	4
V.d%	9.57	16.89	10.76	19.94

Fig II.14 : Chutes de tension en % dans les nœuds (1-2-3-4)

c) Simulation (Matlab r2014) :

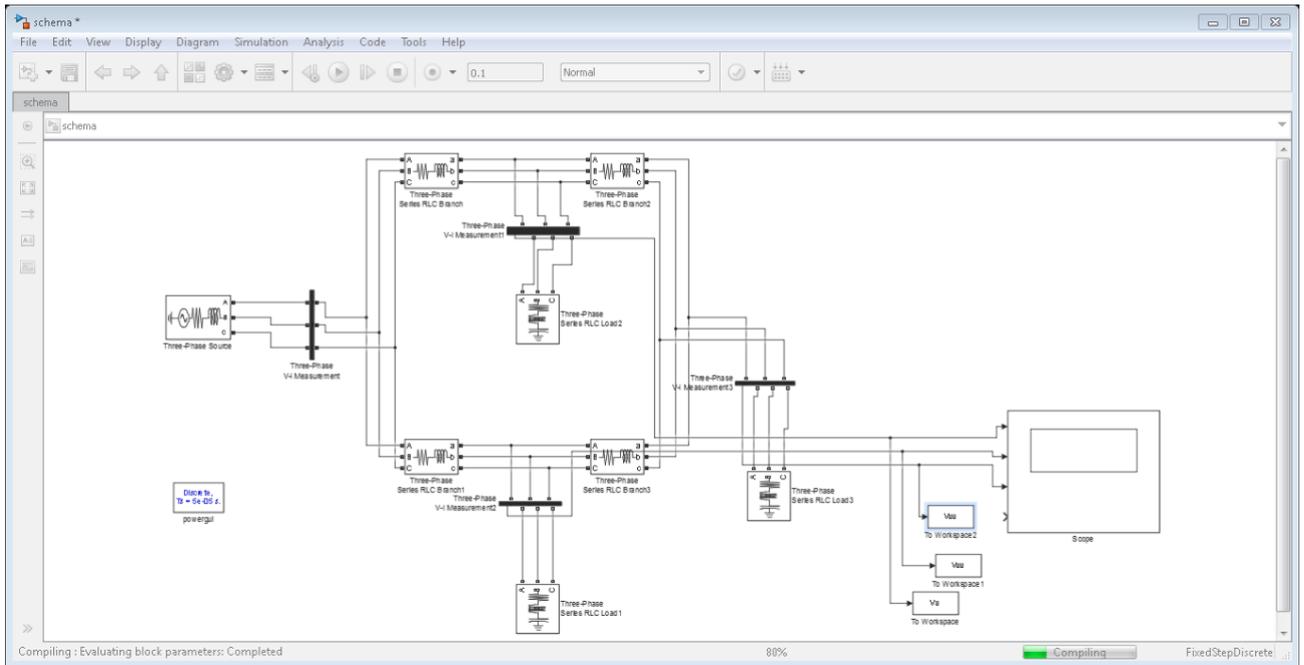


Fig II.15 : Le réseau après le déplacement de charge (4) vers (2)

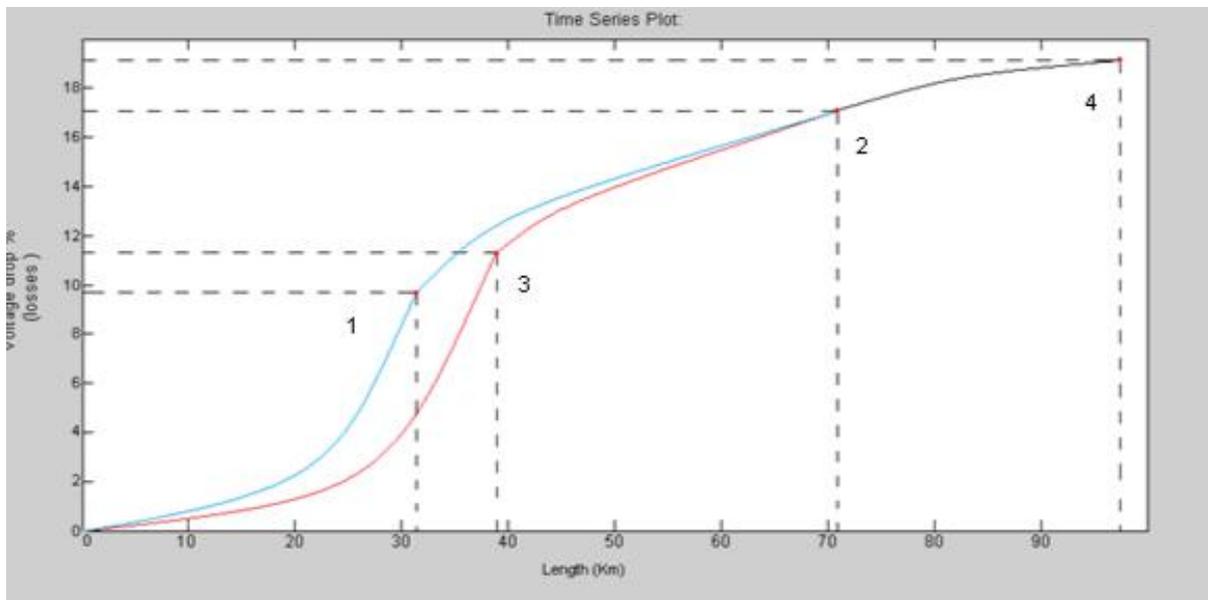


Fig II.16 : Graphe de chutes des tension

d) Comparaison des resultats :

Nœuds Resultats	Calculés	ETAP	Matlab
1	10.20%	9.57%	9.91%
2	17.34%	16.89%	16.43%
3	11.28%	10.76%	11.38%
4	20.89%	19.94%	18.49%

- Nous pouvons constater que les résultats de simulation obtenus à partir des logiciels (ETAP / Matlab) sont presque similaires aux résultats calculés.

II-5 Etude du réseau en régime "après avarie" :

Un régime "Après avarie" est un régime dont lequel il y'a rupture d'une ligne la plus chargé ou la plus longue, car elle présent beacoup d'incident que les autre, ce qui peut influer sur le niveau de tension parce que l'autre tronçon seront très charges pour notre étude en prend le cas le plus défavorable permis les autre cas qui peuvent exister.

II-5.1 En la rupture de la ligne (A-3) :

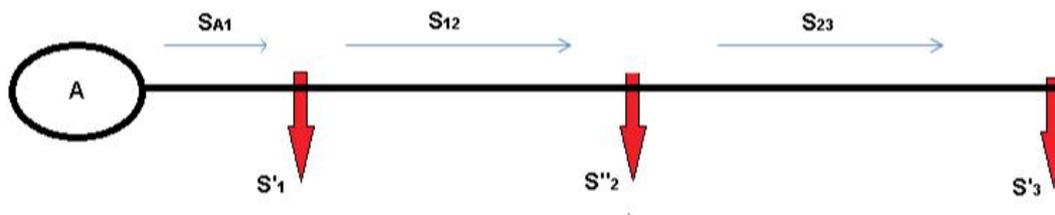


Fig II.16 : Schéma du réseau en régime après-avarie (Rupture de la ligne A-3)

♦ Détermination des puissances qui transit dans les lignes :

- D'après la loi de Kirchhoff on a :

$$S_{A1} = S'_1 + S_{12}$$

$$S_{12} = S''_2 + S_{23}$$

$$♦ S_{23} = S'_3 = 28.6 + j13.48892$$

$$S_{12} = (42.9 + j28.6) + (28.6 + j13.48892)$$

$$♦ S_{12} = 71.5 + j4.59734$$

$$S_{A1} = (21.45 + j13.48892) + (71.45 + j40.59734)$$

$$\blacklozenge S_{A1} = 92.45 + j54.08626$$

$$\blacklozenge S_{24} = S_4 = 13.65 + j8.82095$$

◆ Détermination des chutes de tension :

Les chutes de tension sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta U_{ij} = \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{Un} + j \frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{Un}$$

$$\Delta U_{A1} = \frac{92.95 * 3.4125 + 54.08626 * 13.52}{90} + j \frac{92.95 * 13.52 - 54.08626 * 3.4125}{90}$$

$$\Delta U_{A1} = 11.64931 + j11.91238$$

$$\Delta U_{12} = \frac{71.5 * 6.184 + 40.59734 * 15.327}{90} + j \frac{71.5 * 15.327 - 40.59734 * 6.184}{90}$$

$$\Delta U_{12} = 11.74712 + j9.386966$$

$$\Delta U_{23} = \frac{28.6 * 11.375 + 13.48892 * 19.11}{90} + j \frac{28.6 * 19.11 - 13.48892 * 11.375}{90}$$

$$\Delta U_{23} = 6.47886 + j4.36788$$

$$\Delta U_{24} = \frac{13.65 * 8.216 + 8.8295 * 11.18}{90} + j \frac{13.65 * 11.18 - 8.82095 * 8.216}{90}$$

$$\Delta U_{24} = 2.34 + j0.89037$$

♦ Détermination des tension en chaque nœud

: $U_A = 90\text{KV}$

♦ Calcul de la tension au point 1 :

$$U_1 = U_A - \Delta U_{A1} = 90 - (11.64931 + j11.91238)$$

$$U_1 = 78.35069 - j11.91238$$

$$U_1 = 79.25109KV$$

◆ Calcul de la tension au point 2 :

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12} = (78.35069 - j11.91238) - (11.74712 + j9.38696)$$

$$U_2 = 66.60357 - j21.29934$$

$$U_2 = 69.92637KV$$

◆ Calcul de la tension au point 3 :

$$U_3 = U_2 - \Delta U_{23} = (66.60357 - j21.29934) - (6.47886 + j4.36788)$$

$$U_3 = 60.12471 - j25.66722$$

$$U_3 = 65.37420KV$$

◆ Calcul de la tension au point 4 :

$$U_4 = U_2 - \Delta U_{24} = (66.60357 - j21.29934) - (2.34 + j0.89037)$$

$$U_4 = 64.26172 - j22.18971$$

$$U_4 = 67.698493KV$$

◆ Détermination des écarts de tension :

-Les écarts de tension sont généralement déterminés par la formule :

$$\Delta U_i \% = \frac{U_i - U_n}{U_n} * 100\%$$

◆ Nœud 1 : $\Delta U_1 \% = \frac{79.25109 - 90}{90} * 100\% = - 11.94 > - 10\%$

◆ Nœud 2 : $\Delta U_2 \% = \frac{69.92637 - 90}{90} * 100\% = - 22.30 > - 10\%$

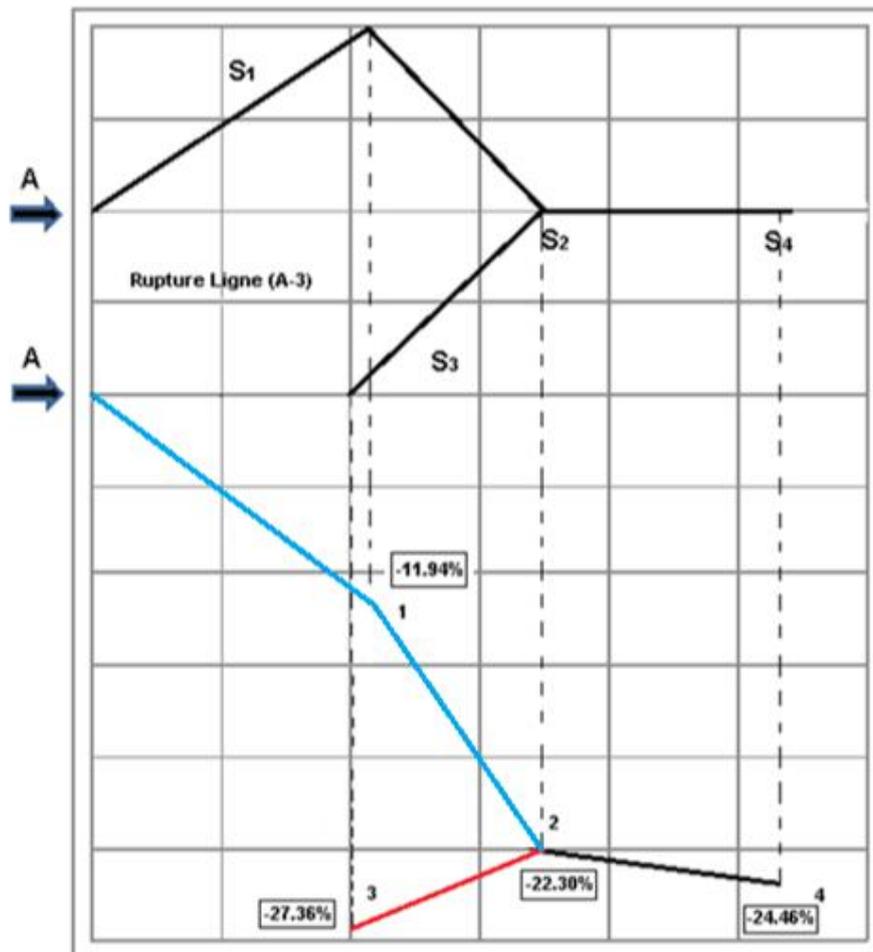
◆ Nœud 3 : $\Delta U_3 \% = \frac{65.37420 - 90}{90} * 100\% = - 27.36 > - 10\%$

