



# MODELISATION DETAILLEE SUR POWER FACTORY DE LA CENTRALE SOLAIRE DE ZAGTOULI

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE  
**MASTER**  
**SPECIALITE ENERGIES RENOUVELABLES**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 16/01/2020 par

**Faïza Naouar Aïna OUEDRAOGO (2014 0129)**

**Encadrant 2iE : Docteur Moussa SORO, Enseignant-chercheur.**

**Maître de stage : Ingénieur Hamed SANKARA, Chef de service contrôles électriques à la SONABEL.**

Structure d'accueil du stage : Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Daniel YAMEGUEU

Membre et correcteur : M. Francis SEMPORE

**Promotion [2019/2020]**

## DEDICACES

*A mes parents, Adama et Mariam OUEDRAOGO, à qui je rends hommage pour les longues années de sacrifices, de prières et d'encouragements dont ils ont fait preuve,*

*A mes grand-parents, Salif et Fatimata TRAORE, Salamata OUEDRAOGO pour la compréhension et l'accompagnement continuels tout au long de mon cursus,*

*A mon frère et à mes sœurs, Nourridine, Fadima, Amal et Amira pour leur affection, que ce travail leur serve d'exemple sur le chemin de la réussite.*

*« L'éducation est l'arme la plus puissante qu'on puisse utiliser pour changer le monde. »*

**Nelson MANDELA**

## REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier sincèrement :*

*L'administration ainsi que l'ensemble du corps enseignant de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie),*

*Docteur Moussa SORO, notre encadreur interne pour son suivi malgré un emploi du temps très chargé,*

*Tous les agents de la SONABEL pour l'accueil chaleureux et les conseils,*

*Monsieur Hamed Arnould SANKARA, notre maitre de stage, qui a su faire de notre réussite un souci personnel.*

*Nous remercions particulièrement les familles OUEDRAOGO et TRAORE pour tout le soutien qu'il nous ont apporté,*

*Toute personne ayant contribué de prêt ou de loin à la réalisation du présent mémoire.*

## RESUME

Le Burkina Faso est l'un des rares pays africains où la cherté de l'électricité ponctionne fortement les ressources financières des consommateurs, qui ne savent plus à quelle fin se vouer. L'option de l'énergie solaire, considérée depuis un certain nombre d'années, est privilégiée dans cette production par la construction de plusieurs centrales solaires qui devraient faire baisser le tarif de la SONABEL de moitié soit 50 FCFA le kWh au lieu de 110 FCFA.

C'est dans cette optique que la centrale solaire de Zagtouli a vu le jour en 2017.

Afin d'étudier la stabilité du réseau national burkinabé et de prévoir le comportement du système de protection face aux pannes, la SONABEL dispose d'un modèle du RNI sur le logiciel Power factory où elle effectue ses simulations. Dans ce modèle, la centrale de Zagtouli est représentée par un système photovoltaïque de 33MW.

Disposer d'un modèle plus détaillé de la centrale permettrait de connaître non seulement les avantages et les limites du modèle simplifié, mais en plus d'étudier le comportement des éléments de la centrale face aux perturbations pouvant survenir sur le réseau. L'objectif principal de ce travail sera donc de modéliser la centrale de Zagtouli et de régler ses dispositifs de protection.

La synthèse bibliographique ainsi que les données collectées ont permis d'obtenir un modèle détaillé et un modèle simplifié de la centrale solaire de Zagtouli. Il en ressort essentiellement que le modèle détaillé est beaucoup plus précis et réaliste ; que le modèle simplifié nécessite moins de temps et de données pour sa réalisation. Le choix du type de modélisation doit donc être fait en fonction des attentes de l'étude.

En outre, l'étude de sélectivité réalisée sur le modèle détaillé grâce à une série de courts-circuits a confirmé que les relais de surintensités sont bien réglés.

### **Mots clés :**

---

- 1. Centrale solaire**
- 2. Flux de puissance**
- 3. Modélisation**
- 4. Power Factory**
- 5. Sélectivité**

## ABSTRACT

Burkina Faso is one of the few African countries where the high cost of electricity is a major drain on the financial resources of consumers, who no longer know what to do with themselves. The solar energy option, considered for a number of years, is favored in this production by the construction of several solar power plants which should reduce the SONABEL rate by half, or 50 FCFA per kWh instead of 110 FCFA.

It is with this in mind that the Zagtouli solar power plant was built in 2017.

In order to study the stability of the Burkinabe national network and predict the behavior of the protection system in the event of failures, SONABEL has a model of the NIR on the Power factory software where it performs its simulations. In this model, the Zagtouli power plant is represented by a 33MW photovoltaic system.

Having a more detailed model of the plant would make it possible to know not only the advantages and limitations of the simplified model, but also to study the behavior of the plant components in the event of disturbances that may occur on the system. The main objective of this work will therefore be to model the Zagtouli power plant and adjust its protection devices. The bibliographic synthesis and the data collected made it possible to obtain a detailed and simplified model of the Zagtouli solar power plant. The main conclusion is that the detailed model is much more accurate and realistic; the simplified model requires less time and data to produce. The choice of the type of modelling must therefore be made according to the study's expectations.

In addition, the selectivity study carried out on the detailed model using a series of short circuits confirmed that the overcurrent relays are correctly set.

### **Keywords:**

- 
- 1. Solar power plant**
  - 2. Power flow**
  - 3. Modeling**
  - 4. PowerFactory**
  - 5. Selectivity**

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AC** : Alternating current

**ANSI** : American National Standards Institute

**BT** : Basse tension

**CA** : Courant Alternatif

**CC** : Courant continu

**CPI** : Centre Photovoltaïque Intégré

**DC** : Direct current

**GT** : Gigatonne

**HT** : Haute tension

**Icc** : Courant de court-circuit

**IGBT** : Transistor bipolaire à grille isolée

**JDB** : Jeu de barre

**ml** : Mètre linéaire

**MLI** : Modulation de largeur d'impulsion

**PV** : Photovoltaïque

**RNI** : Réseau National d'Interconnexion

**SCADA** : Supervisory Control And Data acquisition

**SONABEL** : Société Nationale d'Electricité du Burkina

**TSA** : Transformateur de services auxiliaires

**2IE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

## **SOMMAIRE**

|                                                                    |                   |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>DEDICACES.....</b>                                              | <b><i>i</i></b>   |
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>                                          | <b><i>iii</i></b> |
| <b>RESUME.....</b>                                                 | <b><i>iv</i></b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                               | <b><i>v</i></b>   |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>                                | <b><i>vi</i></b>  |
| <b>SOMMAIRE.....</b>                                               | <b><i>vii</i></b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>                                     | <b><i>ix</i></b>  |
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>                                     | <b><i>x</i></b>   |
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>                                  | <b><i>1</i></b>   |
| <b>I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCEUIL ET DU PROJET.....</b> | <b><i>3</i></b>   |
| I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL .....                  | <b><i>3</i></b>   |
| I.2. PRESENTATION DU PROJET.....                                   | <b><i>7</i></b>   |
| <b>II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>                           | <b><i>10</i></b>  |
| II.1. GENERALITES SUR LES CENTRALES PV .....                       | <b><i>10</i></b>  |
| II.2. MODELES DES COMPOSANTS ELEMENTAIRES D’UNE CENTRALE PV.....   | <b><i>11</i></b>  |
| II.3. GENERALITES SUR LES PROTECTIONS .....                        | <b><i>17</i></b>  |
| <b>III. COLLECTE DES DONNEES.....</b>                              | <b><i>21</i></b>  |
| III.1. SCHEMA DE LA CENTRALE.....                                  | <b><i>22</i></b>  |
| III.2. DONNEES TECHNIQUES DES EQUIPEMENTS.....                     | <b><i>23</i></b>  |
| III.3. ACQUISITION DE DONNEES DES COMPTEURS .....                  | <b><i>28</i></b>  |
| <b>IV. MODELISATION SUR POWER FACTORY.....</b>                     | <b><i>29</i></b>  |
| IV.1. PRESENTATION DU LOGICIEL POWER FACTORY .....                 | <b><i>29</i></b>  |
| IV.2. MODELISATION DES ELEMENTS DE BASE.....                       | <b><i>30</i></b>  |

|           |                                                                         |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| IV.3.     | CRITERES DE VALIDATION DE LA STABILITE.....                             | 34        |
| IV.4.     | SCHEMA UNIFILAIRE DU MODELE DETAILLE DE LA CENTRALE DE ZAGTOULI .....   | 35        |
| IV.5.     | SCHEMA UNIFILAIRE DU MODELE DETAILLE.....                               | 36        |
| <b>V.</b> | <b>RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>                                    | <b>37</b> |
| V.1.      | VALIDATION DES MODELES .....                                            | 37        |
| V.2.      | ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MODELE DETAILLE ET LE MODELE SIMPLIFIE ..... | 51        |
| V.3.      | ETUDE DE SELECTIVITE DU MODELE DETAILLE .....                           | 52        |
| V.4.      | VERIFICATION DE LA TENUE THERMIQUE ET ELECTRODYNAMIQUE DES JDB .....    | 58        |
|           | <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                        | <b>60</b> |
|           | <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                               | <b>i</b>  |
|           | <b>ANNEXES .....</b>                                                    | <b>ii</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1:</b> Caractéristiques principales du module .....                              | 23 |
| <b>Tableau 2:</b> Caractéristiques générales des CPI .....                                  | 24 |
| <b>Tableau 3:</b> Caractéristiques de l'onduleur .....                                      | 25 |
| <b>Tableau 4:</b> Caractéristiques du transformateur .....                                  | 25 |
| <b>Tableau 5:</b> Caractéristiques des cellules .....                                       | 25 |
| <b>Tableau 6:</b> Réglage des protections de la ligne principale.....                       | 27 |
| <b>Tableau 7:</b> Réglage des protections des boucles .....                                 | 27 |
| <b>Tableau 8:</b> Réglage des protections des transformateurs .....                         | 28 |
| <b>Tableau 9:</b> Comparaison de la production des CPI à 6h (modèle détaillé).....          | 38 |
| <b>Tableau 10:</b> Comparaison de la production des CPI à 14h (modèle détaillé).....        | 40 |
| <b>Tableau 11:</b> Comparaison des résultats du modèle simplifié à 6h.....                  | 41 |
| <b>Tableau 12:</b> Comparaison des résultats du modèle simplifié à 14h.....                 | 42 |
| <b>Tableau 13:</b> Données de caractéristiques des systèmes PV .....                        | 43 |
| <b>Tableau 14:</b> Comparaison des résultats en quasi-dynamique (modèle détaillé) .....     | 47 |
| <b>Tableau 15:</b> Comparaison des résultats en quasi dynamique (modèle simplifié).....     | 50 |
| <b>Tableau 16:</b> Résultats du court-circuit biphasé sur le JDB1 .....                     | 53 |
| <b>Tableau 17:</b> Résultats du court-circuit triphasé sur le JDB1.....                     | 55 |
| <b>Tableau 18:</b> Résultats du court-circuit triphasé sur la ligne CPI1-Poste solaire..... | 57 |
| <b>Tableau 19:</b> courants de court-circuit triphasé des JDB .....                         | 58 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1:</b> Evolution de la capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque de 2006 à 2016          | 1  |
| <b>Figure 2:</b> Organigramme du service contrôles électriques.....                                         | 6  |
| <b>Figure 3:</b> Diagramme de Gantt.....                                                                    | 8  |
| <b>Figure 4:</b> Modèle général d'une cellule PV .....                                                      | 11 |
| <b>Figure 5:</b> Modèle d'un onduleur sans transformateur.....                                              | 13 |
| <b>Figure 6:</b> Modèle d'un onduleur avec transformateur haute fréquence.....                              | 13 |
| <b>Figure 7:</b> Onduleur avec transformateur basse fréquence.....                                          | 14 |
| <b>Figure 8:</b> Modèle général d'une ligne électrique .....                                                | 15 |
| <b>Figure 9:</b> Modèle en PI d'une ligne électrique .....                                                  | 16 |
| <b>Figure 10:</b> Modèle général d'un transformateur .....                                                  | 17 |
| <b>Figure 11:</b> Différents types de défauts .....                                                         | 18 |
| <b>Figure 12:</b> Eléments constitutifs d'un système de protection .....                                    | 20 |
| <b>Figure 13:</b> Représentation d'un CPI (CPI 11) .....                                                    | 24 |
| <b>Figure 14:</b> Interface du logiciel Power factory .....                                                 | 29 |
| <b>Figure 15:</b> Représentation d'un système PV sur power factory .....                                    | 30 |
| <b>Figure 16:</b> Configuration d'un système photovoltaïque sur power factory .....                         | 31 |
| <b>Figure 17:</b> Représentation d'un transformateur à deux (2) enroulements dans PowerFactory              | 32 |
| <b>Figure 18:</b> Représentation d'une ligne dans power Factory.....                                        | 32 |
| <b>Figure 19:</b> Diagramme de l'irradiance journalière .....                                               | 44 |
| <b>Figure 20:</b> Diagramme de la production journalière du PV 1 1 .....                                    | 44 |
| <b>Figure 21:</b> Diagramme des pertes journalières.....                                                    | 45 |
| <b>Figure 22:</b> Diagrammes de production journalière de la centrale .....                                 | 45 |
| <b>Figure 23:</b> Comparaison entre les résultats réels et les résultats du modèle en quasi dynamique ..... | 48 |
| <b>Figure 24:</b> Diagramme de production journalier du modèle simplifié.....                               | 49 |
| <b>Figure 25:</b> Diagramme des pertes journalières du modèle simplifié.....                                | 49 |
| <b>Figure 26:</b> Comparaison entre les résultats réels et les résultats du modèle en quasi dynamique ..... | 51 |
| <b>Figure 27:</b> Digrammes temps-surintensité du court-circuit biphasé sur le JDB 1 .....                  | 54 |
| <b>Figure 28:</b> Digrammes temps-surintensité du court-circuit triphasé sur le JDB 1 .....                 | 56 |
| <b>Figure 29:</b> Digrammes temps-surintensité du court-circuit triphasé sur la ligne CPI1-Poste            |    |

|               |    |
|---------------|----|
| solaire ..... | 57 |
|---------------|----|

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis des décennies, la consommation mondiale d'énergie ne fait que croître sans perspective de ralentissement dans un avenir proche. La demande mondiale en énergie a augmenté de 2,3% en 2018 soit le rythme le plus rapide de la décennie selon l'agence internationale de l'énergie, la majeure partie de cette énergie étant obtenue grâce aux combustibles fossiles (environ 70% en 2018).

En conséquence, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie ont augmenté de 1,7% pour atteindre 33 gigatonnes en 2018. La consommation de charbon pour la seule production d'électricité a dépassé 10 GT, ce qui représente un tiers de l'augmentation totale (la plupart provenant de centrales à charbon d'Asie). Face à ce problème et en considérant le fait que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium ne sont pas des énergies renouvelables à l'échelle de vie humaine, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution durable à ces problèmes.

Les énergies renouvelables ont largement contribué à l'expansion de la production d'électricité ces dernières années. A la fin de 2016, la capacité totale d'énergie renouvelable a franchi pour la première fois la barre de 2 000 gigawatt(GW). Si un peu plus de la moitié de ce potentiel reste assuré par les ouvrages hydrauliques, le développement du secteur est tiré par le solaire photovoltaïque (303 GW, +33%) (COLLET).

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2006-2016

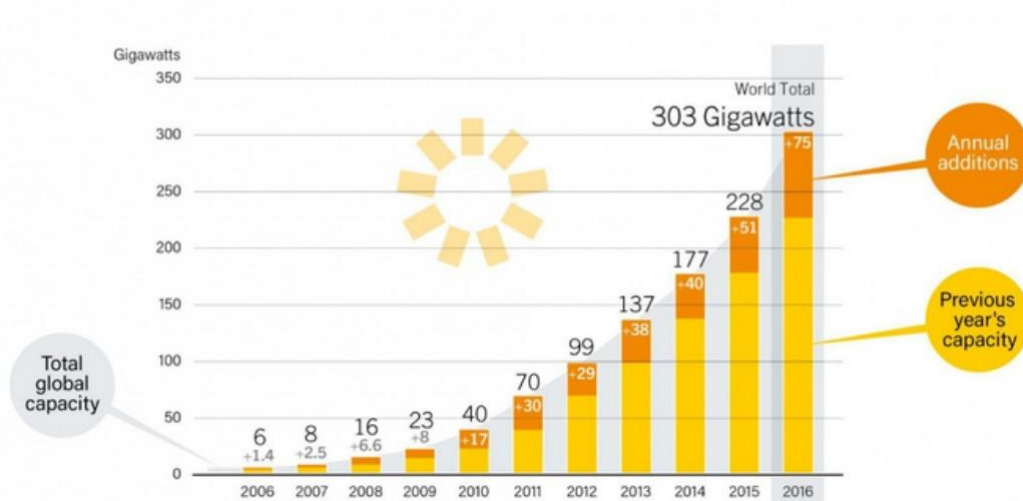


Figure 1: Evolution de la capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque de 2006 à 2016

Source : IEA PVPS

Pour des pays en voie de développement comme le Burkina Faso, disposant d'un vaste champ solaire, l'énergie photovoltaïque apparaît donc comme une solution efficace aux problèmes énergétiques du pays. Plusieurs politiques ont d'ailleurs été adoptées afin d'encourager le développement de ce secteur. L'objectif visé est que l'énergie solaire atteigne environ 30% des énergies utilisées dans le pays.

C'est dans cette optique que la centrale solaire de Zagtouli voit le jour en 2017. Il s'agit d'une centrale d'une capacité de 33 MW raccordée au réseau de la SONABEL.