◆ Nœud 4 : $\Delta U_4 \% = \frac{67.98493 - 90}{90} * 100\% = - 24.46 > - 10\%$

◆

Nœuds	U%
1	-11.94%
2	-22.30%
3	-27.36%
4	-24.46%

II-5.2 Déviation de tension :



a) Simulation (ETAP V12.6.0) :

- Rupture de la ligne (A-3) :

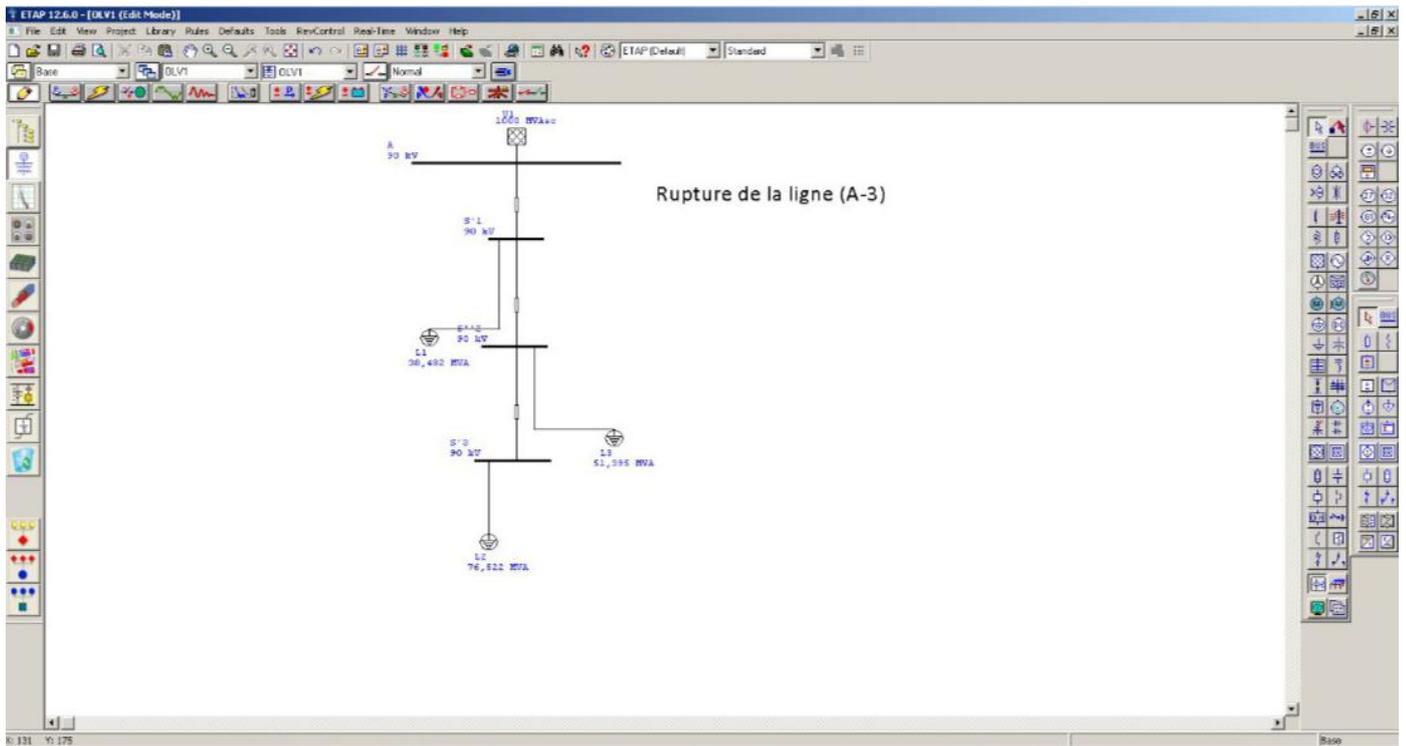


Fig II.17 : Rupture de la ligne (A-3) "ETAP"

Project: Voltage drop simulation
 Location: Refes Zehouene / Annaba
 Contract:
 Engineer: (Student / Adoui Sohaib)
 Filename: 02

ETAP
 12.6.0H

Study Case: LF

Page: 11
 Date: 05-19-2023
 SN:
 Revision: Base
 Config: Normal

Voltage drop % analysis :

Nodes	1	2	3	4
V.d%	9.97	20.87	26.71	24.06

Fig II.18 : Résultats de simulation (Vd%)

b) Simulation (Matlab r2014) :

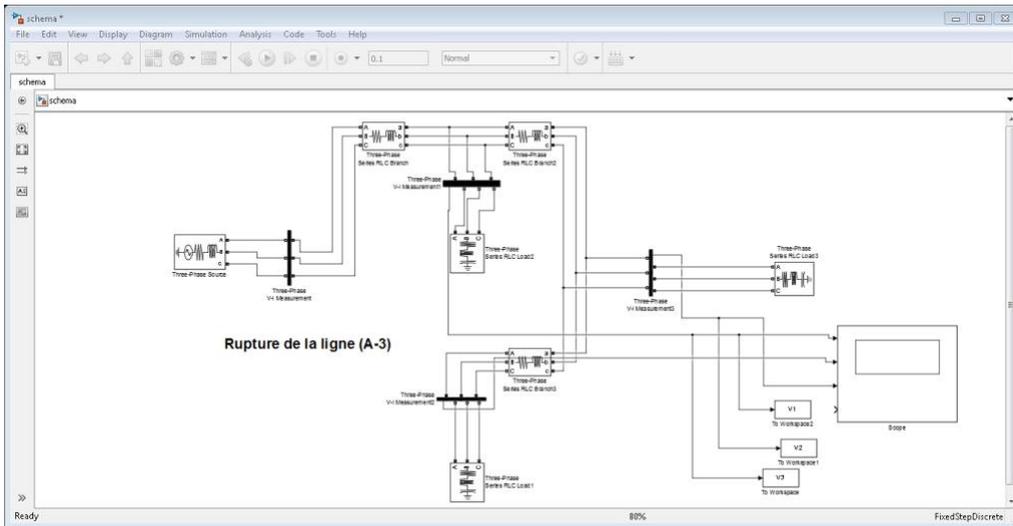


Fig II.19 : Rupture de la ligne (A-3) "Matlab".

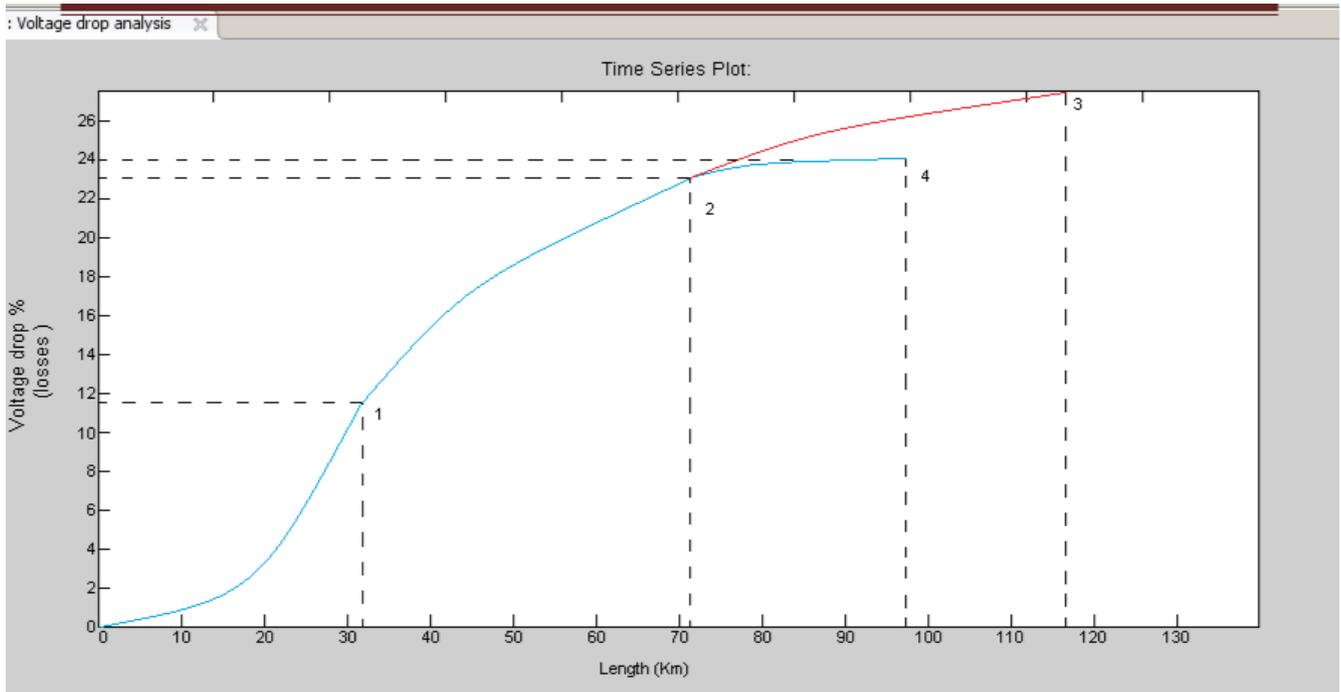


Fig II.20 : Graph de chutes des tensions

c) Comparaison des résultats :

Nœuds Resultats	Calculés	ETAP	Matlab
1	11.94%	9.97%	10.92%
2	22.30%	20.87%	21.11%
3	27.36%	26.71%	27.02%
4	24.46%	24.06%	24.07%

II-6 Calcul du courant de court-circuit :

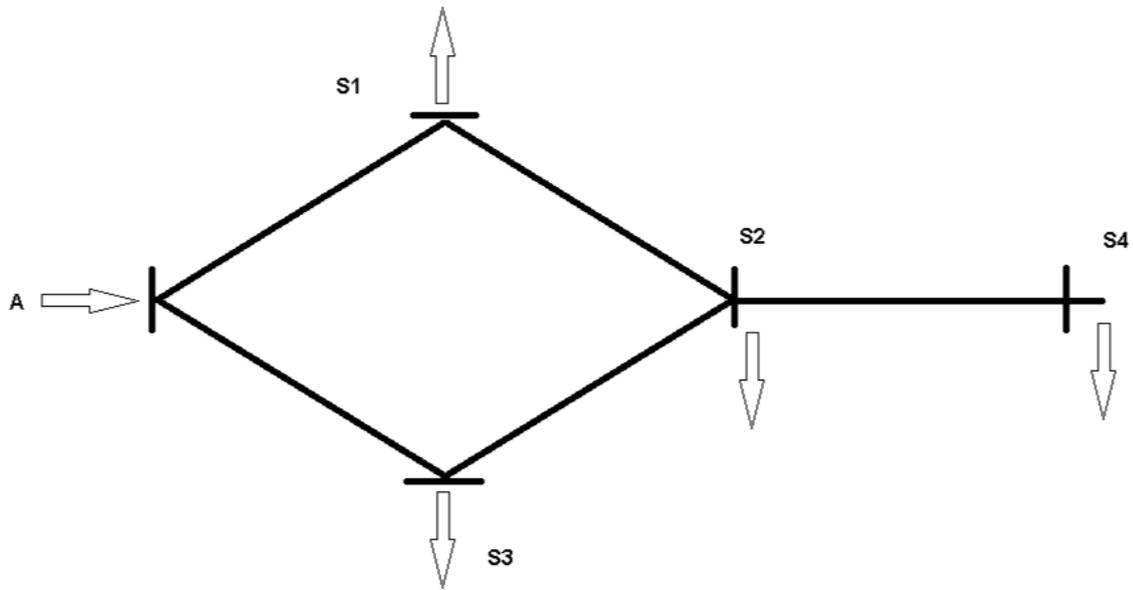


Fig II.21

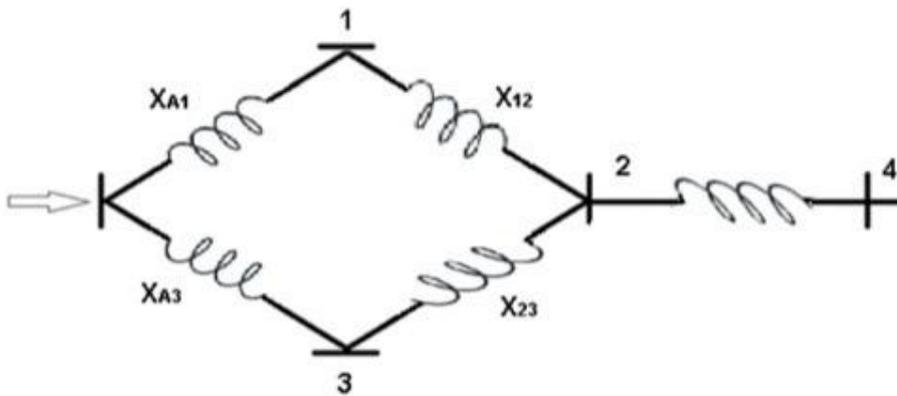


Fig II.21 : Schéma équivalent de réseau

a) Détermination de courant de court-circuit au point (1) :