Malgré tous les avantages que présente la centrale de Zagtouli, son raccordement sur le réseau de la SONABEL peut occasionner quelques impacts négatifs (Problèmes d'instabilité, de perturbations sur le réseau, de défauts...). Le passage de nuages sur les modules photovoltaïques pourrait par exemple entraîner une perte considérable de la production et occasionner des perturbations sur le réseau.

Disposer d'un modèle détaillé de la centrale de Zagtouli à la SONABEL à intégrer au modèle du RNI permettrait à la SONABEL d'étudier le comportement des éléments de la centrale de Zagtouli face aux perturbations qui peuvent survenir. Pour ce faire, la centrale devra être modélisée sur le logiciel Power factory.

# I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE

## D'ACCEUIL ET DU PROJET

### **I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL**

La Société Nationale d'Electricité du Burkina (SONABEL) est une société d'état exclusivement détenue par l'état burkinabè. Elle relève de la tutelle de trois ministères à savoir celui de l'énergie (tutelle technique), celui de l'économie, des finances et du développement (tutelle financière) et du ministère de l'industrie, du commerce et de l'artisanat (tutelle de gestion).

La SONABEL produit, importe, transporte et distribue de l'énergie électrique sur toute l'étendue du territoire national. Parce qu'elle est incontournable au développement du pays, elle s'est fixé des objectifs afin d'améliorer le taux d'électrification burkinabé (SONABEL).

#### **a. Organisation et fonctionnement de la SONABEL**

La SONABEL est présidé par un conseil d'administration qui est l'organe suprême de la société et est composé de six (6) membres dont cinq (5) représentants de l'Etat et un (01) représentant des travailleurs. Le commissariat aux comptes est assuré par le cabinet ACECA International. La direction générale est l'organe exécutif qui a pour rôle de faire exécuter les décisions prises en conseil d'administration ; veiller au bon fonctionnement de la société ; créer et maintenir de bonnes relations entre la société et son environnement. Elle rend compte au conseil d'administration, exécute ses missions aidées de conseillers techniques et au travers des activités de huit (08) directions centrales que sont :

- La direction des marchés et du patrimoine (DMP) ;
- La direction des Etudes, de la Planification et de l'Equipement (DEPE) ;
- La direction de la production ;
- La direction du Transport et des mouvements d'énergie ;
- La direction de la Distribution (DD) ;
- La direction commerciale et de la clientèle (DCC) ;
- La direction des Ressources Humaines (RH) ;
- La direction Financière et Comptable (DFC) ;

#### **b. Présentation de la direction du transport et des mouvements d'énergie**

Intermédiaire entre la production et la distribution, le réseau de transport d'énergie électrique se compose de lignes et de postes haute et très haute tension (90kV,132 kV,225 kV) permettant

d'acheminer l'énergie produite depuis les centrales vers les centres de consommation dans les conditions optimales. La direction du transport a pour missions :

- Transporter l'électricité avec le niveau de qualité attendu tout en assurant la surveillance et l'entretien du réseau dans une optique de continuité de service et de durée de vie optimale des ouvrages ;
- Assurer les mouvements d'énergie sur le réseau de transport d'électricité au moindre coût selon la qualité attendue ;
- Assurer le bon fonctionnement et la disponibilité des dispositifs de relaying, de régulation, de protection et de télécommunications ;

La direction du transport et des mouvements d'énergie comprend trois (03) départements à savoir le Département Transport (DepT), le Département Mouvement d'Energie (DME) et le Département Contrôle Electriques et Télécommunication (DCET).

### **c. Présentation du département contrôles électriques et télécommunication**

Le Département Contrôles Electriques et Télécommunications (DCET) de la SONABEL dispose de deux services à savoir : le Service Contrôles Electriques (SCE) et le Service Télécommunications (ST).

Le Service Contrôles Electriques (SCE) où le stage a été effectué a pour attributions de fournir des équipements de relaying, de régulation, de protection fiables et performants et en assurer la maintenance ; d'assurer le bon fonctionnement et la disponibilité des équipements de relaying, de régulation et de protection fiables et performants.

Pour atteindre les missions assignées, le Service Contrôles Electriques est subdivisé comme suit :

#### **➤ La Division Contrôle Commande et Protection**

Elle a pour attributions principales d'assurer le contrôle des relais de protection et des équipements de contrôle-commande des ouvrages de production, de transport et de distribution, d'assurer la mise à jour des plans et des schémas électriques...

#### **➤ La Section Comptages et Mesures**

Elle a pour tâches principales d'étalonner les compteurs d'énergie et les appareils de mesures des ouvrages, d'installer ou remplacer les équipements de comptages et de mesures, d'effectuer les tests et essais de validation des équipements de comptage.

### ➤ **La Division Maintenance Transformateurs de Puissance (DTP)**

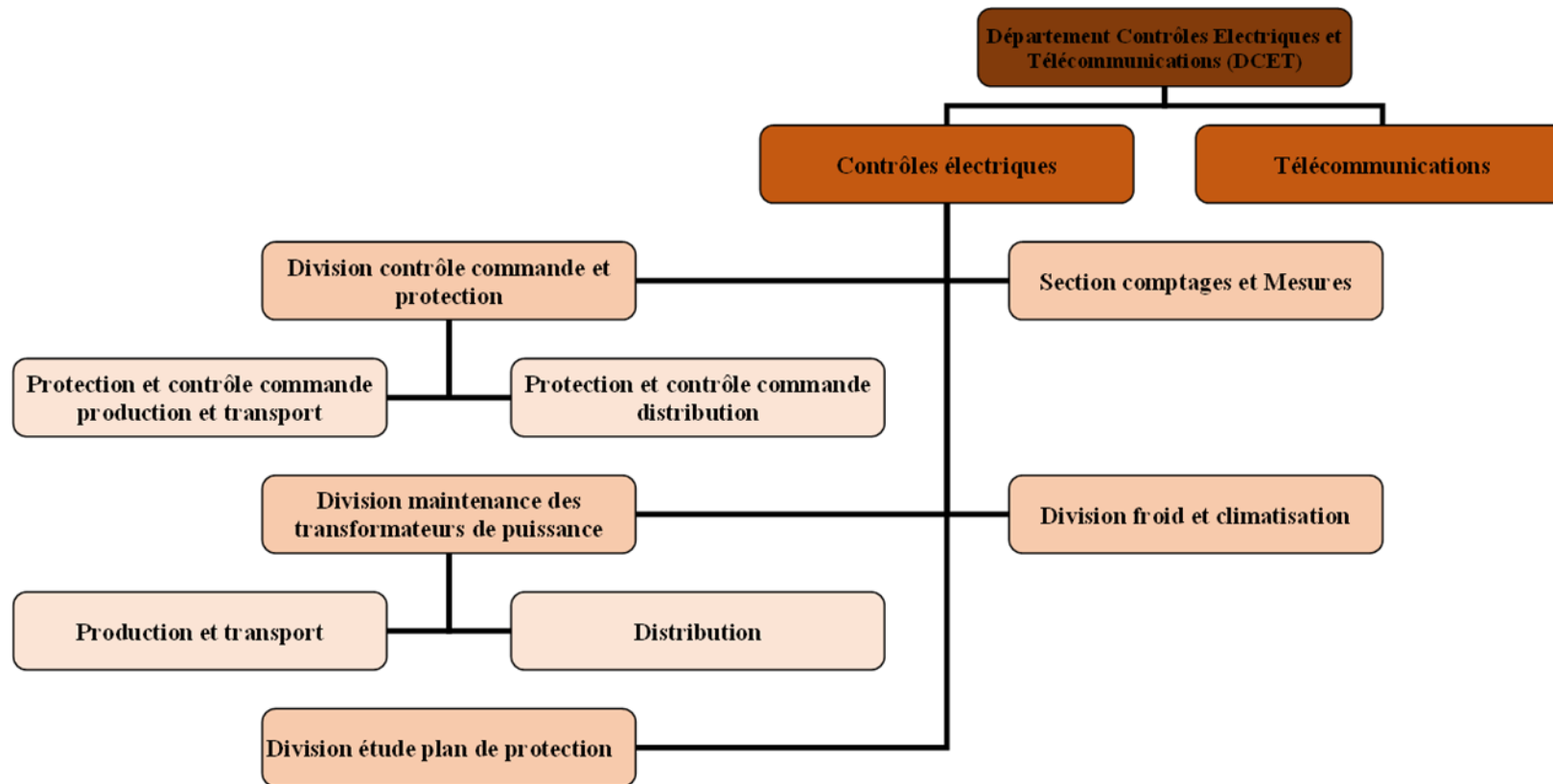
Elle a pour attributions principales d'assurer la maintenance des transformateurs de puissance et de participer aux analyses d'offre de nouveaux transformateurs de puissance.

### ➤ **Division Froid et Climatisation (DFC)**

Cette section a pour rôle d'assurer la maintenance des équipements de froid et climatisation, et d'assurer le remplacement ou l'installation des climatiseurs et des équipements de froid.

### ➤ **La Division Etudes Plan de Protection (DEPP)**

Elle a pour attributions principales d'assurer les études de plan de protection des réseaux, d'assurer les études de la stabilité dynamique des réseaux et de déterminer les valeurs de réglage permettant la mise en œuvre d'une meilleure coordination des protections électriques.



[Figure 2: Organigramme du service contrôles électriques](#)

## **I.2. PRESENTATION DU PROJET**

### **a. Objectifs**

L'objectif principal recherché à l'issue du traitement de ce thème est la réalisation d'un modèle détaillé de la centrale photovoltaïque de Zagtouli sur Power factory. Cela permettra d'effectuer une comparaison avec le modèle utilisé par la SONABEL.

### **b. Résultats attendus**

A l'issu des objectifs cités ci-dessus, les résultats attendus sont les suivants :

- Un modèle détaillé de la centrale de Zagtouli

Les données collectées sur le site serviront à modéliser la centrale avec le plus de précision possible, c'est-à-dire en représentant tous les sous-champs, les CPI, les relais de protections...

- Un modèle global de la centrale de Zagtouli

Bien que n'étant pas l'objectif principal, ce modèle serait d'une grande utilité car il permettrait de réaliser une étude comparative avec le modèle détaillé.

- Des simulations et analyse d'écoulement de puissance

La validation des modèles passe par des calculs de flux de puissance afin de vérifier leur conformité avec la centrale.

- Une comparaison des deux modèles

Une analyse des deux modèles permettra de travailler dorénavant avec plus d'efficacité, car elle permettrait de savoir dans quel cas prendre le soin de modéliser un réseau et dans quel cas la simplifier.

- Une étude de sélectivité

Cette partie servira à vérifier les réglages des dispositifs de protection grâce à une série de courts-circuits biphasés et triphasés et la détermination des courants de court-circuit maximaux.

- Une vérification de la tenue des jeux de barres

Elle permettra de vérifier la tenue thermique et électrodynamique des jeux de barres en cas de défauts.

### c. Méthodologie

La réalisation de cette étude a été faite en suivant un certain nombre d'étapes :

- Planning de travail
- Synthèse bibliographique
- Collecte des données techniques de la centrale
- Modélisation de la centrale
- Résultats et discussion

#### ❖ Planning de travail

Le planning est l'élément primordial à la réussite de cette étude. Il a défini les différentes activités à réaliser en fonction du temps nécessaire. Grâce au diagramme de Gantt réalisé, le travail a été effectué de manière organisée.

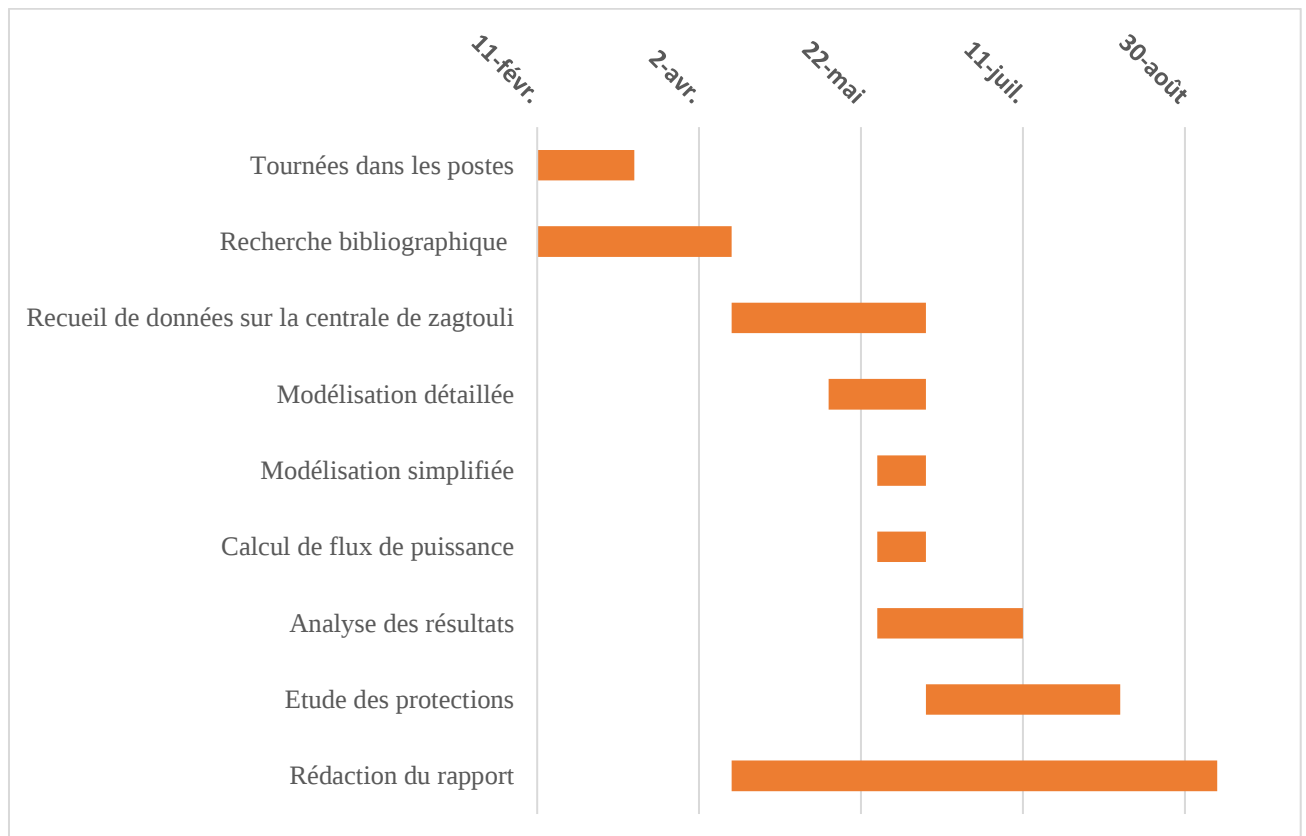


Figure 3: Diagramme de Gantt

#### ❖ Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique sera d'une grande utilité car elle permettra de faire la synthèse des différents documents utilisés dans le cadre de cette étude. Elle servira à mieux comprendre le

sujet et à orienter le travail.

### ❖ Collecte des données techniques de la centrale

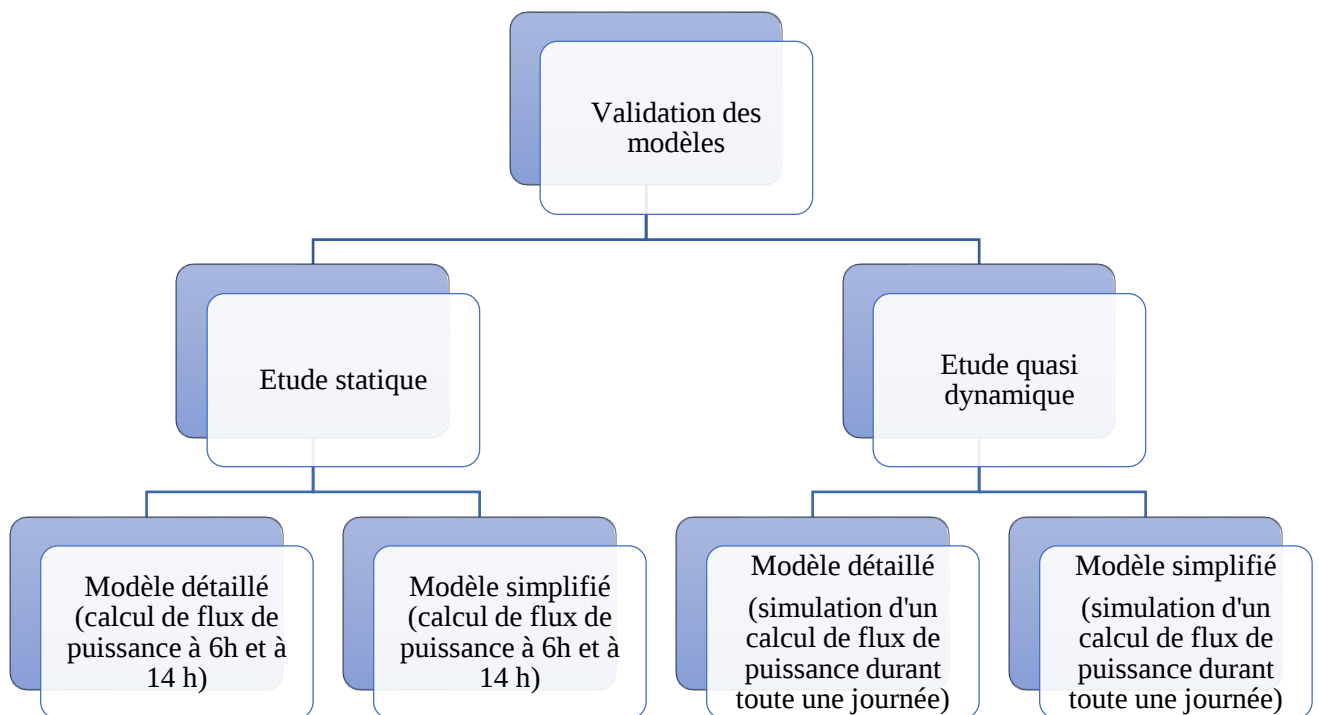
La collecte de données a permis de réunir toutes les informations nécessaires à la réalisation de cette étude. Il s'agit des informations concernant les équipements de la centrale tels que les onduleurs, les transformateurs, les relais...