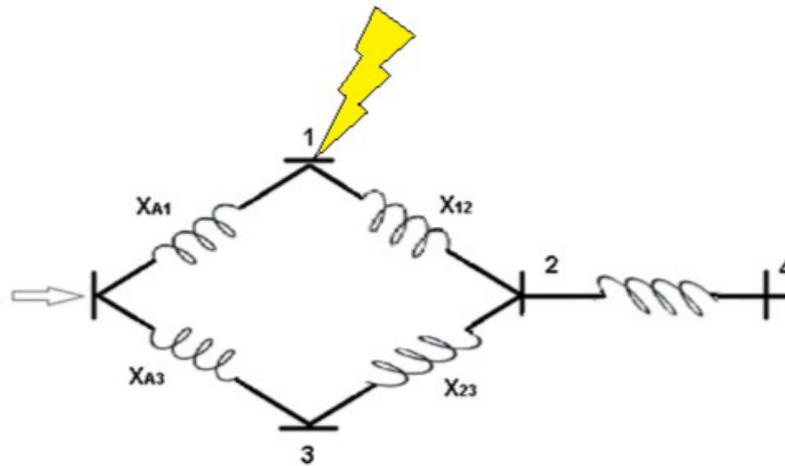


Fig II.22 : Court-Circuit au point (1)

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = 0.64 \text{ KA}$$

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = 85.25 \Omega$$

- Calcul de Z_T :

$$I_{CC1} = \frac{U_n}{\sqrt{3}Z_{T1}}$$

$$Z_1 = (Z_{12} + Z_{23} + Z_{.0}) = (6.84 + 15.327) + (11.375 + j19.11) + (4.95 + j16.224) = (21.554 + j50.661) \Omega$$

$$Z_{T1} = Z_1 // Z_{.01} = \frac{Z_1 Z_{.01}}{Z_1 + Z_{.01}} = (3.06472 + j10.71811) \Omega$$

$$I_{CC1} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T1}} = \frac{90}{\sqrt{3}\sqrt{3.06472^2 + 10.71811^2}}$$

$$I_{CC1} = 4.661203 \text{ KA}$$

b) Détermination de courant de court-circuit au point (2) :

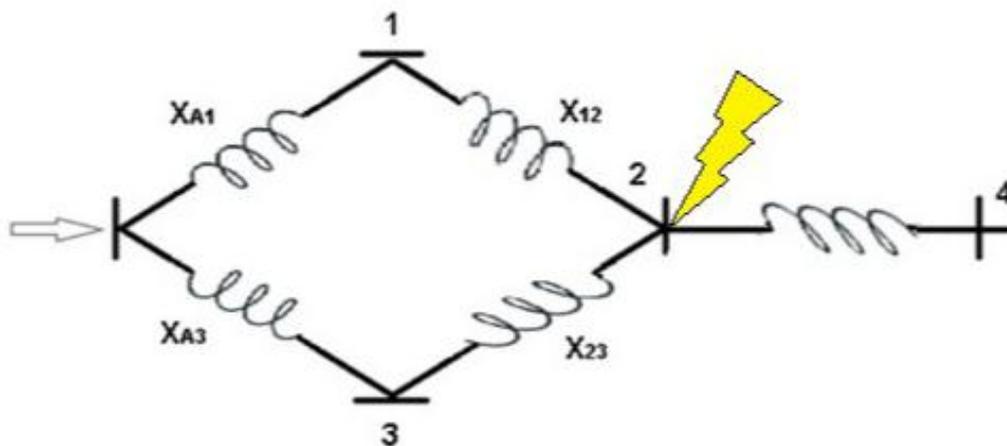


Fig II.23 : Court-Circuit au point (2)

$$I_{CC2} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T2}}$$

$$Z_{T2} = (Z_{.11} + Z_{12}) // (Z_{.13} + Z_{23}) = \frac{(Z_{.11} + Z_{12}) + (Z_{.13} + Z_{23})}{(Z_{.11} + Z_{12}) + (Z_{.13} + Z_{23})}$$

$$Z_{T2} = (5.98784 + j15.92160)\Omega$$

$$I_{CC2} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T2}} = \frac{90}{\sqrt{3}\sqrt{5.98784^2 + 15.92160^2}}$$

$$I_{CC2} = 3.0547 \text{ KA}$$

c) Détermination de courant de court-circuit au point (3) :

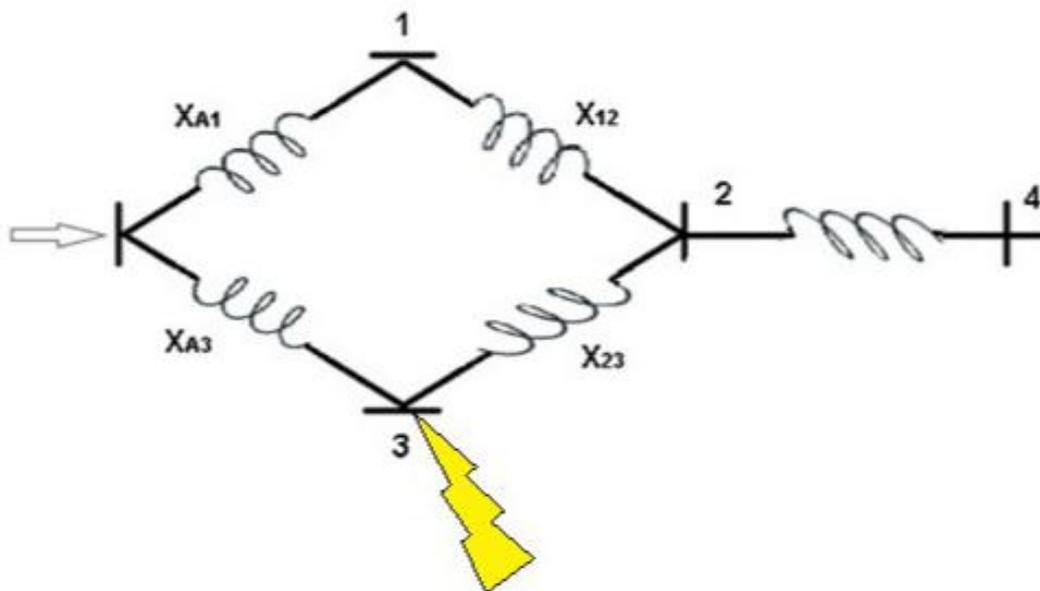


Fig II.24 : Court-Circuit au point (3)

$$I_{CC3} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T3}}$$

$$Z_{T3} = (Z_{.11} + Z_{12} + Z_{23}) // Z_{.13} = (3.59420 + j12.81928)\Omega$$

$$I_{CC3} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T3}} = \frac{90}{\sqrt{3}\sqrt{3.59420^2 + 12.81928^2}}$$

$$I_{CC3} = 3.90288 \text{ KA}$$

d) Détermination de courant de court-circuit au point (4) :

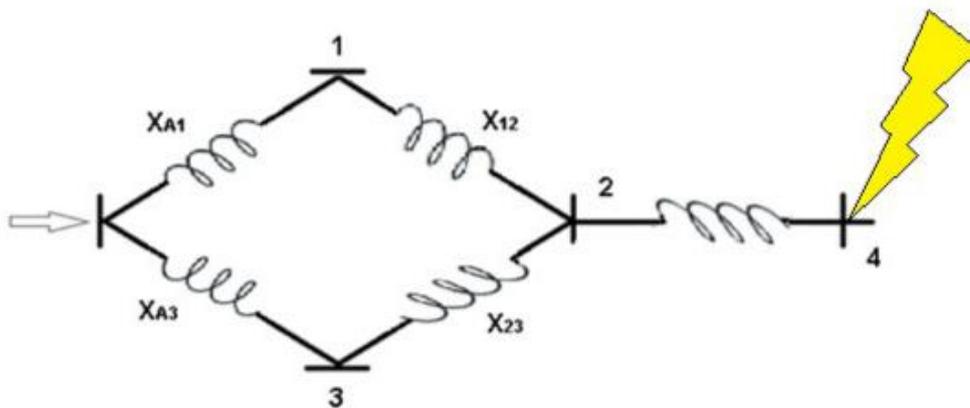


Fig II.25 : Court-Circuit au point (4)

$$I_{CC4} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T4}}$$

$$Z_4 = (Z_{.11} + Z_{12}) // (Z_{.13} + Z_{23}) = \frac{(Z_{.11} + Z_{12}) + (Z_{.13} + Z_{23})}{(Z_{.11} + Z_{12}) + (Z_{.13} + Z_{23})} = (5.98784 + j15.92160)\Omega$$

$$Z_{T4} = Z_4 // Z_{24} = (14.20384 + j27.1016)\Omega$$

$$I_{CC4} = \frac{Un}{\sqrt{3}Z_{T4}} = \frac{90}{\sqrt{3}\sqrt{14.20384^2 + 27.1016^2}}$$

$$I_{CC4} = 1.69819 KA$$

e) Simulation de court-circuit (ETAP V12.6.0) :

- Court-circuit au Point (1) :

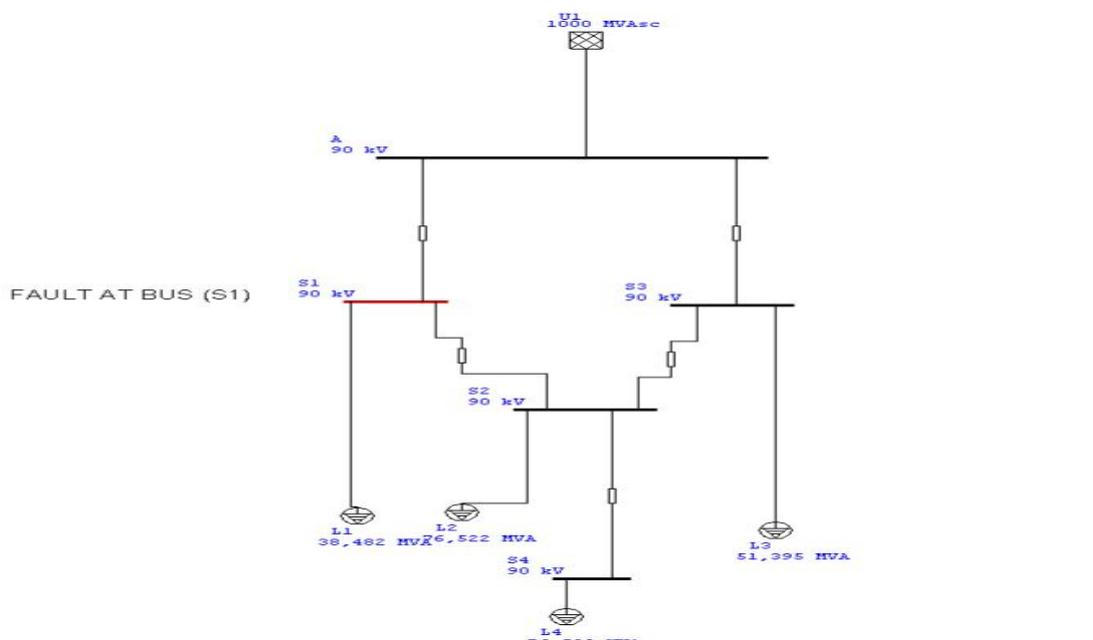


Fig II.26 : Court-Circuit au point (1) ETAP

Project: Short circuit simulation	ETAP	Page: 1
Location: Refes Zehouene / Annaba	12.6.0H	Date: 05-20-2023
Contract:		SN:
Engineer: (Student / Adoui Sohab)	Study Case: SC	Revision: Base
Filename: 01		Config: Normal

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-phase fault at bus: **S1**
 Prefault voltage = 90.000 = 100.00% of nominal bus kV (90.000 kV)

Fault at Bus	S1
Isc (KA)	3.8547

NACD Ratio = 1.00
 # Indicates a fault current contribution from a three-winding transformer
 * Indicates a fault current through a tie circuit breaker

Fig II.27 : Courant du court-circuit au point (1) ETAP

-Court-circuit au Point (2) :

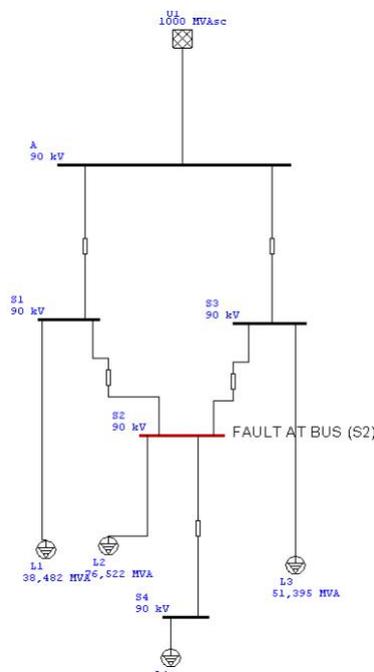


Fig II.28 : Court-Circuit au point (2) ETAP

Project: Short circuit simulation	ETAP	Page: 1
Location: Refes Zehouene / Annaba	12.6.0H	Date: 05-20-2023
Contract:		SN:
Engineer: (Student / Adoui Sohaib)	Study Case: SC	Revision: Base
Filename: 01		Config: Normal

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-phase fault at bus: **S2**
 Prefault voltage = 90.000 = 100.00 % of nominal bus kV (90.000 kV)

Fault at Bus	S2
Isc (KA)	2.9154

NACD Ratio = 1.00

Indicates a fault current contribution from a three-winding transformer
 * Indicates a fault current through a tie circuit breaker

Fig II.29 : Courant du court-circuit au point (2) ETAP

-Court-circuit au point (3) :