En plus de ces informations, une mission a été réalisée afin d'acquérir les données de production horaire de la centrale.

### ❖ Modélisation de la centrale

Grâce aux données recueillies sur le site de la centrale, deux modèles seront réalisés : un modèle détaillé et un modèle simplifié.

Chacun de ces modèles sera validé par des calculs de flux de puissance.

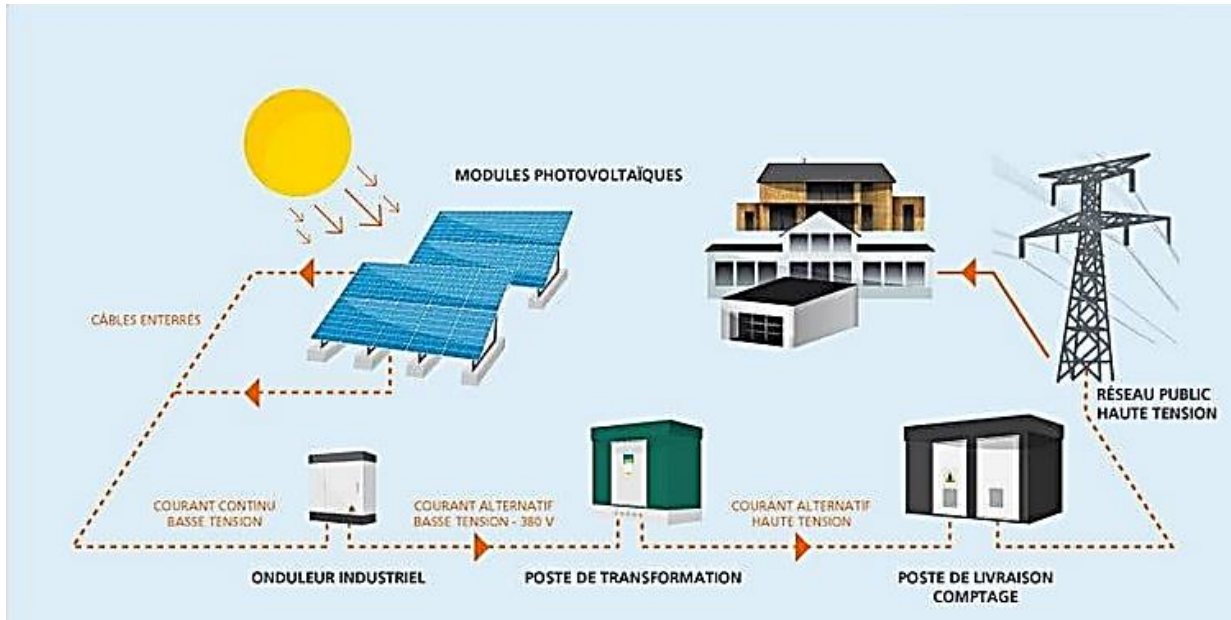


Pour l'étude statique, le calcul de flux de puissance sera simulé selon les conditions réelles à 6h et à 14h ; Ce choix car nous avons décidé de faire une première simulation lorsque la production est assez faible et la deuxième lorsqu'elle atteint un niveau assez élevé.

Les dispositifs de protection seront ensuite placés dans le modèle détaillé et une étude de sélectivité sera réalisée. La tenue des jeux de barres sera également vérifiée.

## II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### II.1. GENERALITES SUR LES CENTRALES PV



Une centrale solaire photovoltaïque est une entité qui permet la production d'électricité par des modules photovoltaïques et qui utilise des onduleurs pour être raccordé sur le réseau. Elle est constituée essentiellement de :

**Modules photovoltaïques** : Il s'agit généralement d'un assemblage de cellules de silicium (matériaux semi-conducteurs facilitant l'effet photoélectrique). Ces cellules ont pour rôle de capter les photons du rayonnement solaire et de générer du courant continu.

**Onduleur** : Il convertit le courant continu en courant alternatif.

**Poste de transformation** : Par induction électromagnétique, le transformateur élève la tension afin de l'adapter à celle du réseau.

**Poste de livraison et de comptage** : il renferme les dispositifs de comptage d'énergie transitant et les dispositifs de protection de la centrale.

**Salle de contrôle** : Local où tous les équipements de la centrale photovoltaïque sont supervisés.

**Tour météorologique** : Elle est constituée de l'ensemble des appareils permettant d'analyser les conditions météorologiques (rayonnement, humidité, température...). En fonction de la situation météorologique, le rayonnement solaire que recevra les cellules variera.

## II.2. MODELES DES COMPOSANTS ELEMENTAIRES D'UNE CENTRALE PV

### a. Panneaux PV

On appelle cellule solaire, un composant qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un module photovoltaïque.

La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s'agit d'obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs types de modèles pour la modélisation cellulaire solaire. Chaque modèle donnera différents types d'équations mathématiques en raison du nombre différent de composants dans le circuit.

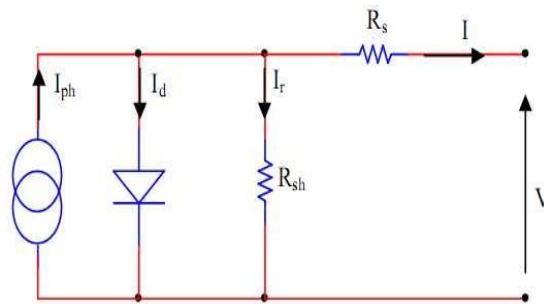


Figure 4: Modèle général d'une cellule PV

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (1)$$

Selon le modèle général, nous avons cette équation :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{K T_c A} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

**$I_{ph}$**  : Photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température;

**$I_s$**  : Courant de saturation de la cellule ;

**$q$**  : Charge électron ( $1.6 \times 10^{-19}$  C);

**$K$**  : Constant Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K);

**$T_c$**  : Température de fonctionnement de la cellule en Kelvin(K);

**$A$**  : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2 ;

**$R_s$**  : Résistance série (elle correspond aux pertes joules dans les conducteurs de la cellule)

**$R_{sh}$**  : Résistances shunt (elle correspond aux pertes directes à travers la jonction) ;

Le photocourant produit par les modules dépend linéairement de l'irradiation solaire et est aussi sous l'influence de la température comme l'indique la formule ci-dessous :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_1 \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

Avec :

**G** : Eclairement (W/m<sup>2</sup>);

**I<sub>ph,n</sub>** : Courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards ;

**T** : Température (K);

**G<sub>n</sub>** = 1000 W/m<sup>2</sup> et **T** = 25°C = 298 K

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. L'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série : leurs tensions s'ajoutent, en parallèle : leurs courants s'ajoutent (Stuart WENHAM, 2013).

Le regroupement des cellules photovoltaïques en série et en parallèle nous permet d'obtenir un générateur mixte équivalent. L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de N<sub>s</sub> cellules et de N<sub>p</sub> parallèle est la suivante :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{K T_c A} \right) - 1 \right] - \left( \frac{N_p V + N_s R_s I}{N_s R_{sh}} \right) \quad (4)$$

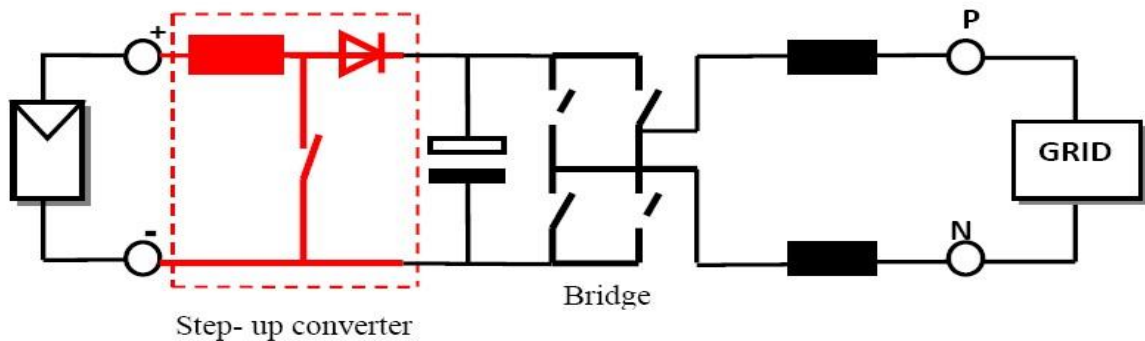
### **b. Onduleur réseau**

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme les IGBT (Transistors de puissance).

Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandé de manière appropriée, le plus souvent par MLI, l'énergie fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau (Violaine DIDIER, Août 2007).

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser la conversion d'énergie électrique. Ils déterminent la topologie des onduleurs et partant, leurs fonctionnalités. Le choix de topologie d'onduleur est fonction des réalités et des applications visées. C'est ainsi qu'on rencontre les types d'onduleurs suivants :

➤ Onduleur sans transformateur (transformerless)

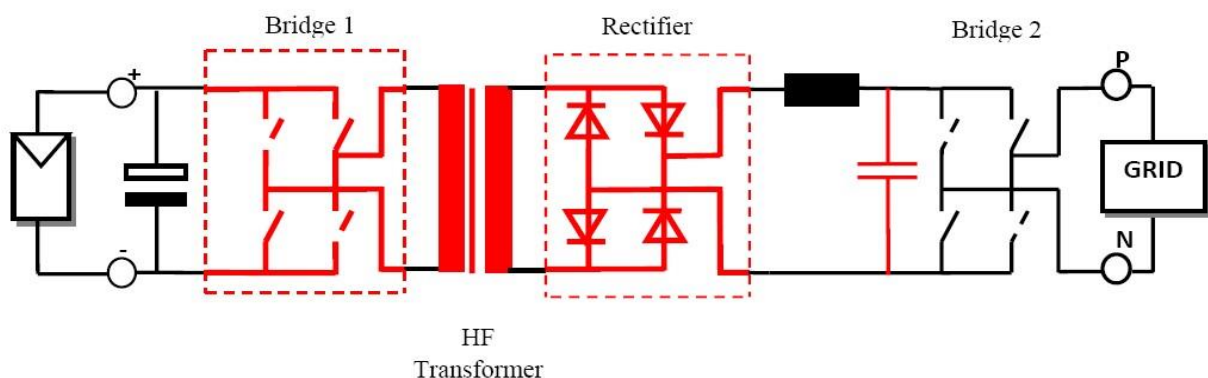


[Figure 5: Modèle d'un onduleur sans transformateur](#)

**Source :** Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau, Ahmed O. BAGRE

La tension du générateur PV est insuffisante pour effectuer le transfert de puissance dans de bonnes conditions, le convertisseur CC/CC élévateur (step-up) permet d'avoir la tension adéquate pour permettre à l'onduleur (bridge) d'effectuer la conversion CC/CA.

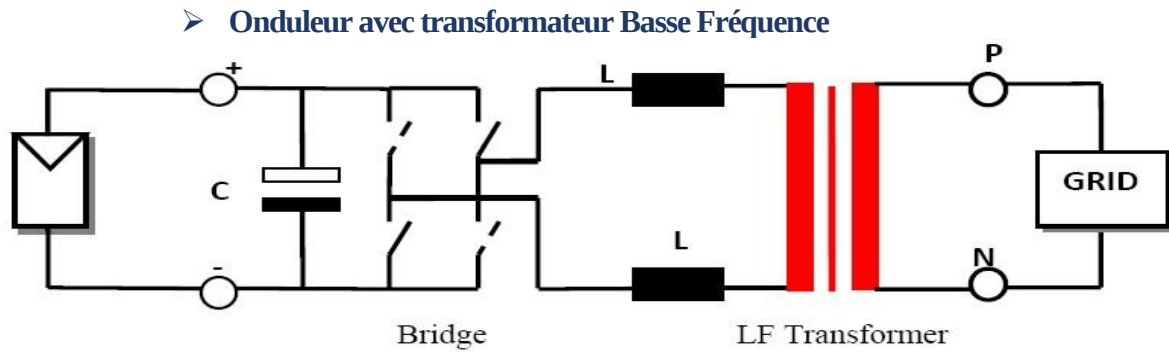
➤ Onduleur avec transformateur Haute Fréquence (HF)



[Figure 6: Modèle d'un onduleur avec transformateur haute fréquence](#)

**Source :** Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau, Ahmed O. BAGRE

La conversion CC/CA se fait dans un premier temps par le Bridge 1 (onduleur 1), le transformateur HF permet d'élever la tension. La tension alternative obtenue est rectifiée (courant continu) et convertie ensuite en signal alternatif sinusoïdal par le bridge 2.



[Figure 7: Onduleur avec transformateur basse fréquence](#)

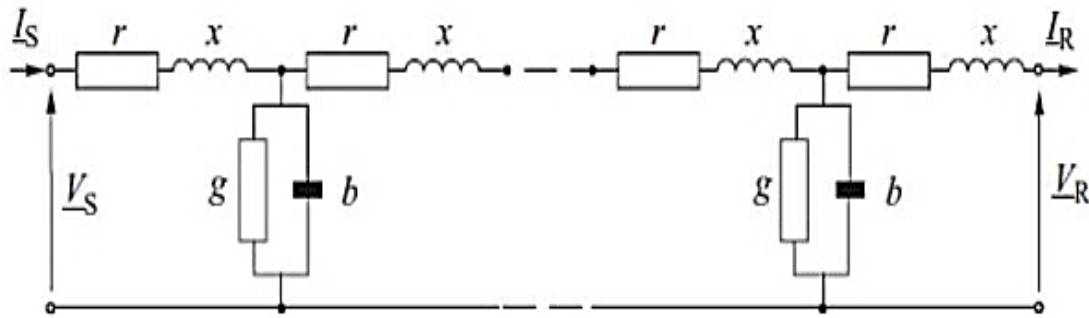
**Source :** Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau, Ahmed O. BAGRE

La conversion CC/CA se fait par le Bridge (onduleur), le transformateur LF (Low Frequency) ou Basse Fréquence permet une adaptation de la tension obtenue à celle du réseau.

### c. Ligne électrique

Les lignes sont des éléments qui permettent le transport de puissance d'un point à un autre. Elles peuvent être des conducteurs aériens ou des câbles souterrains. Elles sont classées en fonction de leur longueur. On distingue (03) types de lignes qui sont :

- **Les lignes courtes :** La longueur d'une telle ligne ne dépasse pas 50 km et le courant de fuite capacitif ne dépasse pas 5% (négligeable), la tension est inférieure ou égale à 60 kV.
- **Les lignes moyennes :** Leur longueur est comprise entre 50 et 150 km. Dans de telles lignes, les courants de fuites capacitifs étant plus élevés, on en tient compte dans nos calculs.
- **Les lignes longues :** La longueur des lignes longues est supérieure à 150 km. Dans l'étude de telles lignes, on tient également compte des courants de fuite capacitifs (OUEDRAOGO, 2013).



**Figure 8: Modèle général d'une ligne électrique**

**r** : résistances série en ohm par unité de longueur (ohm/km) ;

**x** : réactances série dues au couplage par champs magnétique entre les conducteurs en ohm/km;

**g** : conductances shunt en unité de longueur (S/km) et représentent les pertes de lignes dues au courant de fuite capacitif ;

**b** : susceptance shunt due au couplage par champ électrique entre les conducteurs en F/km ;

$x = \omega L$  ; **L** représente l'inductance ;

$\omega$  : est la pulsation ;  $\omega = 2\pi f$

**f** : représente la fréquence ;

**Z** : impédance de la ligne ;

$$Z = r + jx ;$$

**y** : admittance de la ligne ;

$$y = g + jb ;$$

Les différents paramètres énumérés ci-dessus ont une équivalence physique liée au comportement des lignes. Toutefois, les valeurs auxquelles on prête le plus d'attention sont les courants et tensions au départ et en bout de lignes ( $V_R$ ,  $I_R$ ,  $V_S$ ,  $I_S$ ).

### Modèle en PI des lignes

Le modèle général des lignes étant complexe, il existe un modèle plus simplifié utilisé pour les calculs. Ce modèle est celui de la ligne en PI (OUEDRAOGO, 2013).

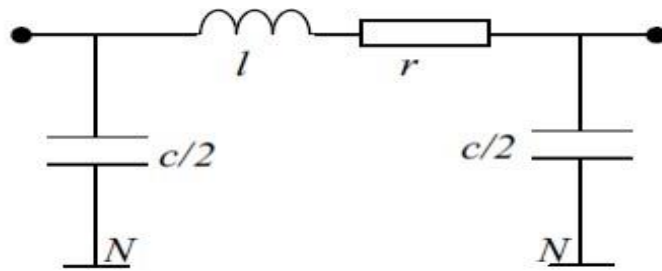


Figure 9: Modèle en PI d'une ligne électrique

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

$\rho$  : résistivité en  $\Omega\text{m}$  ;

$S$  : section en  $\text{m}^2$  ;

$L$  : longueur en m ;

$R$  : résistance en  $\Omega$  ;

$$C = (\pi \cdot \epsilon \cdot l) / \log(2D/d)$$

$D$  : distance entre phase et sol en m ;

$L$  : longueur en m ;

$d$  : diamètre en m ;

$\epsilon$  : Permittivité de l'air ;

$$L = (0,5 + 4,6 \log (2D/d)) \cdot l \cdot 10^{-7}$$

$L$  : longueur en m ;

$d$  : diamètre en m ;

$L$  : inductance en Henry ;

#### d. Transformateur à deux enroulements

Le transformateur électrique est une machine qui permet de modifier les valeurs de tension et d'intensité de l'énergie délivrée par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.

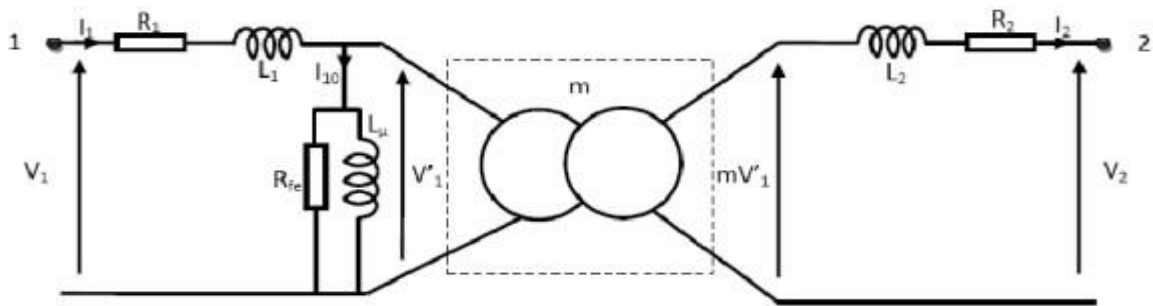


Figure 10: Modèle général d'un transformateur

- $R_1$  et  $R_2$  : Résistances des enroulements primaire et secondaire ;
- $L_1$  et  $L_2$  : Inductances de fuite des enroulements primaire et secondaire ;
- $I_1$  et  $I_2$  : Courants dans les enroulements primaire et secondaire ;
- $V_1$  et  $V_2$  : Tensions dans les enroulements primaire et secondaire ;
- $I_{10}$  : Courant magnétisant ;
- $R_{fe}$  : Résistance dues aux pertes fer ;
- $L_\mu$  : Inductance de magnétisation ;

### II.3. GENERALITES SUR LES PROTECTIONS

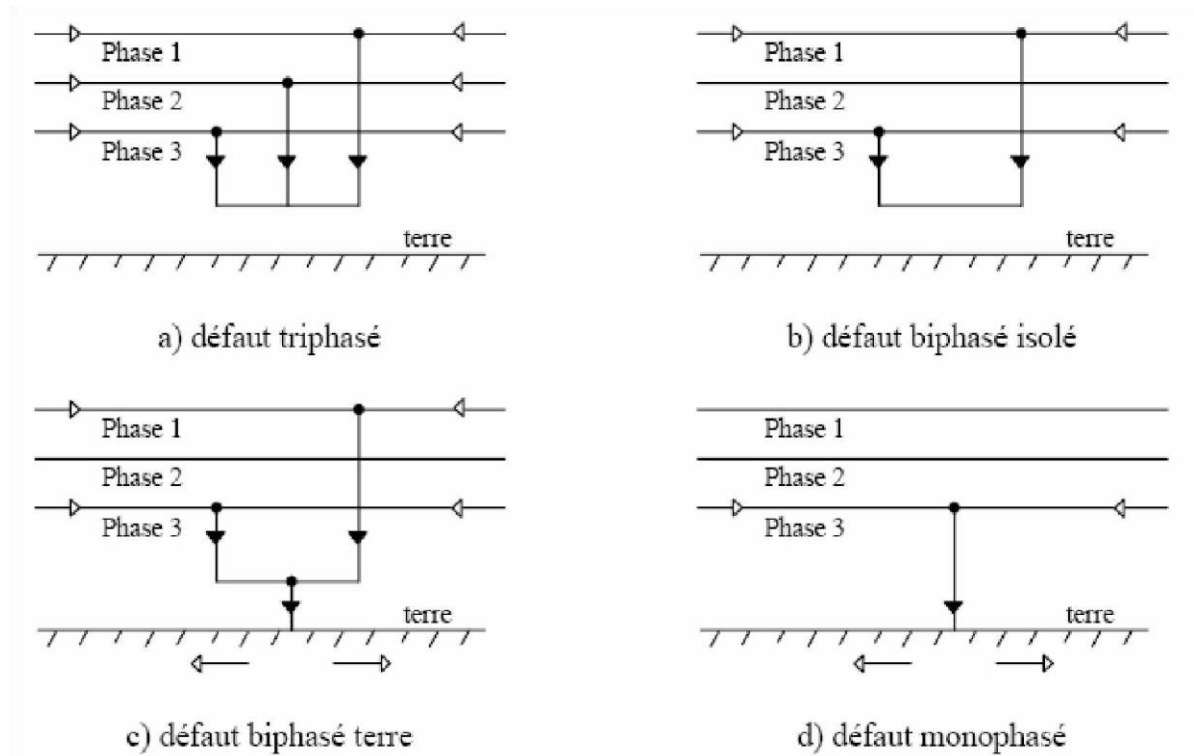
#### a. Différents types de défauts électriques

Une augmentation ou une diminution anormale des grandeurs nominales dans un circuit électrique constitue un défaut ou une perturbation. Ce sont le plus souvent les variations anormales de la tension, de l'intensité et de la fréquence qui sont à l'origine de ces perturbations.

#### Les courts-circuits

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires. Ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Plusieurs types de court-circuit peuvent se produire dans un réseau électrique :

- Court-circuit monophasé : Il correspond à un défaut entre une phase et la terre, c'est le plus fréquent.
- Court-circuit triphasé : Il correspond à la réunion des trois phases, c'est le courant de Court-circuit le plus élevé.
- Court-circuit biphasé isolé : Il correspond à un défaut entre deux phases. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur.
- Court-circuit biphasé terre : Il correspond à un défaut entre deux phases et la terre (Benoit de METZ-NOBLAT, 2005).



**Figure 11:** Différents types de défauts

### Les surtensions

Il existe deux classes des surtensions :

- Surtensions par décharges électriques atmosphériques :

Les orages sont des événements très habituels, et aussi très dangereux. On estime que sur notre planète se produisent simultanément quelques 2000 orages et qu'environ 100 coups de foudre se déchargent sur la terre chaque seconde. Au total, cela représente environ 4000 orages quotidiens et 9 millions de décharges atmosphériques chaque jour. Au moment de l'impact, la foudre provoque une impulsion de courant qui arrive à atteindre des dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge génère une surtension dans le système électrique qui peut provoquer

des incendies et la destruction des équipements électriques.

- Surtensions de commutation :

Ces surtensions sont générées dans les lignes électriques, principalement en raison des commutations de machines de grande puissance. Les moteurs électriques sont des charges très inductives dont la connexion et le débranchement provoque des surtensions. Il existe de même d'autres processus capables de les produire, comme par exemple l'allumage et l'extinction de la soudure à l'arc.

### **Les surcharges**

La surcharge d'un appareil est caractérisée par un courant supérieur au courant admissible. Les surcharges provoquent des chutes de tension importantes dans le réseau et accélère le vieillissement des équipements.

### **Les oscillations**

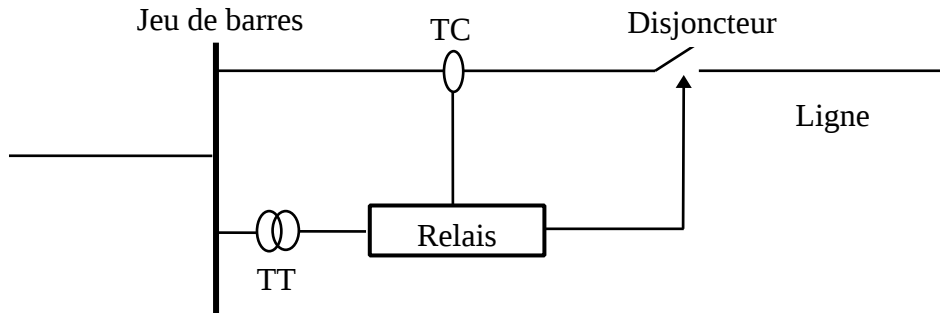
Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques, c'est la raison pour laquelle on les appelle phénomènes transitoires électromécaniques.

### **Les déséquilibres**

Les déséquilibres sont généralement dus à la mauvaise répartition des charges sur les trois phases. Ils apparaissent surtout dans les réseaux de distribution, ils donnent naissance à la composante inverse du courant, cette composante provoque des chutes de tension supplémentaires, des pertes de puissance et des échauffements (SANKARA, Novembre 2015).

### **b. Eléments constitutifs d'un système de protection**

Un système de protection est un ensemble de dispositifs destinés à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs éléments de coupures. Il est composé essentiellement de réducteurs de mesure, de relais de protection et d'éléments de coupure (disjoncteurs, interrupteurs-sectionneurs...)



**Figure 12:** Eléments constitutifs d'un système de protection

### Réducteurs de mesure

Pour des raisons de dimensionnement et de coût, les relais de protection sont prévus pour des courants et des tensions de valeurs réduites. De plus, pour assurer la sécurité des opérateurs, il faut interposer une séparation galvanique entre le réseau surveillé qui se trouve à tension élevée et le circuit de mesure à tension réduite mis à la terre en un point. On utilise pour cela des transformateurs de courant (TC) et des transformateurs de tension (TT). Afin d'assurer une bonne protection contre les défauts, la caractéristique essentielle d'un réducteur de mesure est sa précision (LAZAR, 2017).

### Relais de protection

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent une ou plusieurs informations à caractère analogique (courant, tension, puissance...) et le transmettent en un ordre de fermeture ou ouverture d'un circuit de commande lorsque ces informations reçues atteignent des valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées d'avance. En effet, le rôle des relais de protection consiste à détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que les défauts de court-circuit. Pour réaliser cette tâche, les relais disposent d'un certain nombre de fonctions définies de façon normalisée par des codes ANSI (Gerin, 2016). Le relais est l'élément central de la chaîne de protection.

Les fonctions principales de protection et leurs applications sont présentées en **Annexe 14** :  
Fonctions du code ANSI

### Disjoncteur

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée dans les conditions normales et anormales du réseau. Il est généralement associé à un système de protection (relais), qui détecte le défaut et envoie des ordres au disjoncteur pour éliminer automatiquement le défaut ou pour remettre en service un circuit lorsque le défaut a été éliminé. Sa fonction principale est d'interrompre le flux de courant détecté lors d'un défaut.

### III. COLLECTE DES DONNEES

Situé sur un site d'une superficie de 60 ha, la centrale solaire de zagtoui est le fruit d'un partenariat entre l'état burkinabè, l'Union Européenne (UE) et la France à travers l'Agence Française de Développement (AFD). Elle a couté pas moins de 47 500 000 d'euros. La centrale solaire de zagtoui est le premier jalon d'un vaste programme de développement de la production d'énergie solaire au Burkina Faso avec l'objectif de fournir d'ici 2020 plus de 100 MW d'énergie solaire sur le réseau du Burkina Faso (environ 30% de la production totale du pays).

### III.1. SCHEMA DE LA CENTRALE

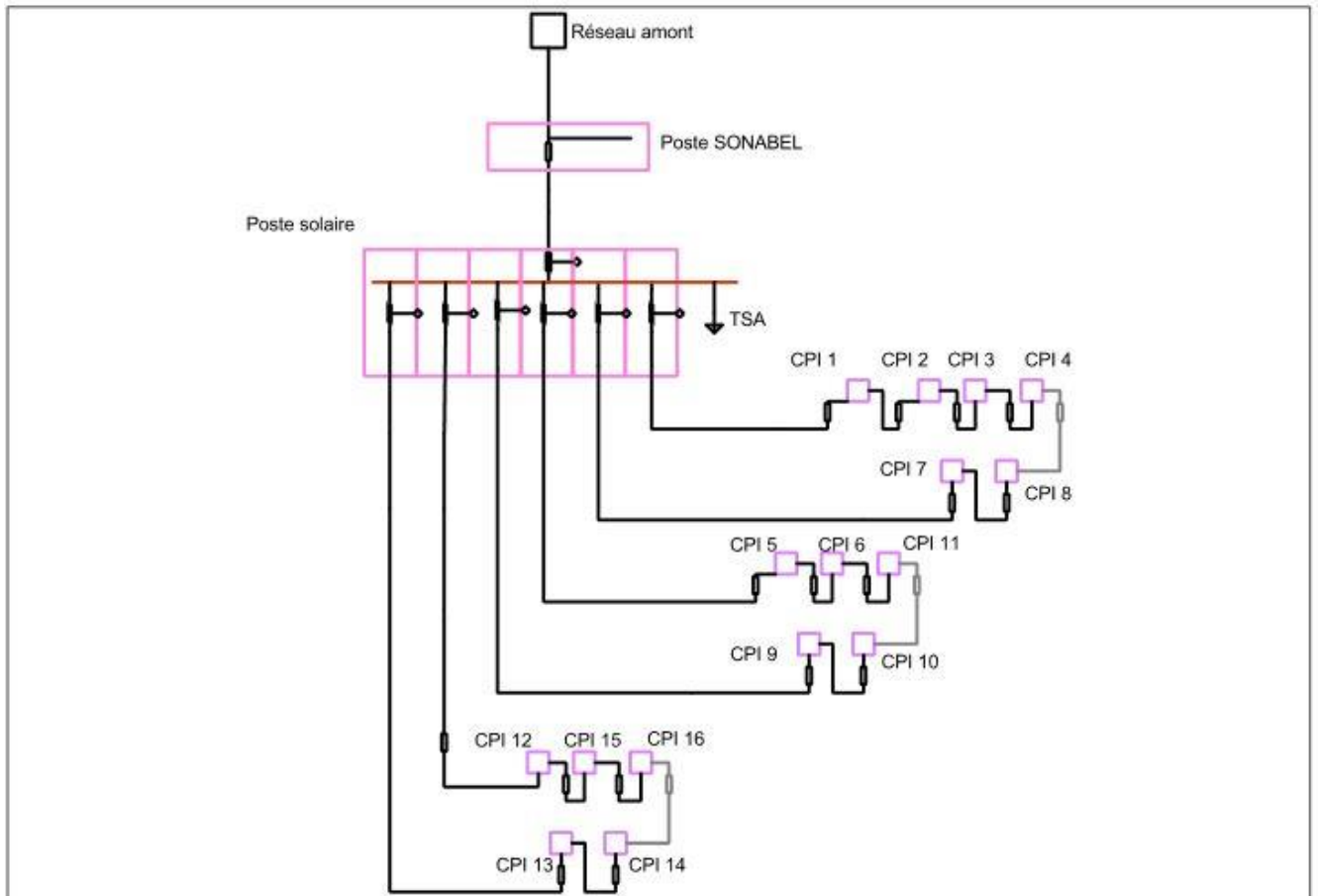


Figure 13: Schéma unifilaire de la centrale de Zagtouli

Ce schéma permet de comprendre la configuration de la centrale de Zagtouli. En violet, on peut distinguer les 16 CPI. La première boucle est constituée de 6 CPI, les deux autres de 5 CPI chacune. L'énergie collectée est transmise au poste solaire puis au poste SONABEL avant de passer sur le réseau. Le TSA prélève une partie de l'énergie au poste solaire pour les besoins des auxiliaires.

### III.2. DONNEES TECHNIQUES DES EQUIPEMENTS

Cette partie présente les données d'entrée techniques principales de la centrale de Zagtouli utilisées pour la modélisation.

#### a. Modules photovoltaïques

Pour la centrale de Zagtouli, le choix s'est porté sur des modules polycristallin de la marque allemande SOLARWORLD. Il s'agit du modèle SW 260 poly avec pour caractéristiques principales dans les conditions standard :

**Tableau 1: Caractéristiques principales du module**

|                                                 |           |         |
|-------------------------------------------------|-----------|---------|
| <b>Puissance au point de puissance maximale</b> | $P_{max}$ | 260 Wc  |
| <b>Tension à vide</b>                           | $U_{oc}$  | 38,4 V  |
| <b>Tension au point de puissance maximale</b>   | $U_{mpp}$ | 31,4 V  |
| <b>Courant de court-circuit</b>                 | $I_{sc}$  | 8,94 A  |
| <b>Courant au point de puissance maximale</b>   | $I_{mpp}$ | 8,37 A  |
| <b>Rendement du module</b>                      | $\eta_m$  | 15,51 % |

La fiche technique du module est présentée en **Annexe 1: Fiche technique du module**.

La centrale est constituée au total de cent vingt-neuf mille six cent (129 600) modules repartis sur mille huit cent (1800) tables. Les tables sont donc constituées chacune de 72 modules regroupés en trois strings de 24 modules.

L'énergie est collectée par des boîtes de jonction (460 au total) puis envoyée au niveau des CPI. Il existe des boîtes disposant de 12 entrées et d'autres, disposant de 9 entrées.

#### b. Centres photovoltaïques intégrés (CPI)

Le centre photovoltaïque intégré (CPI) est un bloc électrique constitué essentiellement de trois compartiments :

- Le compartiment onduleur : constitué de deux onduleurs de 1,1 MW chacun.
- Le compartiment transformateur : constitué d'un transformateur de 2330kVA.
- Le compartiment haute tension : constitué d'une cellule arrivée, une cellule départ et une cellule protection.