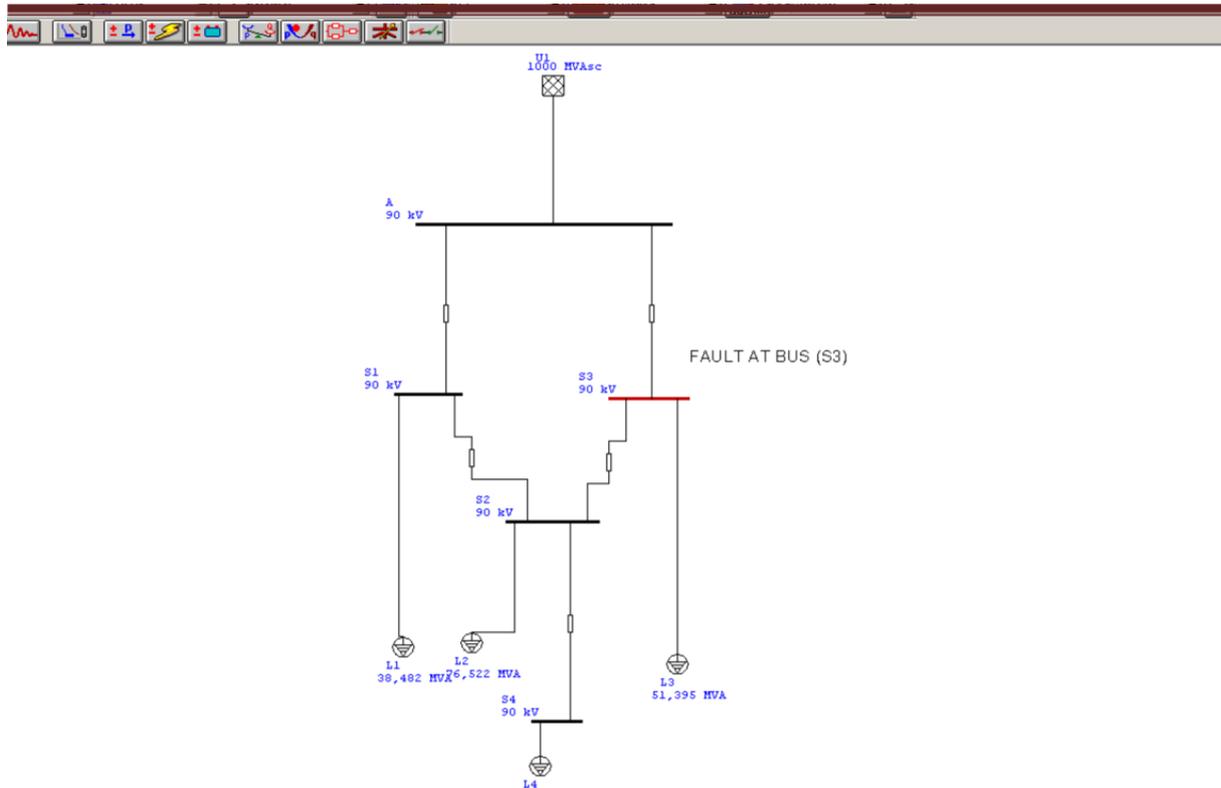


Fig II.30 : Court-Circuit au point (3) ETAP

Project: Short circuit simulation	ETAP	Page: 1
Location: Refes Zehouene / Annaba	12.6.0H	Date: 05-20-2023
Contract:		SN:
Engineer: (Student / Adoui Sohab)	Study Case: SC	Revision: Base
Filename: 01		Config.: Normal

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-phase fault at bus: **S3**
 Prefault voltage = 90.000 = 100.00 % of nominal bus kV (90.000 kV)

Fault at Bus	S3
Isc (KA)	3.56612

NACD Ratio = 1.00
 # Indicates a fault current contribution from a three-winding transformer
 * Indicates a fault current through a tie circuit breaker

Fig II.31 : Courant du court-circuit au point (3) ETAP

- Court-Circuit au point (4) :

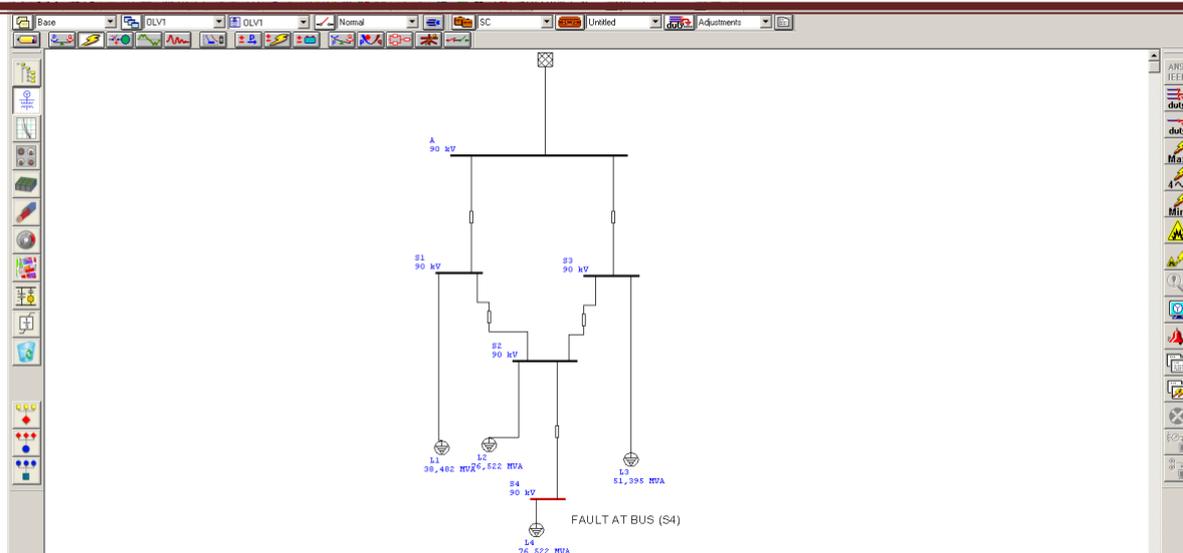


Fig II.32 : Court-Circuit au point (4) ETAP

Project: Short circuit simulation
 Location: Refes Zehouene / Annaba
 Contract:
 Engineer: (Student / Adoui Sohab)
 Filename: 01

ETAP
 12.6.0H

Study Case: SC

Page: 1
 Date: 05-20-2023
 SN:
 Revision: Base
 Config: Normal

SHORT-CIRCUIT REPORT

3-phase fault at bus: **S4**

Prefault voltage = 90.000

= 100.00 % of nominal bus kV (90.000 kV)

Fault at Bus	S4
Isc (KA)	1.4428

NACD Ratio = 1.00

- # Indicates a fault current contribution from a three-winding transformer
- * Indicates a fault current through a tie circuit breaker

Fig II.33 : Courant du court-circuit au point (4) ETAP

Point de c-c	Icc calculés [KA]	Icc (ETAP) [KA]
1	4.661203	3.8547
2	3.0547	2.9154
3	3.90288	3.56612
4	1.69819	1.4428

- d'après les valeurs des courant de court-circuit dans les variantes trouvées que ces valeurs ont une relation de la distance entre le point de court-circuit et la source, autrement dit, plus le point de court-circuit est près de la source plus la valeur du courant de court-circuit est grande.

Conclusion :

- Malgrés le manque de connaissance du logiciel (ETAP) au départ, et les difficultés de paramétrage et de compilation, les résultats obtenus sont très encourageants. Car les différents calculs (courant, tension, power-flow, court-circuit) sont presque identiques à ceux obtenus par les deux logiciels (ETAP et Matlab).

Après les études et simulations réalisées avec les logiciels (ETAP / Matlab), nous pouvons conclure que notre réseau ne peut pas être exploité car l'écart de tension en % dépasse les limites admissibles fixées à 10%.

Cela nous oblige à rechercher des solutions pour rendre l'exploitation de notre réseau possible.

Chapitre III
Energie photovoltaïque
(Panneaux solaires)

III-1. INTRODUCTION :

A travers les temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. L'énergie solaire est une énergie facilement accessible qui valorise la lumière du soleil. Elle est aussi disponible partout dans le monde. De plus, les technologies solaires sont en progrès constant, avec des équipements de plus en plus efficaces, fiables et faciles à installer, un fonctionnement sans intervention ou presque.

L'hélio électricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1939 avec les cellules à oxyde de cuivre puis au sélénium. Mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie.

Ce chapitre consiste à établir et à étudier en premier lieu la modélisation, principe de fonctionnement d'un panneau et d'un générateur photovoltaïque pour passer en second lieu à l'extraction du point maximum de puissance du système PV par la technique MPPT (maximum power point tracking).

Le système photovoltaïque est constitué de plusieurs parties, allant d'un ensemble de cellules solaires jusqu'à la batterie.

III.2 GÉNÉRALITÉS :

Les panneaux photovoltaïques sont un moyen connu de convertir directement la lumière en énergie électrique. Les cellules photovoltaïque ou photopiles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Le matériau de base est le silicium.



Fig III.1 Panneaux solaires (ici.radio-canada.ca, 4 février 2020)

L'énergie photovoltaïque est adaptée à une large gamme d'applications comme l'électrification rurale, l'éclairage, les télécommunications, le radiotéléphone, le pompage, la signalisation routière, aérienne et maritime, la détection, la protection (commandes de vannes de sécurité, système d'alarme...), les stations de mesures (stations automatiques météorologiques, mesures de débit de niveau, comptage de trafic).

II.3 Les Propriétés De Semi-conducteurs :

Le semi-conducteur est:

- ◆ Un composant chimique.

- ◆ Il facilite le processus de contrôle du courant électrique grâce à la possibilité de le connecter à l'électricité.

- ◆ Il peut être conducteur ou isolant.

- ◆ Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si.

III.3.1 Le silicium :

Le silicium est l'élément chimique de numéro atomique 14, de symbole Si, il est un semi-conducteur intrinsèque non toxique. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. La figure (2) montre le silicium.



Fig III.2 : le silicium.

Il existe deux types de semi-conducteur:

Le semi-conducteur avec plus d'électrons que de trous est dit de type N, tandis que le semi-conducteur avec plus de trous que d'électrons est dit de type P.

III.3.2. Dopage de silicium :

C'est le processus d'introduction d'impuretés dans un semi-conducteur pour augmenter sa conductivité et il existe deux types de dopage:

♦ Dopage de type N :

Est le processus de remplacement d'un atome de silicium par un atome pentavalent, quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé n (négatif). La figure (3) représente le dopage de type N.

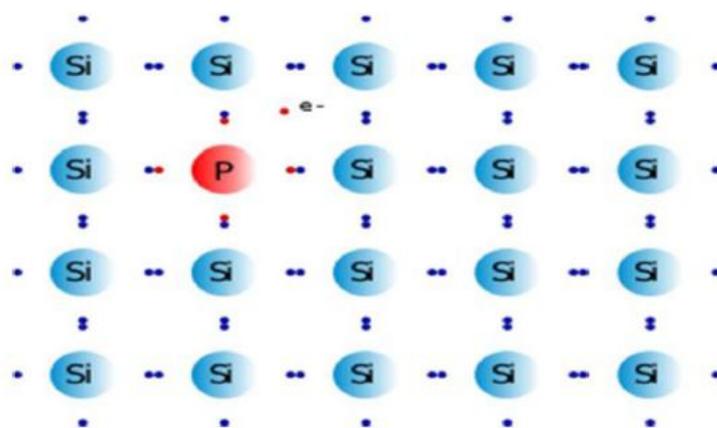
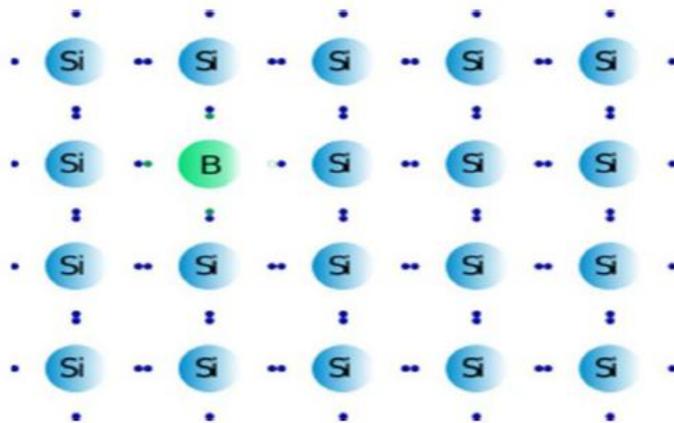


Fig III.3 :dopage de type N.

♦ Dopage de type P :

Est le processus de remplacement d'un atome de silicium par un atome trivalent, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore. La figure (4) représente le dopage de type P.

**Fig III.4 : dopage de type P.****III.3.3-La jonction (PN) :**

La jonction p-n est le dispositif utilisé dans les cellules photovoltaïques. L'absorption des photons a lieu dans la région de charge d'espace tandis que les paires électron-trou formées sont séparées par le champ électrique de la jonction provoquant la migration des électrons vers la région n et des trous vers la région p. La figure (5) représente le schéma de jonction.