Figure 14: Représentation d'un CPI (CPI 11)

Au total, la centrale dispose de 16 CPI regroupés en trois boucles : une de 6 CPI et deux de 5 CPI. Les 129 600 modules sont répartis comme suit au niveau des CPI :

Tableau 2: Caractéristiques générales des CPI

| REPARTITION PAR CPI        |            |            |                  |                 |                     |            |                  |                 |                  |
|----------------------------|------------|------------|------------------|-----------------|---------------------|------------|------------------|-----------------|------------------|
| CPI 1-2-3-4-12-13-14-15-16 |            |            |                  |                 | CPI 5-6-7-8-9-10-11 |            |                  |                 | TOTAL            |
|                            | Onduleur 1 | Onduleur 2 | Onduleurs 1 et 2 | Total des 9 CPI | Onduleur 1          | Onduleur 2 | Onduleurs 1 et 2 | Total des 7 CPI | Total des 16 CPI |
| <b>Puissance(kWc)</b>      | 1085,76    | 1085,76    | 2 171,52         | 19 543,68       | 1 010,88            | 1 010,88   | 2 021,32         | 14 152,32       | 33 696           |
| <b>Puissance(KVA)</b>      | 1 094      | 1 094      | 2 188            | 19 692,00       | 1 094               | 1 094      | 2 188            | 15 316,00       | 35 008           |
| <b>Nombre de panneaux</b>  | 4 176      | 4 176      | 8 352            | 75 168,00       | 3 888               | 3 888      | 7 776            | 54 432,00       | 129 600          |
| <b>Nombre de tables</b>    | 58         | 58         | 116              | 1 044,00        | 54                  | 54         | 108              | 756,00          | 1 800            |
| <b>Nombre de string</b>    | 174        | 174        | 348              | 3 132,00        | 162                 | 162        | 324              | 2 268,00        | 5 400            |

### ➤ Onduleur

Chaque CPI dispose de deux (2) onduleurs de la marque INGECOM SUN (INGETEAM) de 1,1 MW reliés chacun à quatorze (14) ou quinze (15) boîtes de jonctions.

Les caractéristiques principales de l'onduleur sont les suivantes :

**Tableau 3: Caractéristiques de l'onduleur**

|                                                  |                           |
|--------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>Plage de puissance du champ PV recommandé</b> | 1 179,3 kWp - 1 513,2 kWp |
| <b>Tension maximale DC</b>                       | 1 050 V                   |
| <b>Courant maximal DC</b>                        | 2 000 A                   |
| <b>Nombre d'entrées</b>                          | 15                        |
| <b>Puissance AC 50°C</b>                         | 1 071 KVA                 |
| <b>Tension nominale AC</b>                       | 420 V                     |
| <b>Courant AC 50°C</b>                           | 1 472 A                   |

La fiche technique de l'onduleur est présentée en **Annexe 2: Fiche technique de l'onduleur**.

➤ **Transformateur**

Le transformateur est de la marque CG POWER SYSTEMS BELGIUM NV. Il reçoit la tension provenant des onduleurs et l'élève à 33 KV. Ses caractéristiques principales sont :

**Tableau 4:Caractéristiques du transformateur**

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>Puissance apparente</b>   | 2330 KVA  |
| <b>Tension au primaire</b>   | 420 V     |
| <b>Tension au secondaire</b> | 33 000 V  |
| <b>Nombre de prises</b>      | 5         |
| <b>Pertes à vide</b>         | 1,895 kW  |
| <b>Pertes cuivre</b>         | 22,695 kW |

La fiche technique de l'onduleur est présentée en **Annexe 3: Fiche technique du transformateur**.

➤ **Cellules**

Chaque CPI dispose de trois cellules ; une cellule arrivée, une cellule départ et une cellule de protection du transformateur. Il s'agit de cellules SIEMENS avec pour caractéristiques :

**Tableau 5: Caractéristiques des cellules**

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| <b>Type</b>                 | 8DJH36               |
| <b>N de série</b>           | CV 915638-000050/004 |
| <b>Année de fabrication</b> | 03-2017              |
| <b>U<sub>r</sub></b>        | 36 kV                |
| <b>I<sub>r</sub></b>        | 630 A                |
| <b>Fr</b>                   | 50 Hz                |
| <b>I<sub>k</sub></b>        | 20 kA                |

**c. Câbles électriques**

Plusieurs types de câbles existent dans la centrale. Entre les modules, les câbles sont de 6 mm<sup>2</sup> mais à la sortie des boîtes de jonctions, ils passent à 185 mm<sup>2</sup>. Les liaisons entre les CPI et les liaisons entre CPI-Poste solaire sont faites grâce à des conducteurs de 240 mm<sup>2</sup> (**Annexe 4: Caractéristiques des câbles**).

**d. Poste solaire**

Il comprend :

- Six (6) cellules de départ : chaque demi-boucle est reliée à une cellule de départ du poste solaire. Les CPI directement reliés au poste solaire sont donc les CPI 1, 5, 7, 9, 12 et 13 ;
- Une cellule comptage ;
- Une cellule protection du jeu de barre ;
- Une cellule protection des transformateurs de tension,
- Une cellule protection du transformateur de service auxiliaire ;
- Une cellule d'arrivée au poste de zagtoui ;

**e. Salle de commande**

Elle abrite le système de monitoring SCADA (Supervisory Control And Data acquisition) qui permet notamment la téléconduite de la centrale :

Les seize (16) CPI sont reliés au poste solaire via une fibre optique selon deux (2) boucles pour assurer la communication :

- Première boucle :1-2-3-4-8-7-6-5
- Deuxième boucle :9-10-11-12-15-16-14-13

Le SCADA communique avec le dispatching afin de remonter les données principales du fonctionnement de la centrale et recevoir des ordres (marche/arrêt, réglage de paramètres de régulation...). Cette communication est possible grâce à la fibre optique qui relie la salle de commande au poste SONABEL, puis du poste SONABEL au dispatching.

**f. Stations météorologiques**

La centrale dispose de quatre petites (4) stations météorologiques constituées chacune d'un pyranomètre et de thermomètres. La première station météorologique se situe au niveau du CPI 2, la deuxième au niveau du CPI 10, la troisième au niveau du CPI 16 et la quatrième se situe au niveau du SCADA.

**g. Données des protections**

Tous les relais présentés dans cette partie sont de la marque INGETEAM.

➤ **Protection de la ligne principale**

La ligne principale est protégée par un relais de type PL300IC.

**Tableau 6: Réglage des protections de la ligne principale**

| Type de relais | Transformateur de mesure | Transformateur de mesure | Réglage | Temporisation (s) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------|-------------------|
| PL300IC        | 51                       | 630A/1A                  | 1,14 A  | 0,08              |
|                | 50                       |                          | 4,99 A  | 0,08              |
|                | 50N                      |                          | 0,2 A   | 0,3               |
|                | 59                       | 33000 V/110V             | 73,03 V | 0,05              |
|                | 59T                      |                          | 69,85 V | 3                 |
|                | 27T                      |                          | 57,15 V | 1,6               |
|                | 27                       |                          | 15,88 V | 0,6               |
|                | 59N                      |                          | 19 V    | 0,6               |
|                | 81-step1                 |                          | 46Hz    | 5                 |
|                | 81-step2                 |                          | 45Hz    | 0,2               |
|                | 81-step3                 |                          | 53Hz    | 5                 |
|                | 81-step4                 |                          | 54hz    | 0,2               |

➤ **Protection des boucles**

Les demi-boucles sont protégées par des relais de type PL300DD. Ils sont au nombre de six (6), un pour chaque demi-boucle.

**Tableau 7: Réglage des protections des boucles**

| Type de relais | Fonctions | Transformateur de mesure | Réglage | Temporisation (s) |
|----------------|-----------|--------------------------|---------|-------------------|
| PL300DD        | 51        | 250A/1A                  | 1,08A   | 0,06              |
|                | 50        |                          | 7,94A   | 0,06              |
|                | 50N       |                          | 0,25A   | 0,1               |
|                | 59N       |                          | 19 A    | 0,5               |
|                | 27T       | 33000V/110V              | 57,15 V | 2,5               |

➤ **Protection des transformateurs**

Les transformateurs sont protégés par des relais de type PL70IT. Ils sont au nombre de seize (16), un pour chaque CPI.

Tableau 8: Réglage des protections des transformateurs

| Type de relais | Fonctions | Transformateur de mesure | Réglage | Temporisation (s) |
|----------------|-----------|--------------------------|---------|-------------------|
| PL70IT         | 51        | 150A/5A                  | 1,5 A   | 0,05              |
|                | 50        |                          | 13 A    | 0,05              |
|                | 51N       |                          | 0,2 A   | 0,02              |
|                | 50N       |                          | 1,3 A   | 0,1s              |

### **III.3. ACQUISITION DE DONNEES DES COMPTEURS**

Afin de valider le modèle de la centrale de Zagtouli, des relevés ont été effectués à la date du 11 juin 2019 au compteur du poste solaire (dans l'enceinte de la centrale de Zagtouli) et au compteur du poste SONABEL. Ces relevés ont été effectués chaque heure entre 6h et 18h. En plus de ces relevés, nous avons pu obtenir grâce au SCADA, les données de production de chaque CPI ainsi que les données d'ensoleillement et de température des stations météorologiques.

Une fiche de relevés a été réalisée en deux exemplaires, une pour le poste solaire et la deuxième pour le poste de Zagtouli (**Annexe 5:Fiche de relevés des postes**).

## IV. MODELISATION SUR POWER FACTORY

La modélisation est l'opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses composants. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel Power factory.

### IV.1. PRESENTATION DU LOGICIEL POWER FACTORY

Power factory est un logiciel spécialisé dans l'analyse des réseaux électriques dans les domaines de la production, du transport, de la distribution ainsi que dans le domaine industriel. Il a été conçu par DigSILENT GmbH qui est une grande entreprise d'expertise et de développement de logiciels fournissant des services hautement spécialisés dans le domaine des réseaux électriques. Plusieurs versions du logiciel existent déjà, témoignant des améliorations continues effectuées par les promoteurs. La version utilisée pour cette étude est la 15.1 (DigSILENT power factory 15.1).

Power factory met à notre disposition une multitude de fonctionnalités comme l'analyse de flux de puissance, l'analyse des courts-circuits AC et DC, l'analyse de contingence, l'évaluation des demandes de raccordement... (GmbH, Octobre 2014).

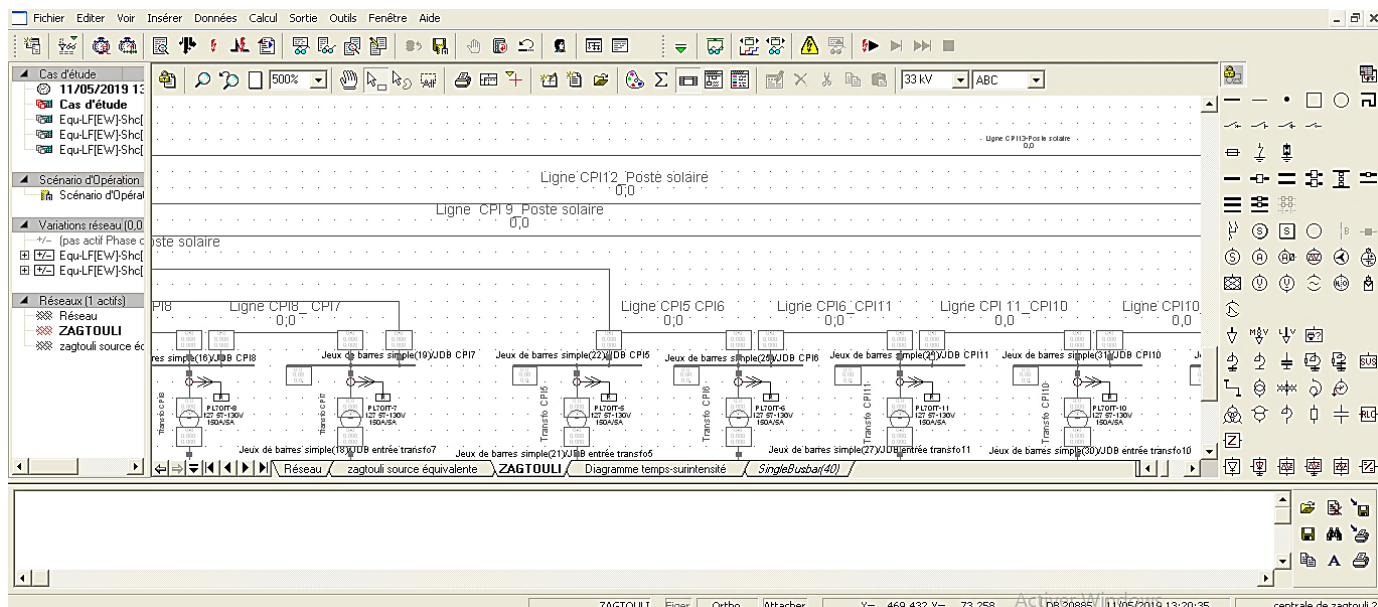


Figure 15: Interface du logiciel Power factory

## IV.2. MODELISATION DES ELEMENTS DE BASE

### a. Modèle détaillé

Modéliser la centrale de Zagtouli de manière détaillée c'est créer un modèle théoriquement identique de la centrale existante. Pour ce faire, nous devons modéliser chaque élément de la centrale (modules, onduleurs, transformateurs, câbles...) grâce aux modèles de base présents dans le logiciel power factory et des informations présentées plus haut.

#### ➤ **Système photovoltaïque**

Dans le logiciel power factory, le système photovoltaïque est un assemblage de plusieurs modules connectés à un ou plusieurs onduleur(s) réseau.

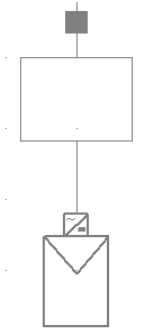


Figure 16:Représentation d'un système PV sur Power Factory

Avec ce système, le choix est laissé à l'utilisateur d'introduire directement la puissance active demandée ou d'effectuer un calcul automatiquement en fonction de la localisation géographique, du temps, de l'irradiance, des caractéristiques du module... Pour notre étude, nous avons choisi la deuxième option « calcul solaire » car plus précise.

Cette option permet d'introduire les caractéristiques du module telles que puissance, la tension nominale, le courant nominal, la tension en circuit ouvert, le type de matériau, le coefficient de température...La puissance active est calculée en fonction du nombre d'onduleurs parallèles et du nombre de panneaux par onduleur.

Le schéma ci-dessous montre la configuration d'un système PV dans Power Factory.

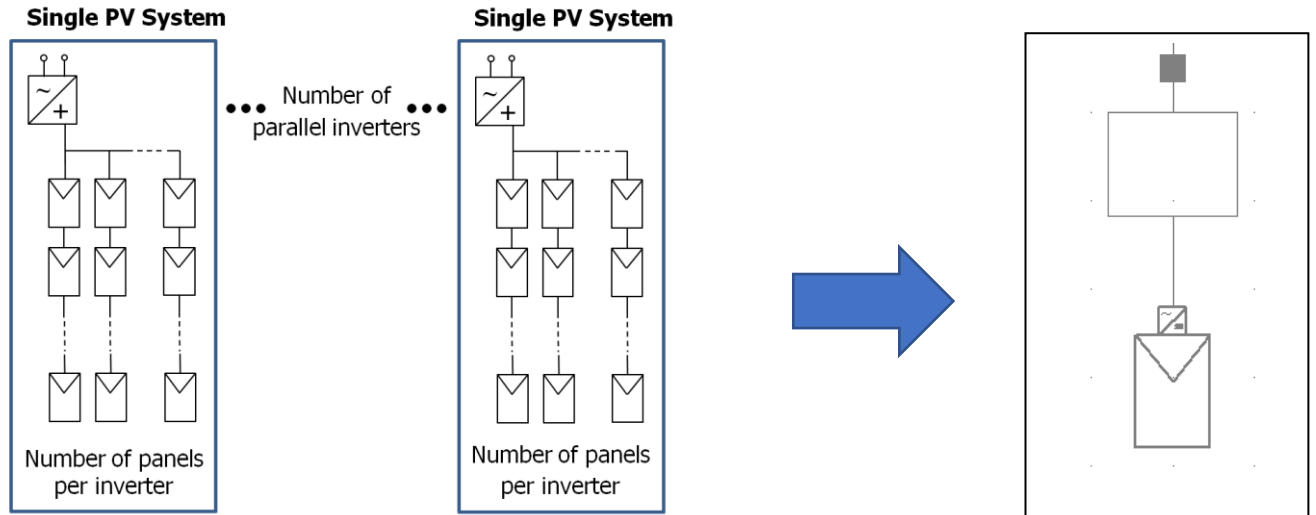


Figure 17: Configuration d'un système photovoltaïque sur power factory

Le système PV est constitué d'un ou de plusieurs système PV unitaire (un ou plusieurs strings de modules reliés à un onduleur).

$$P_{\text{Panneau}} = \frac{E_{g,pv} \times P_{pk,panneau} \times \eta_{rel} \times \eta_{ond}}{E_{STD}} \quad \text{et} \quad P_{\text{Système}} = P_{\text{Panneau}} \times \text{num}_{\text{panneaux}}$$

Avec :

$P_{\text{Panneau}}$  : Puissance active à la sortie du panneau en kW ;

$P_{\text{système}}$  : Puissance active à la sortie du système PV en kW ;

$\text{num}_{\text{panneaux}}$  : Nombre de panneaux par onduleur ;

$E_{g,pv}$  : Irradiance globale en  $W/m_2$  ;

$E_{STD}$  : Valeur standard d'irradiance, 1000  $W/m_2$  ;

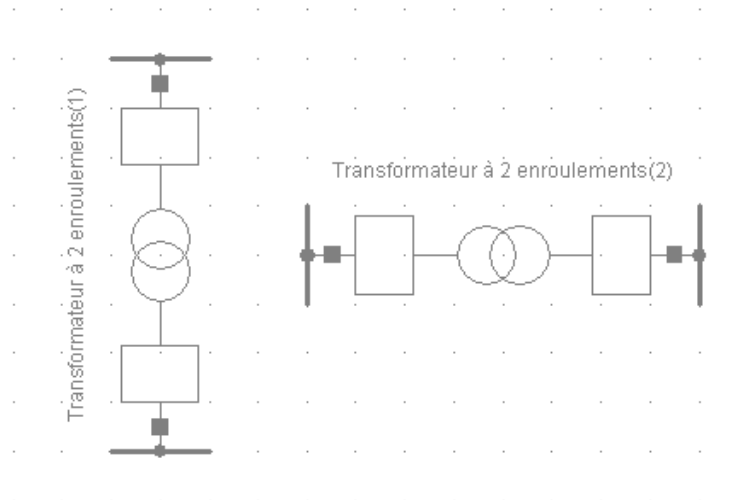
$P_{pk,panneau}$  : Crête du panneau photovoltaïque ;

$\eta_{rel}$  : Rendement du panneau photovoltaïque ;

$\eta_{ond}$  : Rendement de l'onduleur ;

### ➤ Transformateur à deux (2) enroulements

Sur power factory, un transformateur à deux (2) enroulements peut être représenté de la manière suivante :

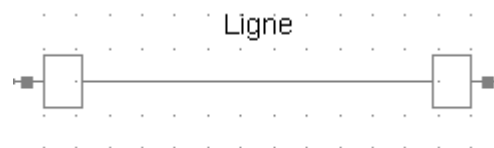


**Figure 18:** Représentation d'un transformateur à deux (2) enroulements dans PowerFactory

Les informations concernant le transformateur telles que la technologie (transformateur triphasé ou monophasé), la puissance nominale, la fréquence, les tensions souhaitées au primaire et au secondaire, les pertes cuivre, les pertes à vide, le nombre de prises, la tension additionnelle par prise (dans l'onglet flux de puissance) ...sont à renseigner à l'aide de la fiche technique du transformateur.