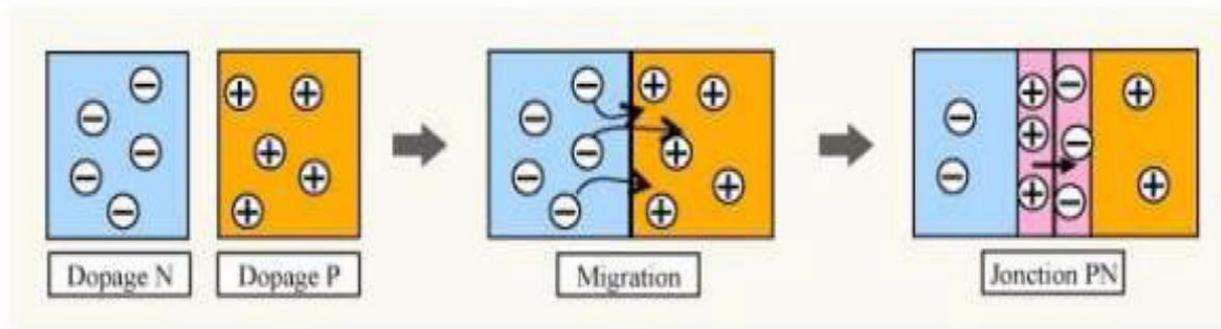


Fig III.5 : schéma de jonction PN.

III.4 Matériaux utilisés dans les cellules PV :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

III.4.1.Silicium monocristallin :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Il est rare d'obtenir parce qu'il nécessite un haut degré de pureté, ce qui nécessite de nombreuses opérations de désinfection. L'efficacité du silicium monocristallin est la plus élevée, elle est de 12-20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est désormais un frein et la silicone Le monocristallin perd du terrain face au silicium polycristallin. La figure (6) montre une plaque de silicium monocristallin.



Fig III.6 : Plaque de silicium monocristallin.

III.4.2. le silicium poly-cristallin (multi-cristallin) :

Le silicium multi-cristallin (Poly-cristallin) est la technologie la plus utilisée aujourd'hui. Elle représente à elle seule près de 50 % du marché. Les cellules sont obtenues par le procédé de coulage de cristaux de silicium, ce qui rend leur structure hétérogène. Sa quantité est légèrement inférieure à celle du silicium monocristallin, elle est comprise entre 10 et 14% selon les fabricants. Par contre, on peut dire que sa fabrication est beaucoup plus simple, et les coûts de production sont si faibles. La figure (7) montre une plaque de silicium poly-cristallin.

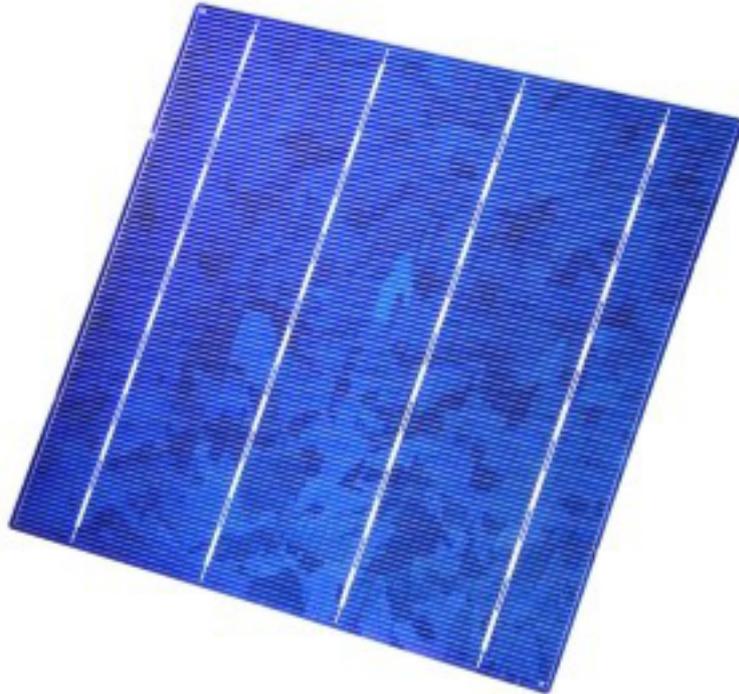


Fig III.7 : Plaque de silicium poly-cristalline.

III.4.3.le silicium amorphe :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. Il a des atomes irréguliers, c'est pourquoi il a une mauvaise conductivité et se caractérise par un coefficient d'absorption élevé. Il est utilisé là où beaucoup d'énergie électrique n'est pas nécessaire, par exemple, des montres, des calculatrices, etc... La figure (8) montre la structure d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.

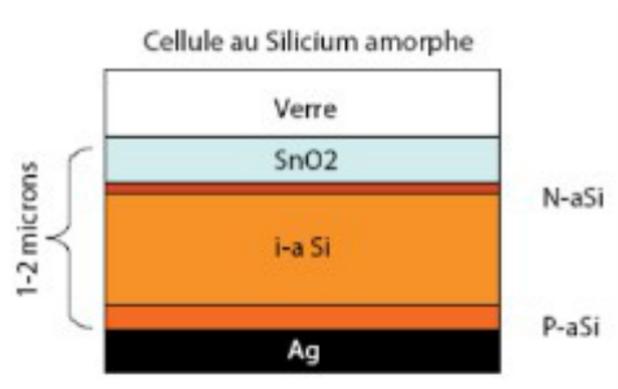


Fig III.8 : Structure d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement.

III.4.4. Cellules organiques et plastiques :

L'énergie solaire organique est l'une des nouvelles technologies organiques qui connaît un développement remarquable car elle dépend des colorants (encre, revêtement...) et de leurs propriétés physiques, notamment optiques. Les cellules solaires à base de composés organiques sont en développement important et continu. Jusqu'à présent, les meilleurs résultats sont au voisinage 5%.

On peut dire que l'utilisation de matériaux organiques permet la production de cellules solaires de grande taille sur des surfaces flexibles au moindre coût.

Les cellules organiques peuvent être de plusieurs types :

- ◆ Les cellules de type Schottky.
- ◆ Les cellules hétérojonctions de type bicouche.
- ◆ Cellules Grätzel.

- ◆ Les cellules de type réseaux interpénétrés.

III.5 Avantages et inconvénients du PV :

Comme n'importe chose dans le monde, la photovoltaïque a des avantages et

Malgré ces avantages intéressants, il y a aussi des inconvénients.

Les avantages tel que:

- ◆ Haute fiabilité.
- ◆ Peu d'entretien.
- ◆ Grande flexibilité de production.
- ◆ Utilisation indépendante et décentralisée.
- ◆ Libre de cette ressource et de l'énormité de son potentiel répandu dans le monde entier.
- ◆ Hygiène complète lors de l'utilisation.

Et les inconvénients tel que:

- ◆ Difficulté à recycler les composants du système.
- ◆ Faible facteur de charge.
- ◆ Une source diffuse de rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces.
- ◆ L'investissement augmente en fonction des décisions politiques.
- ◆ Difficile à stocker.

III.6 L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:

III.6.1 L'effet photovoltaïque :

Une différence de potentiel électrique apparaît dans les deux côtés N et P. le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière en parle alors de l'effet photovoltaïque. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule.

Toute l'énergie de la lumière solaire ne se transforme pas en électricité car certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles, et d'autres ne sont

pas assez énergétiques pour arracher un électron. Seulement les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créent des paires électrons / trous, et enfin de nombreux électrons rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile.

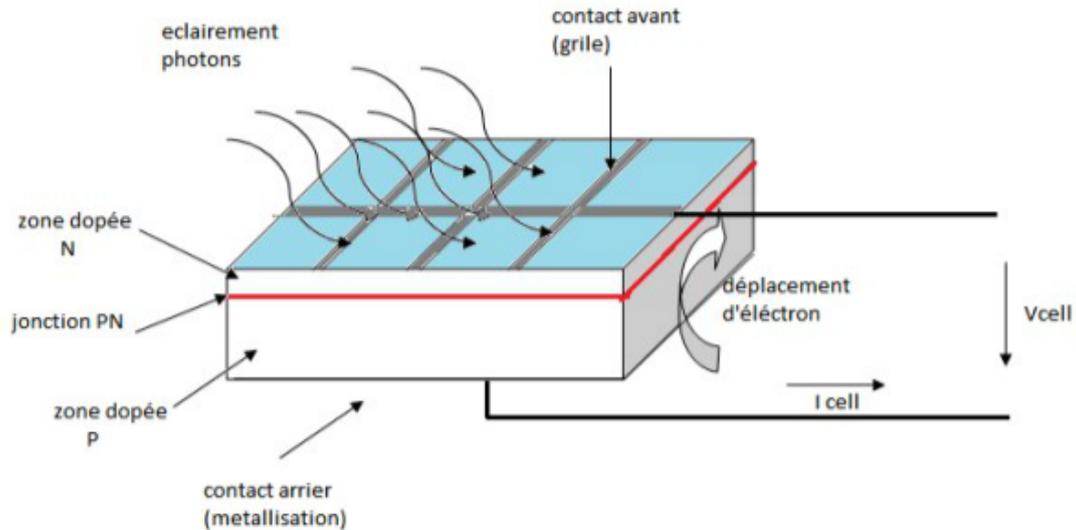


Fig III.9 : Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le module photovoltaïque est formé de cellules connectées en séries en soudant les bornes avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante. Ces ensembles de cellules sont encapsulés dans des modules étanches qui les protègent de l'humidité, des chocs et des nuisances : il s'agit du module photovoltaïque. La face avant du module est généralement en verre et la face arrière en tedlar. Des modules bi-verre (deux faces en verre) existent, essentiellement pour l'intégration aux bâtiments.

Le nombre de cellules qui composent le module dépend de la tension et de la puissance que le module doit avoir. Ainsi l'association de plusieurs modules

constitue un panneau photovoltaïque. Pour les gros générateurs, le panneau est également appelé "champ photovoltaïque".

III.7 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :

Plusieurs modèles sont disponibles pour étudier une cellule photovoltaïque, dont le but est de décrire son fonctionnement et son comportement sous différentes conditions météorologiques (éclairage et température). Les modèles les plus utilisés sont :

- ◆ Modèle à une seule diode
- ◆ Modèle à deux diodes

III.7.1 Modèle à une seule diode :

Le modèle de la cellule photovoltaïque présenté dans la Figure comporte une seule diode représentant la jonction PN, et une source de courant modélise la conversion de flux lumineux en courant électrique. Pour tenir compte des phénomènes physiques dissipatifs au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : série R_s modélise les diverses résistances des différentes couches de la cellule, R_{sh} shunt caractérise le courant de fuite dans la diode et effets de bords de la jonction

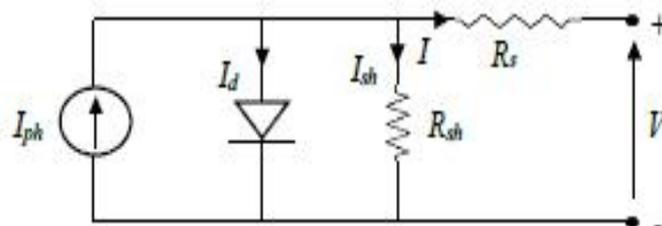


Fig III.10 : Schéma du modèle équivalent à une diode

Nous appliquons la loi de Kirchhoff aux différents noeuds on aura :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Avec :

$$I_{ph} = \frac{E}{E_0} (I_{phref} + \mu_{isc} (T - T_{ref})) \quad (1.2)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1.3)$$

Et :

$$I_0 = I_{0ref} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{qE_g}{kT}\right) \quad (1.4)$$

Le courant de la résistance shunt est :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Nous remplaçons la valeur des courant dans l'équation (1.1) donc nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

Comme $R_s \ll R_{sh} \implies R_s \simeq 0$ et en court-circuit on aura :

$$I_0 \left(\exp\left(\frac{q(I_{sc} R_s)}{nkT_0}\right) - 1 \right) \simeq I_{ph0} = I_{sc} (1 + R_s / R_{sh}) \quad (1.7)$$

Pour le circuit ouvert on aura :

$$I_{0ref} = \frac{I_{ph0} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkT}\right) - 1} \quad (1.8)$$

La tension du circuit ouvert sera :

$$V_{oc} = V_{oc0} + \Delta V_{oc} (T - T_0) \quad (1.9)$$

ΔV_{oc} : Coefficient de température de la tension de circuit (V/C°).

I_0 : courant de saturation de la diode [A].

I_{0ref} : courant de saturation de la diode dans les conditions standard [A].

E : Eclairement solaire [W/m^2].

E_0 : Eclairement solaire dans les conditions standard = 1000 [W/m^2].

T_0 : Température de fonctionnement dans les conditions de référence [K].

n : Facteur de diode idéale de la cellule solaire.

K : Constante de Boltzmann $1.38e^{-23}$ [J/K].

q : Charge de l'électron = $1.60e^{-19}$ [C].

E_s : Energie de gap du semi-conducteur.

μ_{Isc} : Coefficient de température du courant de court-circuit = 4.10^{-3} [A/K].

III.7.2 Modèle électrique d'un générateur à une seule diode :

On peut assimiler une cellule photovoltaïque à un générateur électrique, mais avec une puissance maximale fournie faible et insuffisante pour une alimentation domestique ou industrielle. Nous avons testé différentes associations en séries et parallèles pour former un générateur (panneau), ce dernier nous fournit la puissance maximale demandée selon nos besoins. Le modèle électrique du (panneau) photovoltaïque est représenté dans la figure 11

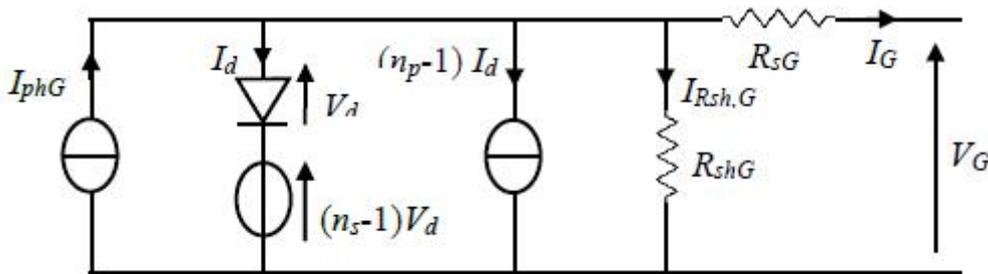


Fig III.11 : Schéma électrique équivalent pour un générateur photovoltaïque.