### ➤ Câbles

Les liaisons entre onduleur et transformateur à l'intérieur des CPI sont effectuées avec des câbles de 240 mm<sup>2</sup> avec 420 V comme tension nominale. Les autres liaisons ont été faite avec des câbles de 33 kV.



**Figure 19:** Représentation d'une ligne dans power Factory

A l'aide de la fiche technique du câble, nous devons créer un type de ligne correspondant au modèle existant sur le site de la centrale et introduire entre autres, la tension nominale, le courant nominale (dans la terre et à l'air libre), le nombre de phases, la résistance et la réactance du câble, sa longueur ...

### ➤ Dispositifs de protection

Des dispositifs de protection peuvent être ajoutés au modèle du réseau en les plaçant directement dans le diagramme unifilaire(apparent) ou en les plaçant dans les cellules (non apparent).

Les fonctions de modélisation de la protection de Power factory ont été conçues pour supporter l'utilisation de modèles de relais « génériques » ou « détaillés » basés sur des dispositifs spécifiques à des fabricants. Pour les relais « génériques », une bibliothèque globale contenant des relais, fusibles et transformateurs de mesure génériques prédéfinis qui peuvent être utilisés pour concevoir des schémas sans exiger de détails spécifiques de la gamme de produits d'un fabricant de relais particulier est mise à notre disposition.

Les relais INGETEAM ne correspondant à aucun relais générique de cette version du logiciel, notre choix c'est porté sur un relais de la marque Micom AREVA, qui présentait des fonctions similaires à celle de INGETEAM. Il a fallu cependant faire quelques ajustements notamment sur les temps de déclenchement des défauts qui étaient différents, et mettre hors service certaines fonctions qui n'existaient pas dans les relais INGETEAM utilisés à Zagtouli.

### **b. Modèle simplifié**

Modéliser la centrale photovoltaïque de Zagtouli en utilisant une source équivalente (modèle simplifié) est un travail assez aisé comparé à sa modélisation détaillée. Il s'agit là de représenter tout le champ par un seul système PV avec 33 MW comme puissance active maximale. L'ensemble des sous-champs, des CPI, des transformateurs est représenté par un seul système PV.

### ➤ Système PV

Le système PV utilisé pour ce modèle est le même que celui utilisé précédemment à la seule différence qu'il ne sera pas configuré comme l'autre.

Comme modèle, nous choisirons « entrée de puissance active » plutôt que « calcul solaire ». Avec cette configuration, les caractéristiques des modules utilisés ne sont pas à introduire. Il suffit de renseigner la puissance souhaitée et le facteur de puissance global.

### ➤ Câbles

Les câbles utilisés pour ce modèle sont de 240 mm<sup>2</sup> et servent à transiter l'énergie produite par la centrale au poste SONABEL.

#### **IV.3. CRITERES DE VALIDATION DE LA STABILITE**

Les critères suivants sont utilisés pour définir les limites de performance permises en condition normale d'exploitation.

##### **Critère 1 : Limites de tension**

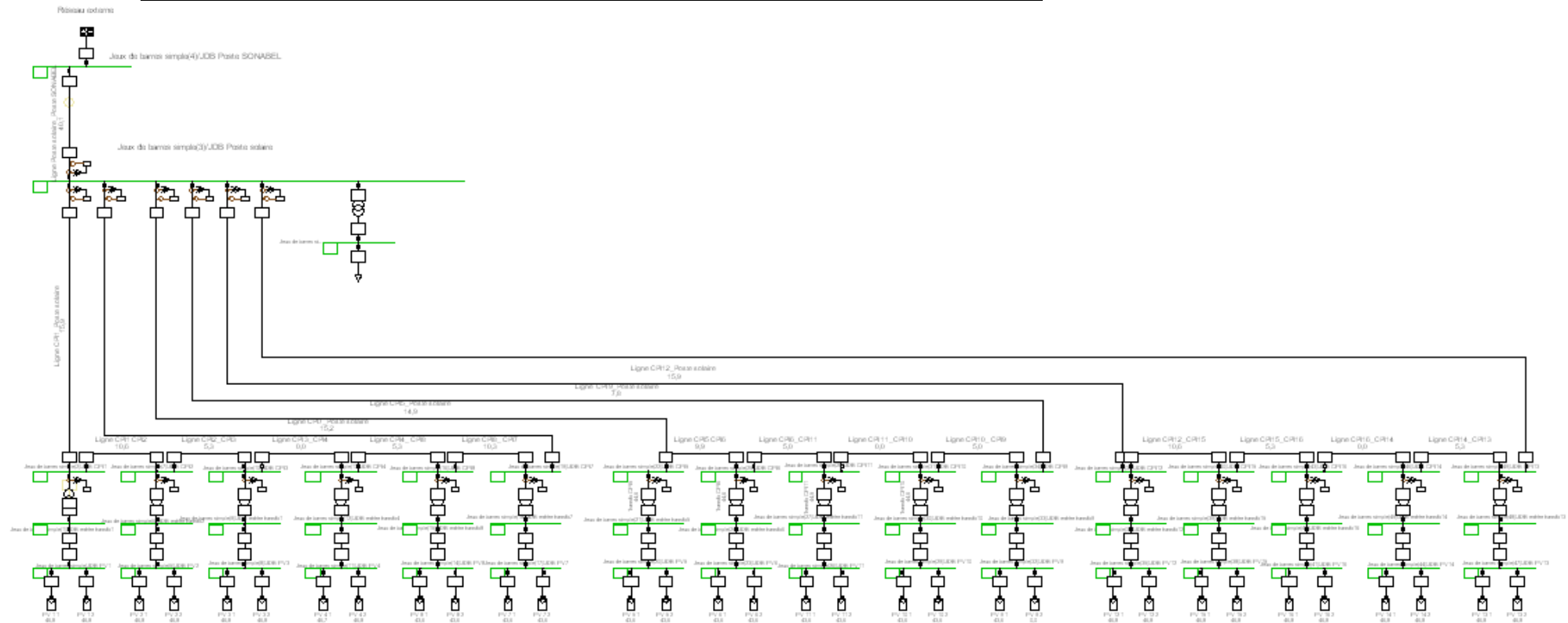
La tension des jeux de barres doit être comprise dans une plage admissible de 5% de la tension nominale. A moins 5% de la tension nominale, on considèrera que l'élément est en sous-tension et à plus 5% qu'il est en surtension.

##### **Critère 2 : Limites de transit**

En régime normal de fonctionnement, le transit ne doit pas dépasser la capacité nominale de l'ouvrage (lignes, transformateurs) (VANDAMME, 2016).

Lors des simulations, la couleur verte observée indique que les critères de stabilité sont respectés. S'il arrive de constater des éléments de la centrale en rouge, cela indiquerait qu'ils fonctionnent au-delà des limites autorisées et donc qu'ils sont en surtension ou en surcharge. Au cas inverse, la couleur orange indique un fonctionnement en sous tension.

#### IV.4. SCHEMA UNIFILAIRE DU MODELE DETAILLE DE LA CENTRALE DE ZAGTOULI





## V. RESULTATS ET DISCUSSION

### V.1. VALIDATION DES MODELES

La phase de validation du modèle est essentielle pour confirmer la pertinence du modèle choisi. Valider un modèle c'est démontrer sa capacité à décrire le système réel et confirmer les choix techniques réalisés.

Pour valider les modèles de la centrale de Zagtouli, nous avons simulé un calcul en régime statique (6h et à 14h) et un calcul en régime quasi dynamique à la date du 11 juin 2019 afin de comparer les résultats avec les résultats relevés sur les compteurs de la centrale.

#### a. Etude en régime statique

Les calculs de flux de puissances sont utilisés pour analyser les réseaux dans des conditions stables (sans court-circuit). Un calcul de flux de puissances détermine les flux de puissances dans toutes les branches et la tension de tous les nœuds (GmbH, Octobre 2014). La méthode choisie par power factory pour le calcul de flux de puissance est la méthode de Newton-Raphson étendu.

#### ➤ Modèle détaillé

##### Analyse des résultats obtenus à 6h

Au cours des relevés à 6h, seuls les CPI 1, CPI7, CPI9 et CPI12 fonctionnaient. Le calcul de flux de puissance a donc été réalisé en tenant compte de ce paramètre.

La puissance active totale fournie par le champ solaire au poste solaire est de 0,24 MW d'après le modèle avec une consommation interne de 20 kW. Cette valeur est obtenue grâce à une irradiance de 40,68 W/m<sup>2</sup> observé à la station météo CPI 10. Au poste SONABEL, elle passe à 0,19 MW. Les pertes actives sur l'ensemble du réseau sont estimées à 30 kW. Ces pertes sont dues au trajet entre le champ solaire et le poste SONABEL estimé à 404 ml ainsi qu'aux pertes induites par les transformateurs.

Sur le site, nous avons relevé au compteur du poste solaire une puissance instantanée de 0,21 MW à 6h et une puissance instantanée de 0,18 au poste SONABEL.

Le calcul de flux de puissance est illustré en **Annexe 6: Calcul de flux de puissance (modèle détaillée 6h)**.

Le tableau ci-dessous compare les résultats obtenus avec les résultats relevés par le SCADA.

Tableau 9: Comparaison de la production des CPI à 6h (modèle détaillé)

| Nom du CPI     | Nom de l'onduleur | Valeur obtenue par le modèle (kW) | Valeur réelle relevée par le SCADA(kW) | Erreur relative (%) |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
| CPI 1          | Onduleur 1        | 30,99                             | 30,79                                  | 0,61                |
|                | Onduleur 2        | 30,99                             | 30,90                                  | 0,28                |
| CPI 2          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 3          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 4          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 5          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 6          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 7          | Onduleur 1        | 28,86                             | 28,71                                  | 0,55                |
|                | Onduleur 2        | 28,86                             | 28,80                                  | 0,20                |
| CPI 8          | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | 00                  |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | 00                  |
| CPI 9          | Onduleur 1        | 28,86                             | 29                                     | 0,49                |
|                | Onduleur 2        | 28,86                             | 28,82                                  | 0,19                |
| CPI 10         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 11         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 12         | Onduleur 1        | 30,99                             | 31,00                                  | 0,04                |
|                | Onduleur 2        | 30,99                             | 31,10                                  | 0,36                |
| CPI 13         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 14         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 15         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| CPI 16         | Onduleur 1        | 00                                | 00                                     | -                   |
|                | Onduleur 2        | 00                                | 00                                     | -                   |
| TOTAL          |                   | 239,38                            | 239,12                                 | -                   |
| ERREUR MOYENNE |                   |                                   |                                        | 0,11                |

Avec : Erreur relative =  $\frac{\text{Valeur réelle} - \text{valeur du modèle}}{\text{Valeur réelle}} \times 100$

Après simulation sur Power factory, nous remarquons une différence moyenne de 0,11% entre les résultats réels obtenus grâce au SCADA et les résultats obtenus grâce au modèle. L'erreur minimum est observée à la sortie de l'onduleur 1 du CPI 12 (0,04%) et l'erreur maximum à la sortie de l'onduleur 1 du CPI 1 (0,61%).

De manière générale, les résultats réels sont plus bas que les résultats du modèle. Cela est probablement dû à une baisse du rendement des modules. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer:

- La poussière s'accumulant sur les modules

La poussière entraîne une baisse de la productivité des modules. Pourtant à Zagtoui, le nettoyage des modules est assuré par un seul tracteur qui met du temps à parcourir tout le champ.

- L'inégalité de l'ensoleillement sur l'étendue du champ solaire

Les simulations du 11 juin 2019 ont été faites grâce à l'irradiation recueilli à de la station météo se trouvant au niveau du CPI10. Le champ étant très vaste, nous ne pouvons pas assurer que l'ensoleillement sera identique sur toute l'étendue du champ solaire.

- Des modules défectueux

Des fissures, des rayures peuvent jouer également sur le rendement des modules (le jour des relevés, un module défectueux fut remplacé par exemple).

### **Analyse des résultats obtenus à 14h**

La puissance active totale fournie par le champ solaire au poste solaire est de 22,18 MW d'après le modèle. Cette valeur est obtenue grâce à une irradiance de 806,22 W/m<sup>2</sup> observé à la station météo CPI 10. Au poste SONABEL, elle passe à 21,96 MW. Les pertes actives sur l'ensemble du réseau sont estimées à 210 kW et la charge totale à 20 kW. Ces pertes sont également dues au trajet entre le champ solaire et le poste SONABEL estimé à 404 ml ainsi qu'aux pertes induites par les transformateurs.

Sur le site, nous avons relevé au compteur du poste solaire une puissance instantanée de 21,86 MW à 14h et une puissance instantanée de 21,6 au poste SONABEL.

Le calcul de flux de puissance à 14h est illustré en **Annexe 8: Calcul de flux de puissance (modèle détaillée 14h)**.

Le tableau ci-dessous compare les résultats obtenus avec les résultats relevés par le SCADA.

Tableau 10: Comparaison de la production des CPI à 14h (modèle détaillé)

| Nom du CPI     | Nom de l'onduleur | Valeur obtenue par le modèle (kW) | Valeur réelle relevée par le SCADA (kW) | Erreur relative (%) |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| CPI 1          | Onduleur 1        | 714,83                            | 713,46                                  | 0,19                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 713,79                                  | 0,15                |
| CPI 2          | Onduleur 1        | 714,83                            | 713,98                                  | 0,12                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 711,8                                   | 0,43                |
| CPI 3          | Onduleur 1        | 714,83                            | 713,29                                  | 0,22                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 712,66                                  | 0,30                |
| CPI 4          | Onduleur 1        | 714,83                            | 713,5                                   | 0,19                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 713,99                                  | 0,12                |
| CPI 5          | Onduleur 1        | 665,53                            | 665,01                                  | 0,08                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 664,91                                  | 0,09                |
| CPI 6          | Onduleur 1        | 665,53                            | 662,02                                  | 0,53                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 662,5                                   | 0,46                |
| CPI 7          | Onduleur 1        | 665,53                            | 664,36                                  | 0,18                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 665,2                                   | 0,05                |
| CPI 8          | Onduleur 1        | 665,53                            | 663,99                                  | 0,23                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 664,21                                  | 0,20                |
| CPI 9          | Onduleur 1        | 665,53                            | 663,62                                  | 0,29                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 662,18                                  | 0,51                |
| CPI 10         | Onduleur 1        | 665,53                            | 665,02                                  | 0,08                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 664,91                                  | 0,09                |
| CPI 11         | Onduleur 1        | 665,53                            | 664,02                                  | 0,23                |
|                | Onduleur 2        | 665,53                            | 664,5                                   | 0,16                |
| CPI 12         | Onduleur 1        | 714,83                            | 713,65                                  | 0,17                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 712,88                                  | 0,27                |
| CPI 13         | Onduleur 1        | 714,83                            | 714,57                                  | 0,04                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 714,69                                  | 0,02                |
| CPI 14         | Onduleur 1        | 714,83                            | 714,6                                   | 0,03                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 712,6                                   | 0,31                |
| CPI 15         | Onduleur 1        | 714,83                            | 714,02                                  | 0,11                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 713,24                                  | 0,22                |
| CPI 16         | Onduleur 1        | 714,83                            | 712,2                                   | 0,37                |
|                | Onduleur 2        | 714,83                            | 709,18                                  | 0,80                |
| TOTAL          |                   | 22184,36                          | 22134,55                                | -                   |
| ERREUR MOYENNE |                   |                                   |                                         | 0,23                |

Après simulation sur power factory, nous remarquons une différence de l'ordre de 0,23% entre les résultats réels obtenus grâce au SCADA et les résultats obtenus grâce au modèle. L'erreur minimum est observée à la sortie de l'onduleur 2 du CPI 7 (0,05%) et l'erreur maximum à la sortie de l'onduleur 2 du CPI 16 (0,80%).

De manière générale, les résultats réels sont également plus bas que les résultats du modèle pour les mêmes raisons énumérées précédemment.

### ➤ **Modèle simplifié**

#### **Analyse des résultats obtenus à 6h**

La puissance active totale fournie par le champ solaire au poste solaire est de 0,24 MW d'après le modèle avec une consommation interne de 20 kW. Au poste SONABEL, elle passe à 0,22 MW. Les pertes actives sur l'ensemble du réseau sont négligeables. Ce modèle fonctionnant sans transformateurs, les pertes sont donc réduites.