L'équation 1.10 résume les caractéristiques électriques d'une association en parallèle " n_p " branches, où chaque branche est constituée de " n_s " cellules élémentaires identiques.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ocG} = n_s \cdot V_{oc} \\ I_{scG} = n_p \cdot I_{sc} \end{array} \right. \quad (1.10)$$

◆ n_s : Nombre de cellules en séries.

♦ n_p : Nombre de cellules en parallèles.

Pour déterminer l'intensité du courant électrique généré par cette cellule,
Nous pouvons appliquer la loi de Kirchhoff au niveau des nœuds.

$$I_G = I_{phG} - I_{dG} - I_{shG} \quad (1.11)$$

Avec :

$$V_G = n_s \cdot V$$

$$I_G = n_p \cdot I$$

$$I_{phG} = n_p \cdot I_{ph}$$

$$I_{dG} = n_p \cdot I_d$$

$$I_{shG} = n_p \cdot I_{sh}$$

$$R_{sG} = \frac{n_s}{n_p} \cdot R_s$$

$$R_{shG} = \frac{n_s}{n_p} \cdot R_{sh}$$

(1.12)

-L'équation 1.10 sera présentée ainsi :

$$I_G = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left[\exp \left[\frac{q \left(\left(\frac{V}{n_s} \right) + \left(\frac{I}{n_p} \right) \left(\frac{n_p}{n_s} R_s \right) \right)}{nkT} \right] - 1 \right] - n_p \frac{\left(\left(\frac{V}{n_s} \right) + \left(\frac{I}{n_p} \right) \left(\frac{n_p}{n_s} R_s \right) \right)}{\left(\frac{n_p}{n_s} R_{sh} \right)}$$

(1.13)

Après simplifications, on aura :

$$I_G = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{n_s nkT} \right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \tag{1.14}$$

III.7.3 Modèle à deux diodes :

Le modèle a deux diodes, représenté dans la Figure (12), est composé d'une source de courant modélisant l'éclairement solaire. Les pertes par effet Joule sont modélisées par les résistances R_{sh} et R_s et les deux diodes : soit une qui caractérise la jonction PN et l'autre modélise le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaires.

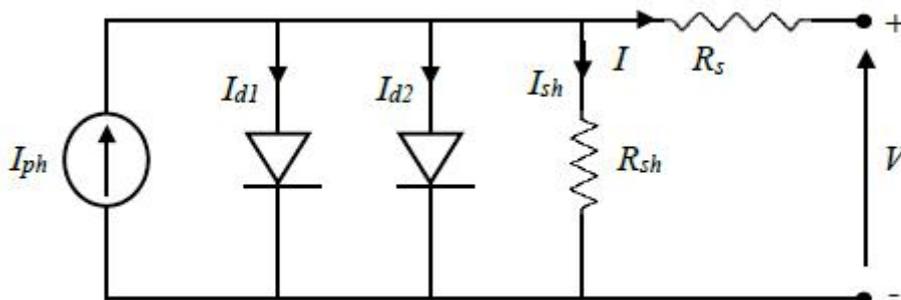


Fig III.12 : Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes de la cellule solaire.

Alors, pour calculer le courant dans ce cas, nous appliquons la loi de Kirchhoff aux différents noeuds on aura :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (1.15)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_1 k T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_2 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.16)$$

Avec :

$$I_{01} = K_1 T^3 \cdot \exp\left(\frac{-qE_g}{K.T}\right) \quad (1.17)$$

$$I_{02} = K_2 T^{5/2} \cdot \exp\left(\frac{-qE_g}{K.T}\right) \quad (1.18)$$

Avec :

$$K_1 = 1.2 A / cm^2 \cdot K^3, K_2 = 2.9 * 10^5 A / cm^2 \cdot K^{5/2}$$

III.7.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes :

Le modèle électrique d'un générateur panneau photovoltaïque à deux diodes est représenté sur la Figure (13)

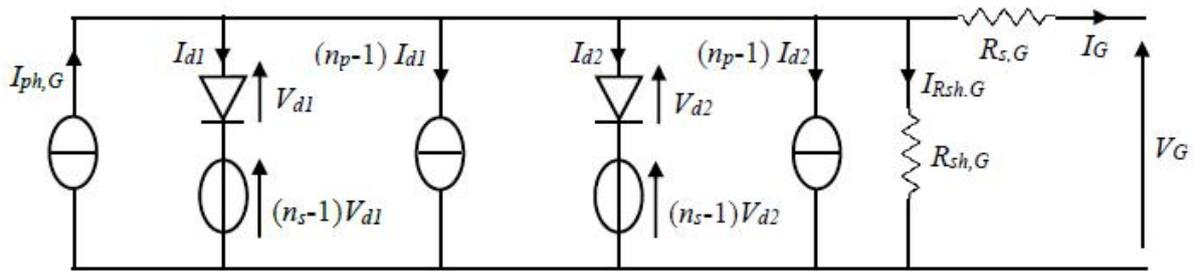


Fig III.13 : Schéma électrique équivalent d'un GPV du modèle à deux diodes.

En appliquant la loi de Kirchhoff aux différents noeuds on aura :

$$I_G = I_{phG} - I_{d1G} - I_{d2G} - I_{shG} \tag{1.19}$$

La simplification de l'équation donne :

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_s n_1 k T}\right) - 1 \right] - n_p I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_s n_2 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{1.20}$$

III.8 SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS :

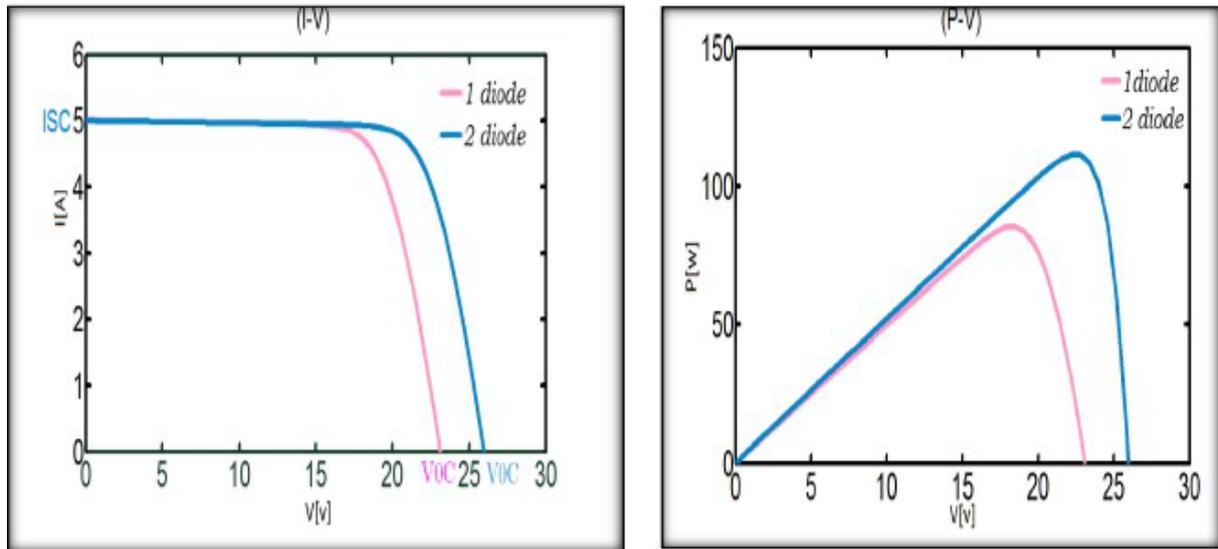


Fig III.14 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un GPV à une et à deux diodes Matlab/Simulink.

Afin de valider le modèle de notre générateur photovoltaïque, une étude comparative entre ce dernier et celui du modèle réel obtenue à l'aide du logiciel « PV syst ». On a comparé notre résultat de simulation avec le tableau suivant donné par « PVsyst » ce qui nous a permis de valider notre panneau.

Paramètre	Unité	Valeurs
Cod.de référence	Gref [W/m ²]	1000
Courant de court-circuit	Isc [A]	5
Point de puissance max	Imp [A]	4.27
Coefficient de température	muIsc [ma/°C]	1.2
	muIsc [%/°C]	0.024
Circuit ouvert	Voc [V]	22
μVoc	[mV/°C]	-69
Resistance en série	Rs [ohm]	0.46
Resistance en parallèle	Rp [ohm]	300
Nbrde cellules	En série	36
Vmmp	[V]	18

Tableau1.1 Paramètres du BPSOLAR. Rapporté du logiciel "PV Syst".

III.8.1 Logiciel Pvsyst :

PVsyst est un logiciel conçu pour l'industrie de l'énergie solaire. Il permet de créer, simuler et analyser des systèmes d'énergie solaire de tous types. PVsyst est réputé pour sa précision et sa flexibilité.

Le rayonnement solaire et la température sont des paramètres clés pour assurer le bon fonctionnement de la simulation, car les avantages de l'installation solaire dépendent fortement de l'intensité annuelle de l'ensoleillement.

III.8.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un photovoltaïque :

Les caractéristiques du PV dépendent des conditions météorologiques. Dans cette partie, nous étudions l'influence de ces conditions sur les caractéristiques de sortie du générateur photovoltaïque. Les figures suivantes représentent le modèle du PV à une diode obtenue par le logiciel « Pvsyst ».

III.8.2.1 Influence de l'éclairement :

La Figure (16) représente les caractéristiques courant-tension, puissance-tension d'un photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

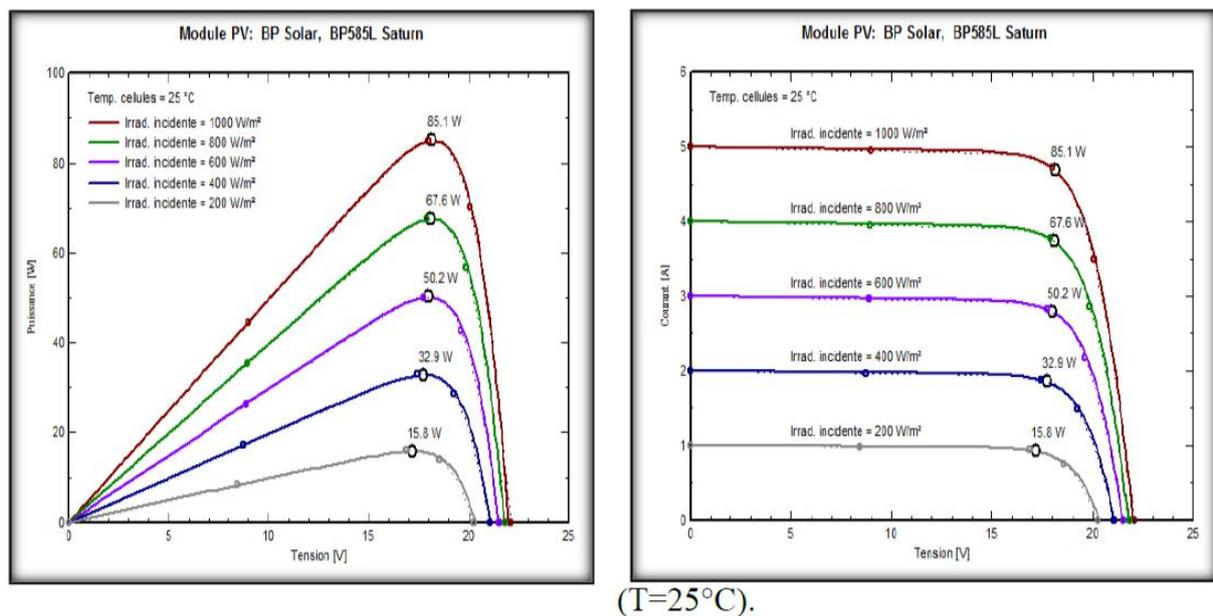


Fig III.16 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'un PV (logiciel « Pvsyst »).

On constate que le courant de court-circuit produit par la photopile augmente proportionnellement à l'éclairement solaire, par contre la tension varie légèrement.

Ceci veut dire que le point de puissance maximale (*PPM*) est proportionnel à l'éclairement pour la valeur de tension correspondante.

III.8.2.2 Influence de la température :

Nous présentons à la Figure (17) les caractéristiques (*I-V*) et (*P-V*) pour différentes températures de fonctionnement d'un PV à une irradiation constante ($E=1000\text{W/m}^2$).