Sur le site, nous avons relevé au compteur du poste solaire une puissance instantanée de 0,22 MW à 6h et une puissance instantanée de 0,18 MW au poste SONABEL (**Annexe 10**: Calcul de flux de puissance du modèle simplifié à 6h).

**Tableau 11:** Comparaison des résultats du modèle simplifié à 6h

|                                    | Résultats du modèle (MW) | Résultat réels (MW) | Erreur relative (%) |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Production du champ solaire</b> | 0,24                     | 0,24                | -                   |
| <b>Production au poste solaire</b> | 0,22                     | 0,21                | 4,76                |
| <b>Production au poste SONABEL</b> | 0,22                     | 0,18                | 22,22               |

Avec le modèle détaillé, on renseigne directement la puissance en sortie du champ PV avec les données de production au champ de Zagtouli ; il n'y a pas d'erreur à ce niveau.

### **Analyse des résultats obtenus à 14h**

La puissance active totale fournie par le champ solaire au poste solaire est de 22,13 MW d'après le modèle. Au poste SONABEL, elle passe à 22,08 MW. Les pertes actives sur l'ensemble du réseau sont estimées à 30 KW. Ces pertes sont dues au trajet entre le champ solaire et le poste SONABEL.

En rappel, nous avons relevé au compteur du poste solaire une puissance instantanée de 21,86 MW à 14h et une puissance instantanée de 21,6 au poste de la SONABEL.

**Tableau 12:** Comparaison des résultats du modèle simplifié à 14h

|                                    | Résultats du modèle (MW) | Résultat réels (MW) | Erreur relative (%) |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Production du champ solaire</b> | 22,13                    | 22,13               | -                   |
| <b>Production au poste solaire</b> | 22,10                    | 21,86               | 1,09                |
| <b>Production au poste SONABEL</b> | 22,08                    | 21,6                | 2,22                |

Pour le calcul de flux de puissance à 14h, l'erreur est de 1,09% au poste solaire. On remarque que cette valeur est beaucoup plus élevée que celle du modèle détaillé à la même heure (0,23%).

### **b. Etude en régime quasi dynamique**

Pour déterminer les pires conditions d'exploitation, les ingénieurs doivent souvent exécuter plusieurs simulations de flux de puissance différentes avec diverses conditions d'exploitation. La simulation quasi dynamique complète une série de simulations de flux de puissances espacées dans le temps, en offrant la possibilité de sélectionner la période de simulation et la taille du pas de simulation. Pour ce faire, elle fait usage de caractéristiques de paramètres basées sur le temps.

#### **➤ Modèle détaillé**

Les paramètres de cette étude varient en fonction des heures de la journée, nous avons donc optée pour les caractéristiques temporelles. Pour le modèle détaillé, il s'agit de l'irradiance et de la température ambiante des systèmes photovoltaïques. Les données d'entrées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 13:**Données de caractéristiques des systèmes PV

| Heure | Irradiance (W/m <sup>2</sup> ) | Température ambiante (°C) |
|-------|--------------------------------|---------------------------|
| 0h    | 0,02                           | 32,14                     |
| 1h    | 0,06                           | 31,7                      |
| 2h    | 0,07                           | 30,55                     |
| 3h    | 0,01                           | 29,68                     |
| 4h    | 0,00                           | 28,79                     |
| 5h    | 0,00                           | 28,52                     |
| 6h    | 40,86                          | 26,80                     |
| 7h    | 234,42                         | 27,40                     |
| 8h    | 252,57                         | 27,70                     |
| 9h    | 600,12                         | 28,80                     |
| 10h   | 885,03                         | 30,50                     |
| 11h   | 900,17                         | 31,10                     |
| 12h   | 338,92                         | 32,50                     |
| 13h   | 290,51                         | 32,60                     |
| 14h   | 806,22                         | 33,60                     |
| 15h   | 604,16                         | 34,10                     |
| 16h   | 126,79                         | 33,80                     |
| 17h   | 161,90                         | 34,20                     |
| 18h   | 28,88                          | 33,30                     |
| 19h   | 0,00                           | 33,12                     |
| 20h   | 0,00                           | 31,75                     |
| 21h   | 0,00                           | 30,84                     |
| 22h   | 0,00                           | 30,02                     |
| 23h   | 0,00                           | 29,72                     |

Sur la figure ci-dessous, nous avons un aperçu du diagramme généré par le logiciel après création de la caractéristique de l'irradiance.

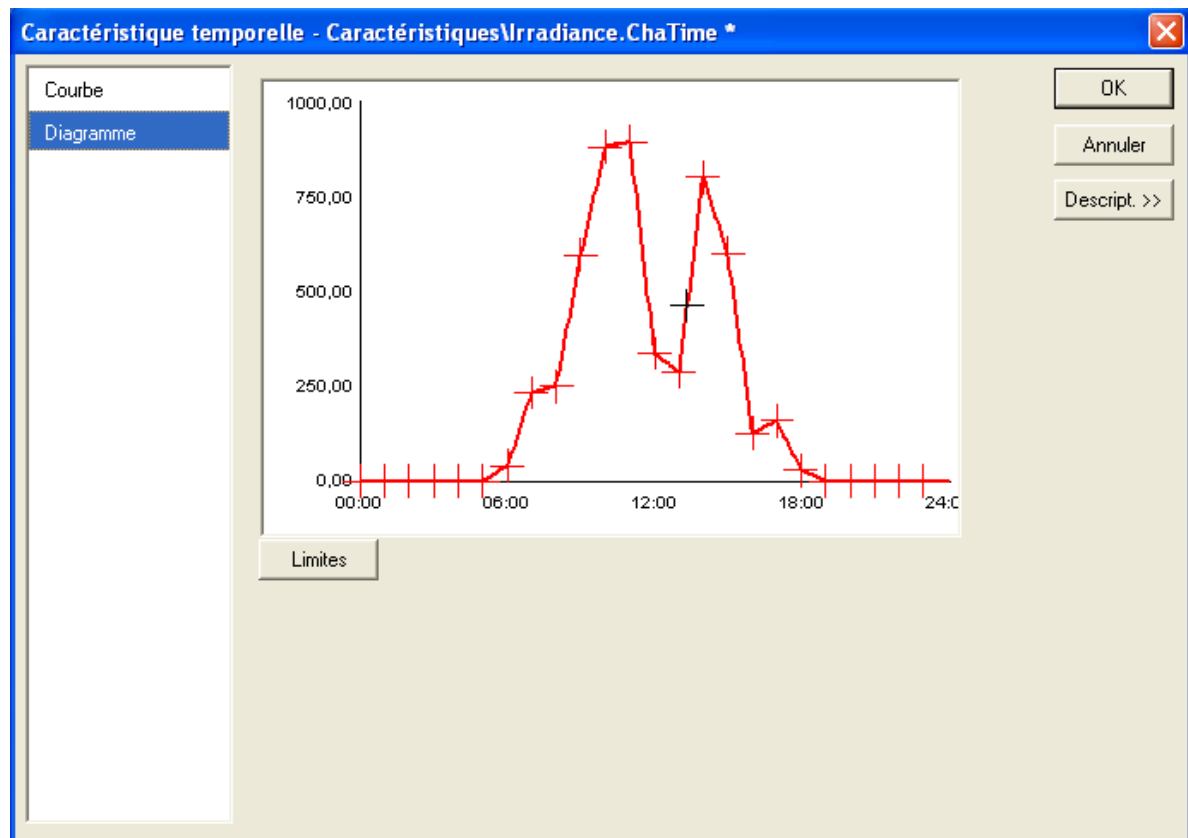


Figure 20:Diagramme de l'irradiance journalière

Les diagrammes ci-dessous ont été obtenus après la simulation quasi-dynamique.

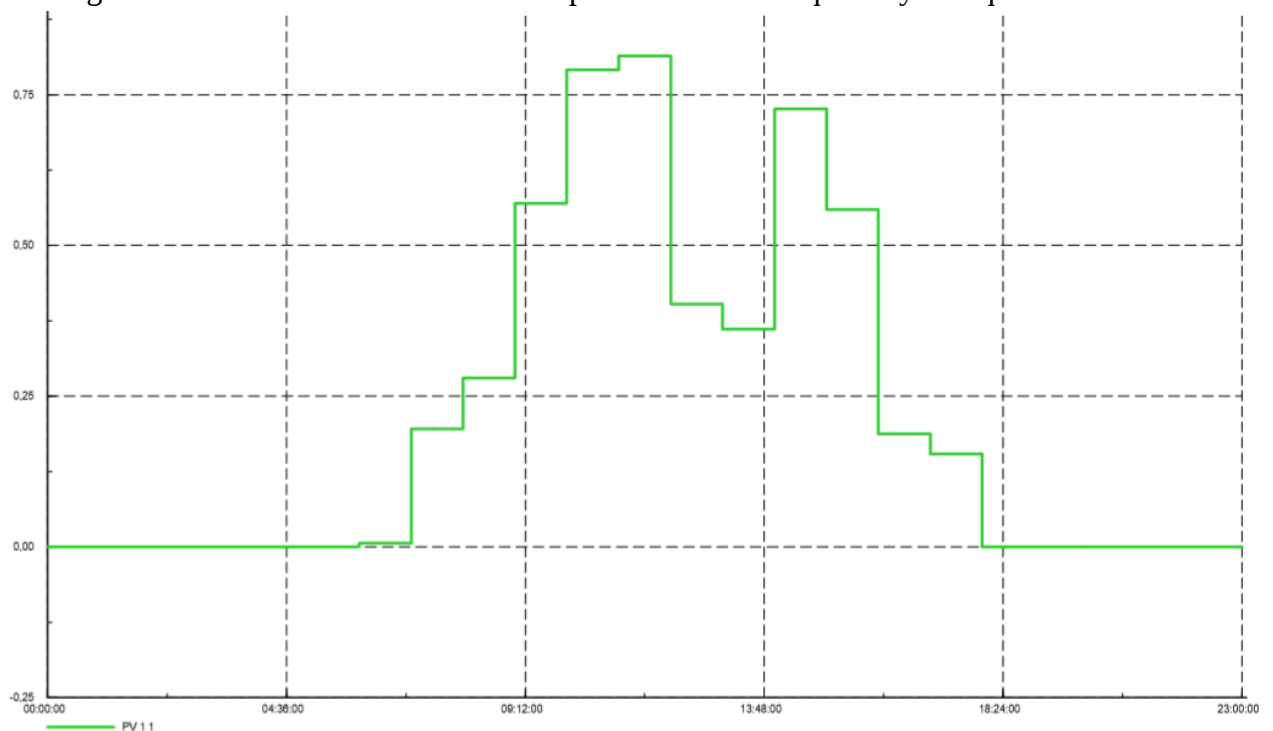
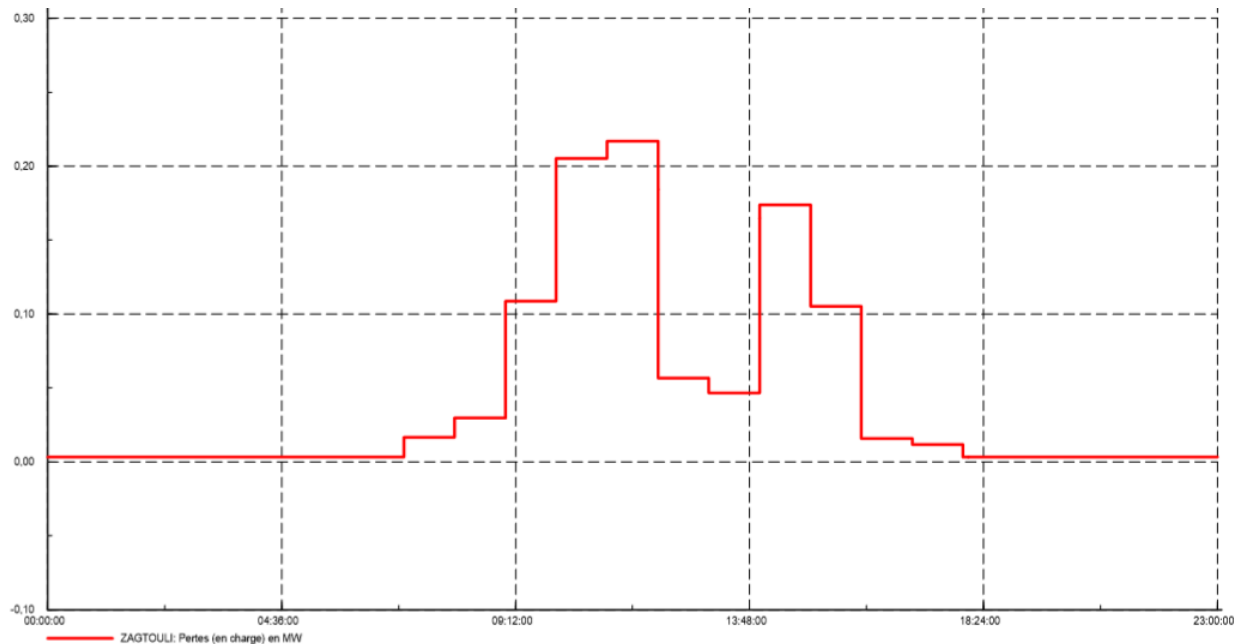


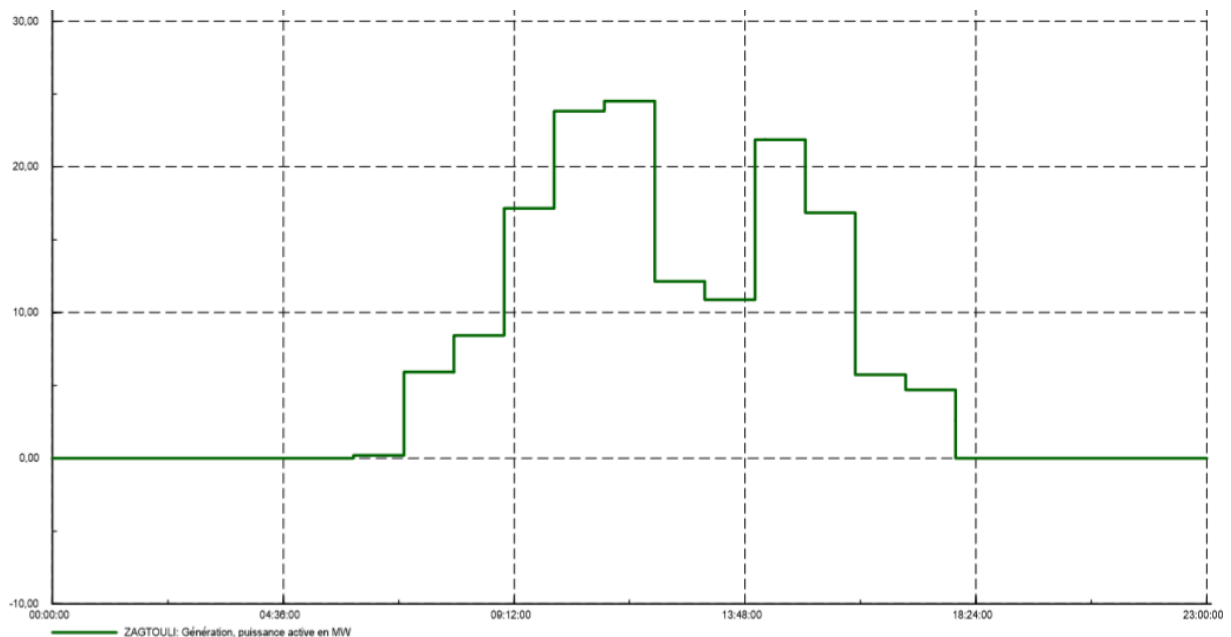
Figure 21:Diagramme de la production journalière du PV 1 1

La courbe ci-dessus représente la production journalière du système 1 1 (premier sous-champ). La production débute aux alentours de 6h et se termine à 18h. La crête est observée à 11h avec 785 kW.



**Figure 22:** Diagramme des pertes journalières

Sur le diagramme des pertes journalières, on peut constater que les pertes sont presque nulles à 6h et à 18h. La pointe est également obtenue à 11h. Il est donc évident que les pertes sont proportionnelles à la production.



**Figure 23:** Diagrammes de production journalière de la centrale

Ce diagramme atteint également sa pointe à 11h. De manière générale, toutes les courbes ont la même allure que celle de l'irradiance, ce qui prouve bien que la production d'énergie est proportionnelle à l'irradiance. La centrale commence à produire à partir de 6h avec une irradiance de  $40,86 \text{ W/m}^2$ . La production s'achève aux environs de 18h avec  $28,88 \text{ W/m}^2$ . La pointe est atteinte à 11h avec une puissance de 24,50 MW.

En analysant les données de l'irradiance, nous remarquons en effet que la pointe est obtenue à 11h avec  $900,17 \text{ W/m}^2$ . La chute de la production entre 11h et 14h s'explique par un passage nuageux. La chute observée au niveau des données de l'irradiance peut le confirmer.