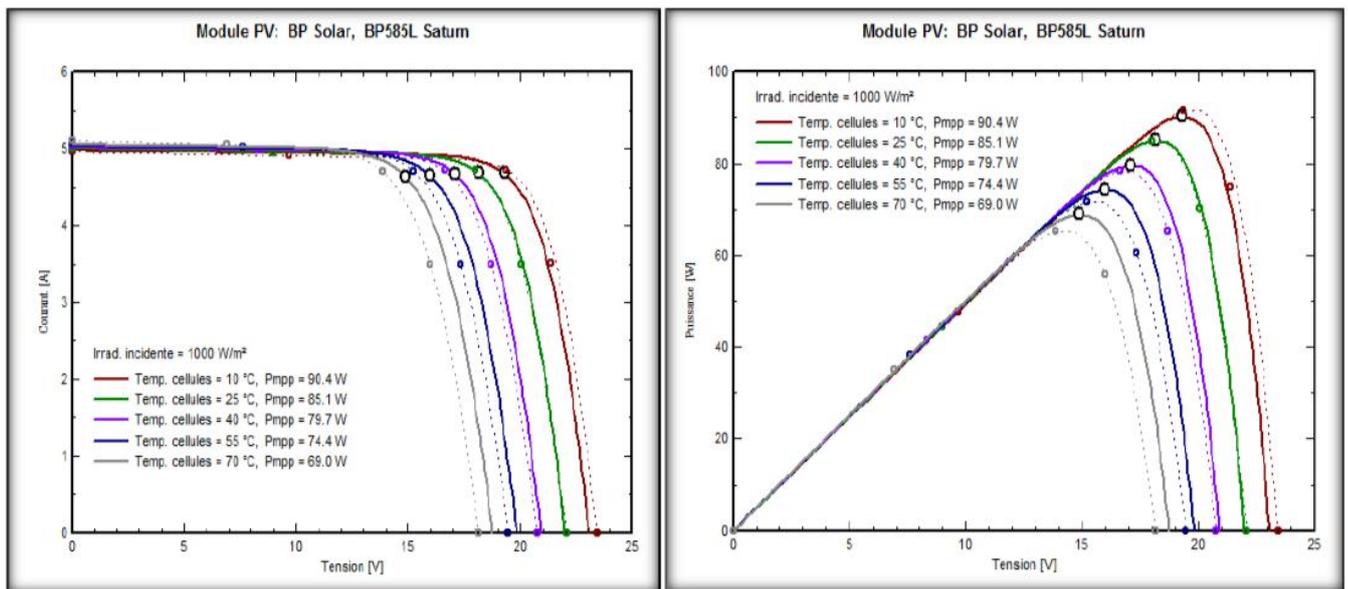


Fig III.17 : L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un PV logiciel « Pvsyst ».

Ce résultat a permis de constater que la température a une influence négligeable sur le courant de court-circuit I_{sc} . Par contre, elle a un effet direct sur la tension du circuit ouvert V_{oc} puisque cette dernière baisse assez fortement lorsque la température augmente et par conséquent, la puissance diminue.

III.8.2.3 Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement :

Dans les conditions réelles, la température et l'éclairement varient simultanément. Alors, il est primordial d'étudier le comportement de la cellule photovoltaïque en fonction de ces variations simultanées (Fig 18).

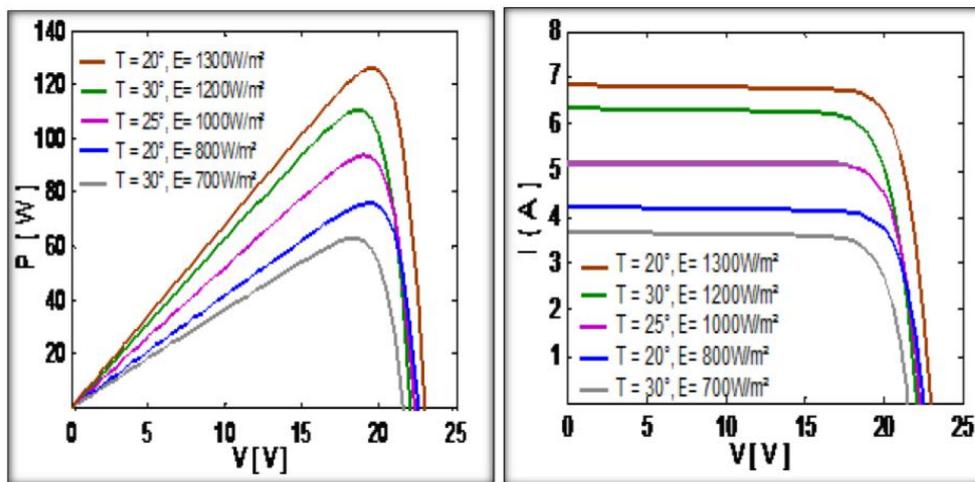


Fig III.18 : Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques (I - V) et (P - V) d'un PV

On remarque que la variation simultanée des paramètres météorologiques induit une variation simultanée de la tension V_{oc} et du courant I_{sc} ce qui engendre une variation aléatoire du point de puissance maximale.

Par ailleurs, on constate que le modèle à une diode nous a permis d'obtenir des caractéristiques très proches de celles du générateur photovoltaïque réel. Par conséquent, pour la suite de notre travail on utilisera le modèle à une seule diode.

III.9 MODÉLISATION D'UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au point de vue des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Par conséquent, les panneaux photovoltaïques sont réalisés par association de plusieurs cellules élémentaires dans le but d'augmenter leur puissance. Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant, généralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires de caractéristiques identiques.

Suivant les besoins de l'utilisation, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallel de façon à obtenir un champ photovoltaïque de tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de photopiles au cours de son fonctionnement. Le courant et la tension de sortie du champ de modules photovoltaïques utilisant le modèle à une diode sont liés par les deux relations 1.21 et 1.22

$$I = n_p N_p I_{ph} - n_p N_p I_{01} \left[\exp\left(\frac{q\left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p}\right)}{n_s n k T}\right) - 1 \right] - n_p N_p \frac{\left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p}\right)}{R_{sh}} \quad (1.21)$$

Ou bien :

$$I = n_p N_p I_{ph} - n_p N_p I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_s N_s k n T}\right) - 1 \right] - n_p N_p \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1.22)$$

Avec :

N_s : Nombre de générateurs en séries.

N_p : Nombre de générateurs en parallèles.

III.9.1 Association en série :

Pour augmenter la tension dans un champ de module photovoltaïque, on monte une association série des modules car la tension augmente proportionnellement avec le nombre de modules en série

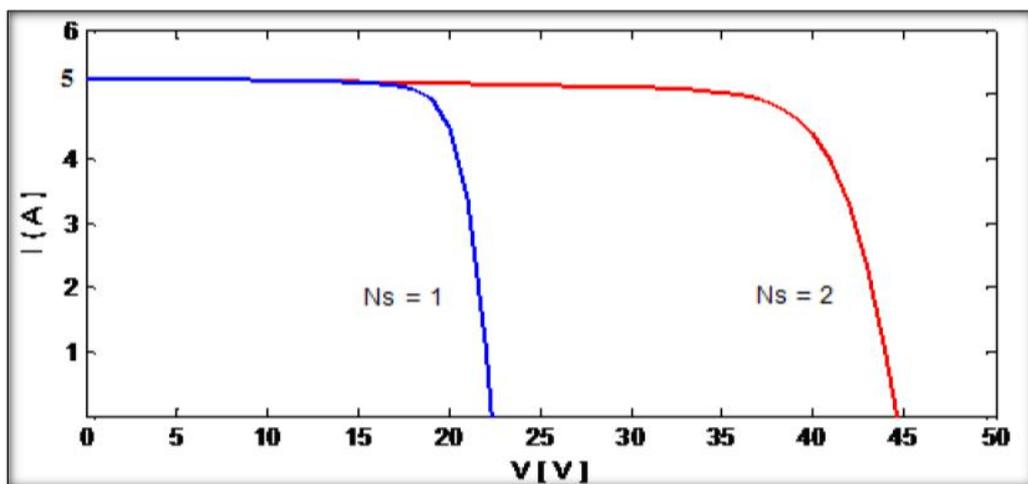


Fig III.19 : Champ de deux générateurs photovoltaïques associés en série.

III.9.2 Association en parallèle :

Pour augmenter l'intensité du courant, on monte en parallèle des modules car l'intensité du courant augmente proportionnellement avec le nombre de modules en parallèle dans une branche, et la tension d'une branche sera égale à la tension de chaque module, comme le démontre la figure ci-dessous.

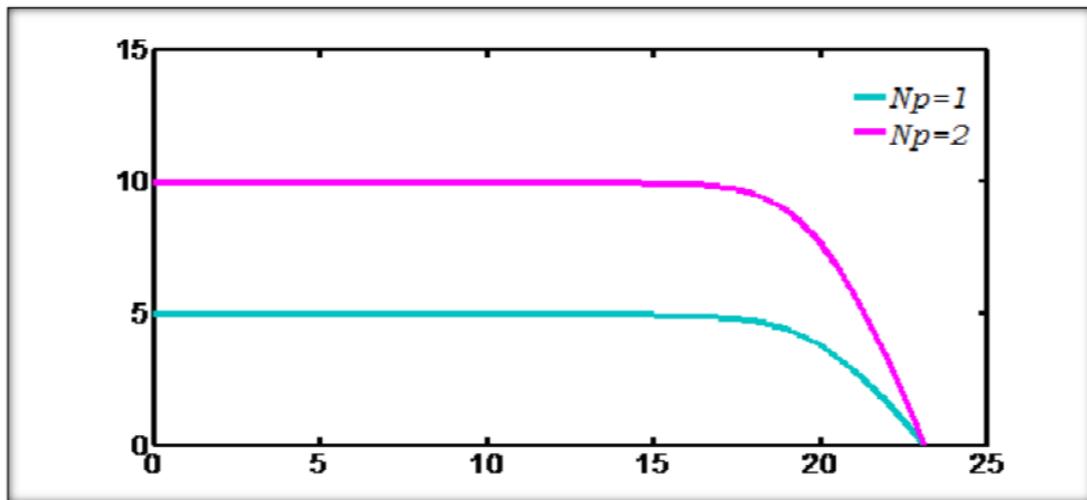


Fig III.20 : Champ de cinq générateurs photovoltaïques associés en parallèle.

III .10 STOCKAGE D'ÉNERGIE :

A cause de l'intermittence de l'énergie solaire, l'utilisation des batteries pour le stockage d'énergie est nécessaire pour garantir une disponibilité permanente et constante de l'énergie, quelles que soient les variations des paramètres météorologiques.

Le système de stockage utilise généralement les batteries d'accumulateurs électrochimiques. Elles sont des générateurs "réversibles" c'est à dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis la restituer

à tout moment sur demande (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes.

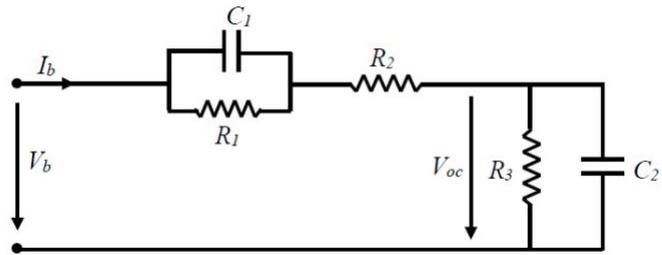


Fig III.21 : Modèle équivalent de la batterie.

L'expression générale de l'énergie s'exprime comme suit :

$$E_C = \frac{1}{2} C V_C^2$$

III.12 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un panneau photovoltaïque en utilisant le modèle à une et à deux diodes ainsi que la variation avec les conditions météorologiques.

Une étude de l'influence de ces conditions sur les caractéristiques du *PV* a été complétée. Les performances dépendent directement des paramètres internes du *PV* et des paramètres météorologiques. Les résultats obtenus permettent de conclure que le modèle à une seule diode est proche de celui du panneau photovoltaïque réel.

Par ailleurs, nous n'avons constaté que l'influence de la variation des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du *PV* est importante. Afin d'assurer une disponibilité permanente et constante de l'énergie quelles que soient les variations météorologiques, un système de stockage a été également modélisé.

Chapitre IV

Integration photovoltaïque dans le réseau électrique

IV-1. INTRODUCTION :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau peuvent contribuer à améliorer le réseau de bout en bout où les chutes de tension atteignent des valeurs inacceptables et sachant que la qualité de la tension mesurée par la chute de tension devient inacceptable lorsqu'elle dépasse 10%. Cela a donc un impact négatif sur le distributeur et le client.

Sachant que le principal paramètre caractérisant le service électrique est la qualité de la tension, le distributeur est contractuellement tenu de respecter les valeurs admissibles. Le mini système photovoltaïque connecté au réseau est l'une des solutions utilisées pour résoudre le problème de chute de tension.

Dans ce chapitre, nous étudions la rentabilité de l'intégration de la production photovoltaïque dans un réseau de distribution d'un point de vue technique pour pallier les insuffisances de la charge et le rétablissement de la tension de réseau.

IV-2. IMPACT DE L'INTEGRATION DES SYSTEME PV SUR LA TENSION DU RÉSEAU ÉTUDIÉE :

Pour réduire la chute de tension en dessous de 10%, nous avons choisi d'installer des systèmes photovoltaïques (SPV) au point (4) et (2) qui enregistrent une chute de tension inacceptable.

Le processus d'équipement des(SPV) s'arrête lorsque la chute de tension atteint une valeur admissible (<10 %).

IV-2-1 Connexion au point (4) :

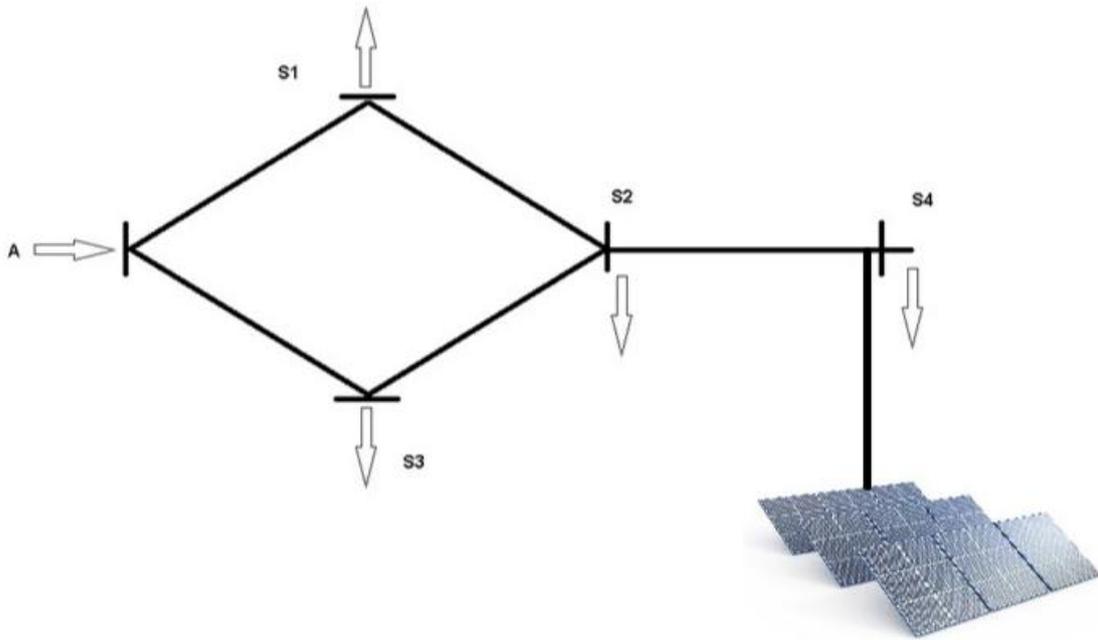


Fig IV.1 Connexion du (SPV) au point (4)

a) Simulation ETAP(V12.6.0) :

Chapitre IV : Intégration photovoltaïque dans le réseau électrique

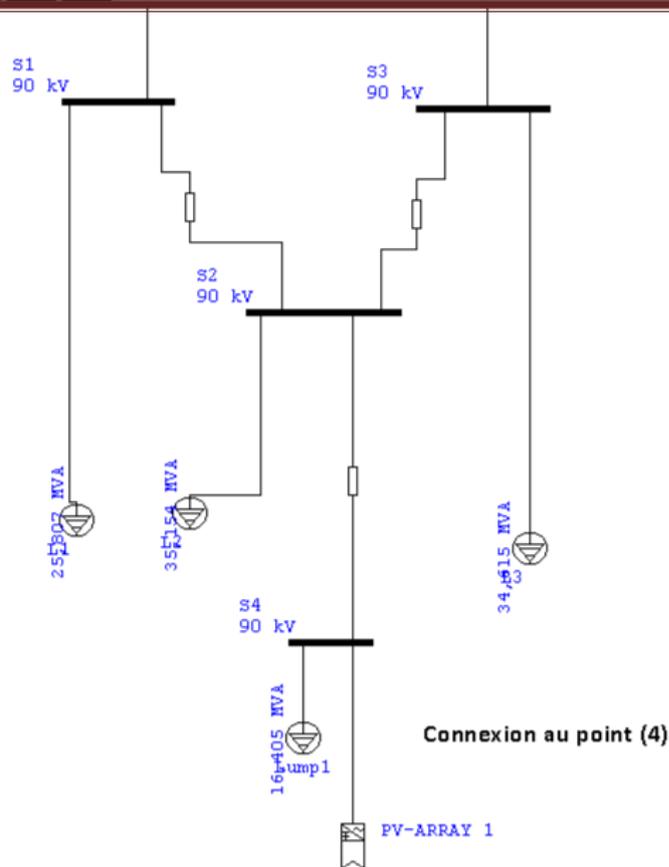


Fig IV.2 Connexion du PV-ARRAY au point (4) logiciel "ETAP"

Project: PV array integration	ETAP	Page: 1
Location: Rafes Zehouene / Annaba	12.6.0H	Date: 05-20-2023
Contract:		SN:
Engineer: (Student / Adoui Sohaib)	Study Case: LF	Revision: Base
Filename: 05		Config.: Normal

LOAD-FLOW REPORT

Pv-Array insertion at point: **S4**
 Prefault voltage = 90.000 = 100.00 % of nominal bus kV (90.000 kV)

Pv-Array condition	Out of service	In service
Vd%	14.48	9.76

Fig IV.3 Chute de tension en % avant et apres l'installation du "SPV"

IV-3-2 Connexion au point (2) :

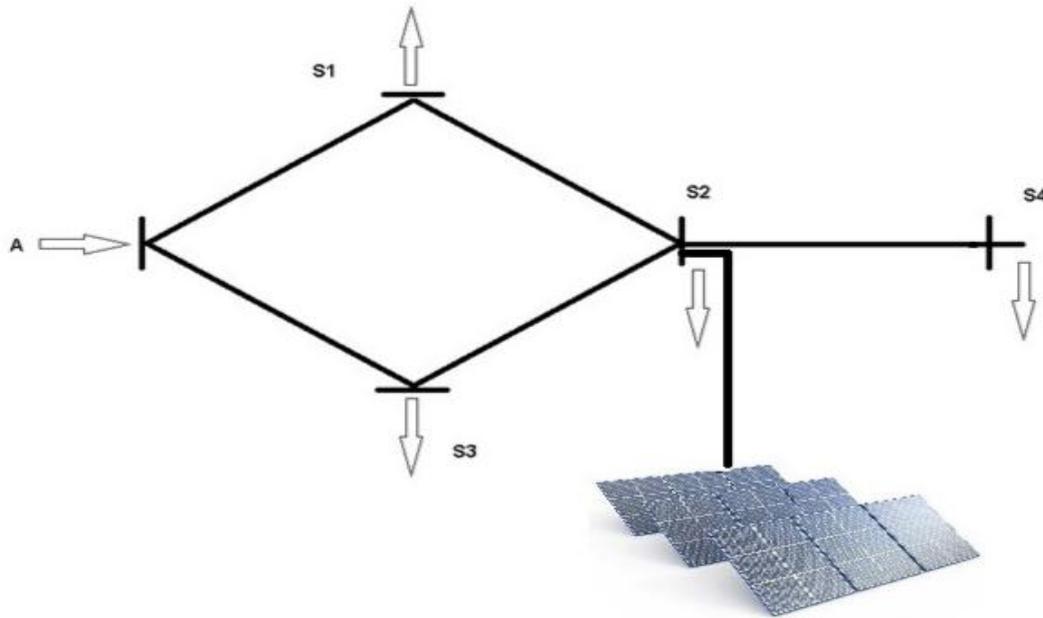


Fig IV.4 Connexion du (SPV) au point (2)

b) Simulation ETAP(V12.6.0) :

Chapitre IV : Integration photovoltaïque dans le réseau électrique

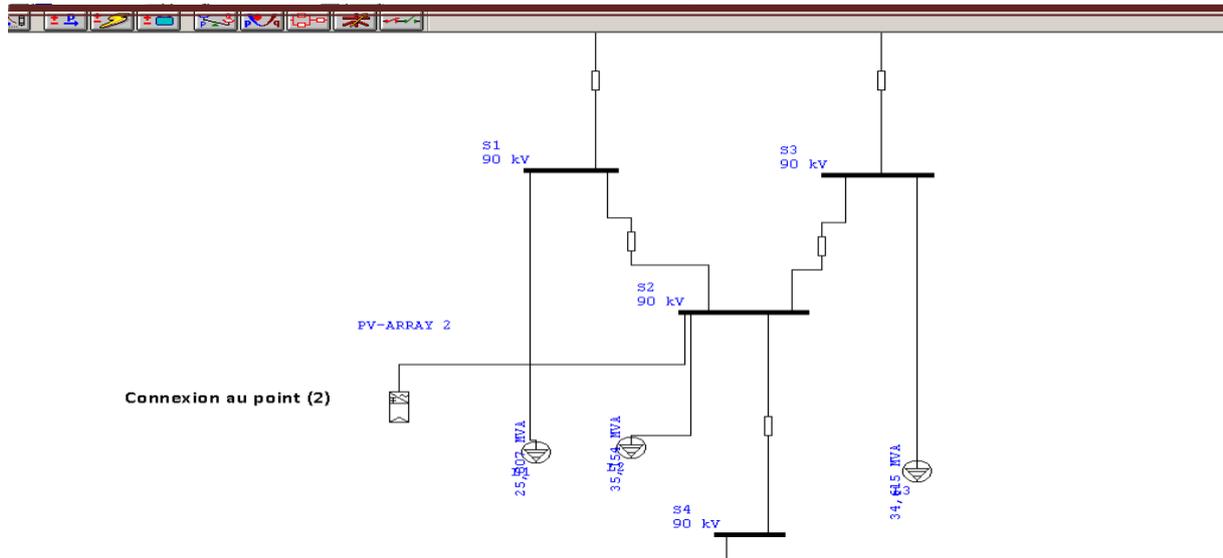


Fig IV.5 Connexion du PV-ARRAY au point (2) logiciel "ETAP"

Project: PV array integration	ETAP	Page: 1
Location: Refes Zehouene / Annaba	12.6.0H	Date: 05-20-2023
Contract:		SN:
Engineer: (Student / Adoui Sohaib)	Study Case: LF	Revision: Base
Filename: 08		Config.: Normal

LOAD-FLOW REPORT

Pv-Array insertion at point: **S2**
 Prefault voltage = 90.000 = 100.00 % of nominal bus kV (90.000 kV)

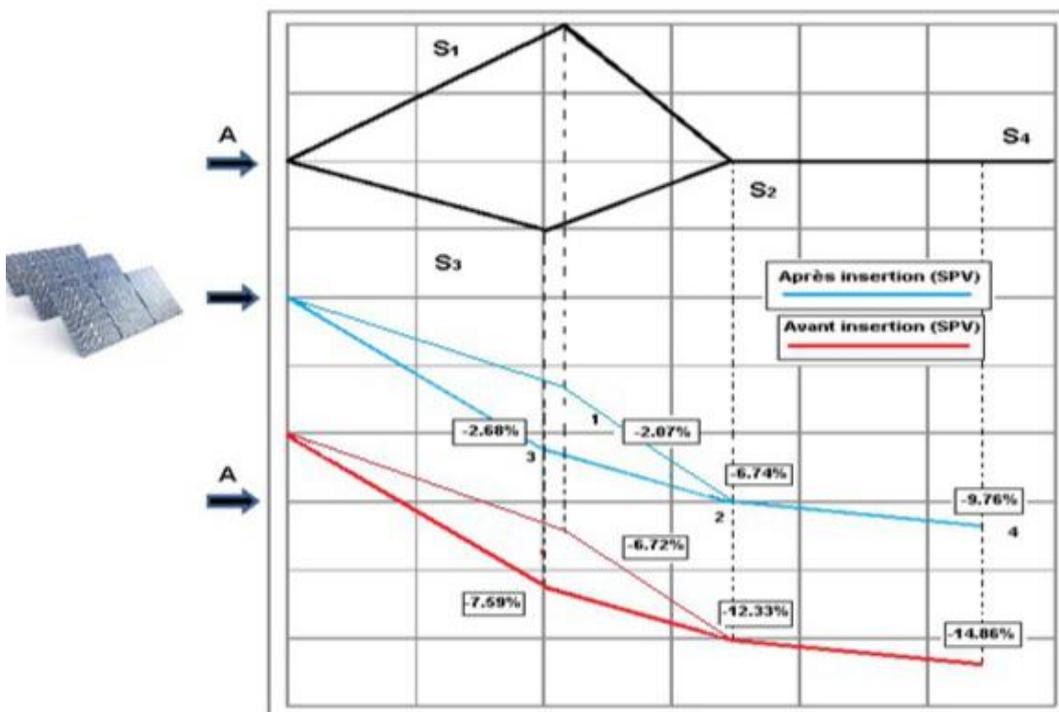
Pv-Array condition	Out of service	In service
Vd%	11.93	6.74

Fig IV.8 Chute de tension en % avant et apres l'installation du "SPV"

Chapitre IV : Intégration photovoltaïque dans le réseau électrique

U%	Calculés	Avant insertion du SPV (ETAP)	Après insertion du SPV (ETAP)
Point (2)	-12.33%	-11.93%	-6.74%
Point (4)	-14.86%	-14.48%	-9.76%

Après l'installation de (PVS) au point (4) et (2), la tension est nettement améliorée. Ces résultats justifient le but de ce travail qui propose l'installation de PVS sur le réseau pour compenser la chute de tension en ligne avec la contribution de la puissance photovoltaïque.



IV-3. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons examiné la contribution de l'intégration des systèmes photovoltaïques à la production d'électricité à l'aide de simulation de logiciel (ETAP) . Nous avons proposé l'installation de PVS connectées au réseau pour compenser la chute de tension de la ligne.

Les résultats de la simulation obtenus après l'introduction de l'énergie solaire photovoltaïque ont montré que l'utilisation de cette énergie injectée dans le réseau peut produire une partie significative de l'électricité non polluante. Cette source d'énergie permet aux abonnés de rectifier la tension pendant les périodes de forte demande.

Bibliographie

-www.google.com.

-[Wikipedia](http://www.wikipedia.org).

-[Reddit.com](http://www.reddit.com).

-[Quora.com](http://www.quora.com)