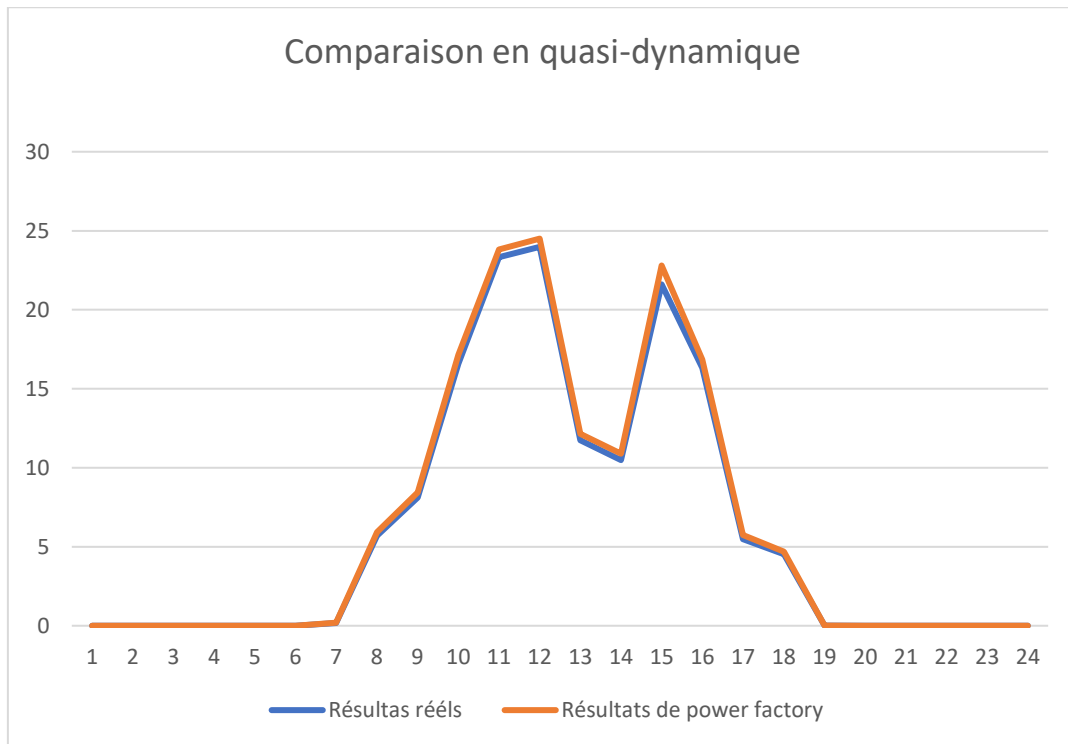
On remarque également que les pertes sont proportionnelles à la production.

Par la suite, les données de production obtenues grâce à la simulation quasi-dynamique ont été extraites afin d'être comparées aux résultats relevés sur le site au poste solaire. Nous utiliserons le logiciel Excel pour effectuer cette comparaison.

**Tableau 14:** Comparaison des résultats en quasi-dynamique (modèle détaillé)

| Heures                | Résultats réels (MW) | Résultats de power factory (MW) | Erreur relative (%) |
|-----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|
| 0h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 1h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 2h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 3h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 4h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 5h                    | 00                   | 00                              | -                   |
| 6h                    | 0,18                 | 0,19                            | 5,56                |
| 7h                    | 5,7                  | 5,92                            | 3,81                |
| 8h                    | 8,11                 | 8,44                            | 4,08                |
| 9h                    | 16,58                | 17,15                           | 3,42                |
| 10h                   | 23,32                | 23,82                           | 2,14                |
| 11h                   | 23,98                | 24,50                           | 2,18                |
| 12h                   | 11,75                | 12,14                           | 3,28                |
| 13h                   | 10,49                | 10,89                           | 3,79                |
| 14h                   | 21,6                 | 21,96                           | 3,44                |
| 15h                   | 16,31                | 16,84                           | 3,27                |
| 16h                   | 5,49                 | 5,74                            | 4,58                |
| 17h                   | 4,52                 | 4,70                            | 3,90                |
| 18h                   | 0,0044               | 0,0046                          | 4,54                |
| 19h                   | 00                   | 00                              | -                   |
| 20h                   | 00                   | 00                              | -                   |
| 21h                   | 00                   | 00                              | -                   |
| 22h                   | 00                   | 00                              | -                   |
| 23h                   | 00                   | 00                              | -                   |
| <b>ERREUR MOYENNE</b> |                      |                                 | <b>3,69</b>         |

Les différences sont plus visibles sur le digramme ci-dessous :



**Figure 24:** Comparaison entre les résultats réels et les résultats du modèle en quasi dynamique

Nous remarquons que la courbe « résultats de Power factory » est légèrement au-dessus de la courbe « résultats réels », tout en gardant la même allure de manière générale. La différence observée est faible, ce qui confirme que l'erreur est minime.

### ➤ **Modèle simplifié**

La seule caractéristique à définir pour ce modèle est celle de la puissance du champ solaire. Pour ce faire, nous avons effectué la somme des puissances recueillis au niveau de chaque CPI et cela heure par heure. Nous obtenons donc les courbes ci-dessous :

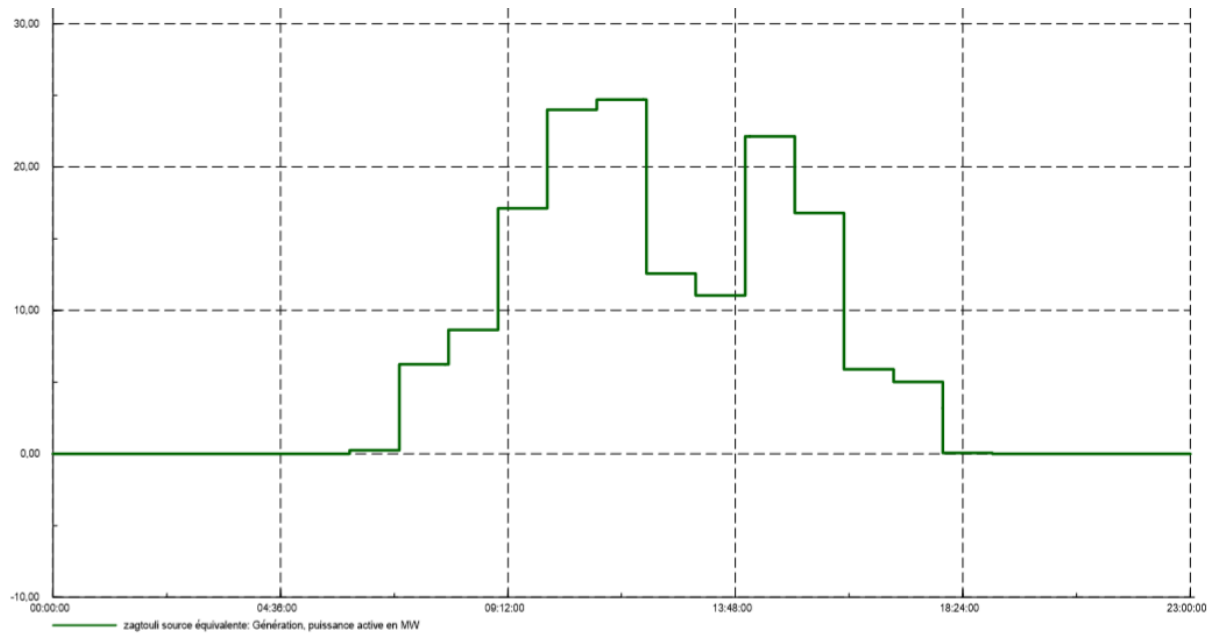


Figure 25: Diagramme de production journalier du modèle simplifié

Sur ce diagramme, la production débute à 6h avec 0,22 MW et prend fin aux alentours de 18h avec 0,0048 MW. Elle a la même allure que celle de l'irradiance journalière.

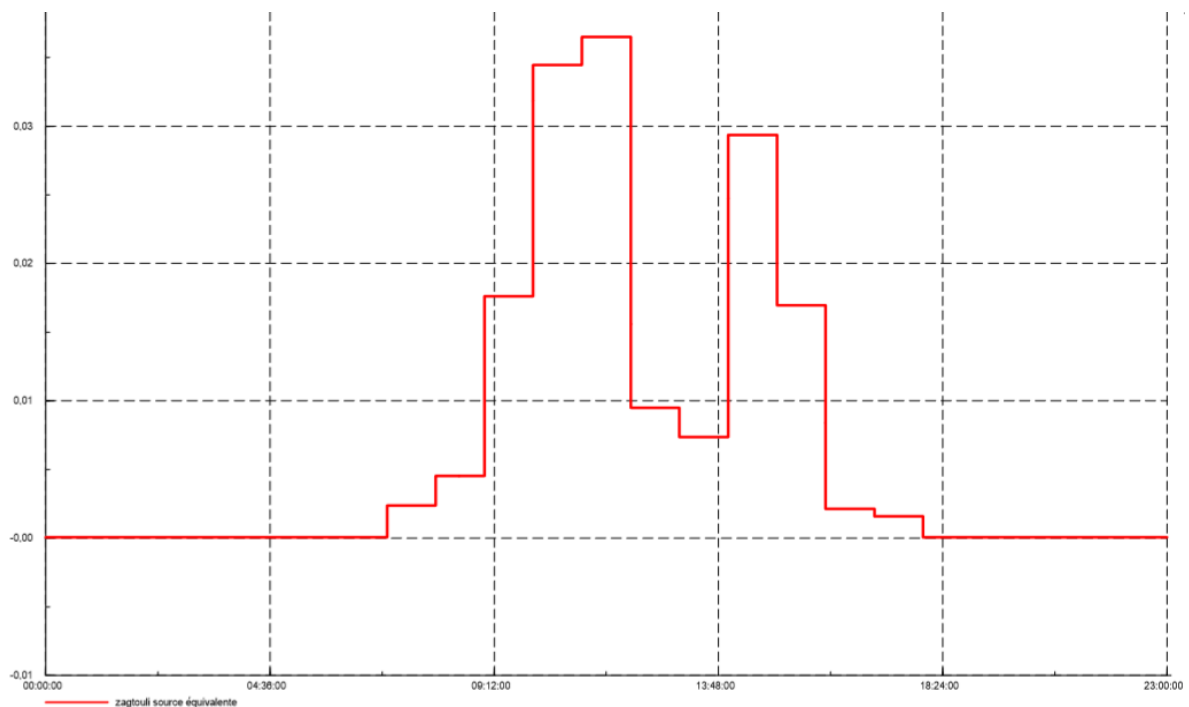


Figure 26: Diagramme des pertes journalières du modèle simplifié

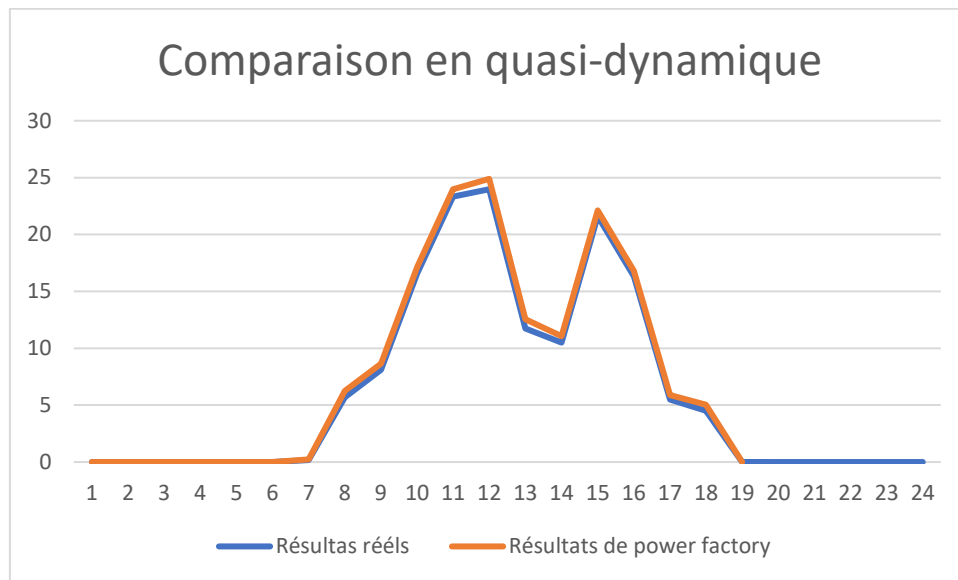
Les pertes calculées sont plus importantes lorsque la production est élevée.

De manière générale, les courbes des résultats de la simulation en quasi dynamique ont également la même allure que celle de l'irradiance. La centrale produit de l'énergie électrique entre 06h et 18h et la pointe est obtenue aux environs de 11h avec 24,89 MW.

Par la suite, nous avons extrait les données de production obtenus grâce à la simulation quasi-dynamique afin de les comparer aux résultats relevés sur le terrain au poste SONABEL.

**Tableau 15: Comparaison des résultats en quasi dynamique (modèle simplifié)**

| <b>Heures</b>         | <b>Résultats réels (MW)</b> | <b>Résultats de Power Factory (MW)</b> | <b>Erreur relative (%)</b> |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| 0h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 1h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 2h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 3h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 4h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 5h                    | 00                          | 00                                     | -                          |
| 6h                    | 0,18                        | 0,22                                   | 22,22                      |
| 7h                    | 5,7                         | 6,24                                   | 8,65                       |
| 8h                    | 8,11                        | 8,65                                   | 6,24                       |
| 9h                    | 16,58                       | 17,13                                  | 3,21                       |
| 10h                   | 23,32                       | 23,98                                  | 2,75                       |
| 11h                   | 23,98                       | 24,89                                  | 3,79                       |
| 12h                   | 11,75                       | 12,56                                  | 6,45                       |
| 13h                   | 10,49                       | 11,05                                  | 5,08                       |
| 14h                   | 21,6                        | 22,13                                  | 2,39                       |
| 15h                   | 16,31                       | 16,81                                  | 2,97                       |
| 16h                   | 5,49                        | 5,88                                   | 6,63                       |
| 17h                   | 4,52                        | 5,03                                   | 10,13                      |
| 18h                   | 0,0044                      | 0,0048                                 | 8,33                       |
| 19h                   | 00                          | 00                                     | -                          |
| 20h                   | 00                          | 00                                     | -                          |
| 21h                   | 00                          | 00                                     | -                          |
| 22h                   | 00                          | 00                                     | -                          |
| 23h                   | 00                          | 00                                     | -                          |
| <b>ERREUR MOYENNE</b> |                             |                                        | <b>6,84</b>                |



**Figure 27: Comparaison entre les résultats réels et les résultats du modèle en quasi dynamique**

Avec ce modèle, les erreurs sont plus importantes qu’avec le modèle détaillé. L’erreur la plus importante est observée à 6h (remarque observée aussi avec le modèle détaillé) avec 22%, ce qui peut s’expliquer par une absence de synchronisme entre production et relevés.

### **Conclusion :**

Etant donné la faible différence existante entre les données obtenues sur le site de Zagtouli et les données obtenues grâce au logiciel, en plus du respect des critères de stabilité, nous pouvons conclure que le modèle détaillé est valide.

Le modèle simplifié est également validé mais avec une certaine réserve due à la marge d’erreurs. Ces erreurs s’expliquent par la simplicité du modèle (absence de transformateurs, réduction du nombre de ligne), ce qui réduit considérablement les pertes.

## **V.2. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MODELE DETAILLE ET LE MODELE SIMPLIFIE**

### **a. Avantages et inconvénients de la modélisation détaillée**

L’avantage majeur de la modélisation détaillée est qu’elle est très précise et représente la centrale dans ses moindres détails. Elle donne la possibilité de réaliser d’autres études notamment l’étude de sélectivité, l’étude des harmoniques. Nous avons représenté les sous

champs, les onduleurs, les transformateurs, toutes les liaisons entre les éléments et même les boucles.

Avec le choix du calcul solaire, la puissance instantanée est calculée automatiquement en fonction de l'ensoleillement de la localité, de la puissance des modules, du nombre de modules, de la température, du rendement des onduleurs... Grace à tous ces détails, les résultats obtenus sont plus réalistes.

Cette méthode nécessite cependant beaucoup de temps de travail. Nous la recommandons donc lorsque l'étude porte sur les éléments de la centrale ou sur l'impact de certains éléments de la centrale sur le réseau.

### **b. Avantages et inconvénients de la modélisation simplifiée**

La modélisation par utilisation de source équivalente est assez simple comparée à la modélisation détaillée car toute la centrale est représentée par un seul système photovoltaïque. Elle ne prend donc pas beaucoup de temps à être réalisée.

En choisissant l'entrée de puissance active, nous n'avons à renseigner que peu de données (la puissance souhaitée, le facteur de puissance globale de la centrale).

Cette méthode procède un certain nombre d'inconvénients. Elle est moins précise car les erreurs sont plus importantes. Les pertes sont beaucoup plus réduites et se résument aux pertes des lignes.

Elle sera plutôt recommandée lorsque l'étude vise à déterminer l'impact de la centrale sur le réseau.

## **V.3. ETUDE DE SELECTIVITE DU MODELE DETAILLE**

La version de Power factory utilisée ne disposant pas de relais INGETEAM, en plus du fait qu'aucun relais générique ne correspondait, nous avons opté pour des relais Micom AREVA dont les fonctions étaient similaires à celles recherchées. Il a fallu néanmoins faire certains ajustements notamment avec les temps de déclenchement. Etant donné les difficultés rencontrées lors du réglage des relais de protection, l'étude de sélectivité serait d'une grande importance pour vérifier les choix réalisés.

Cette section présente donc les résultats du calcul des courants de courts-circuits biphasés et triphasés maximaux de la centrale selon la norme CEI 60 909. Ces calculs ont pour but de vérifier la sélectivité des dispositifs de protections de la centrale.

Les résultats présentés ci-dessous ne constituent qu'un échantillon des simulations effectuées pour vérifier la sélectivité, les autres n'ayant pas été ajoutés par soucis d'espaces et d'esthétiques. Les hypothèses concernant le réseau amont pour le calcul des courants de court-circuit sont basées sur les données fournies par la SONABEL.

Il s'agit de :

Puissance de court-circuit maximum : 372 MVA

Puissance de court-circuit minimum : 790 MVA

R/Xmax : 0,122

R/Xmin : 0,173

Z0/Z1max : 3,64

Z0/Z1min : 3,64

Comme le schéma unifilaire l'illustre bien, les relais de type PL70IT sont placés à la sortie des transformateurs des CPI afin d'assurer leur protection ; les relais PL300DD pour chaque demi boucle et le relais PL300IC pour la ligne principale.

### a. Court-circuit biphasé max

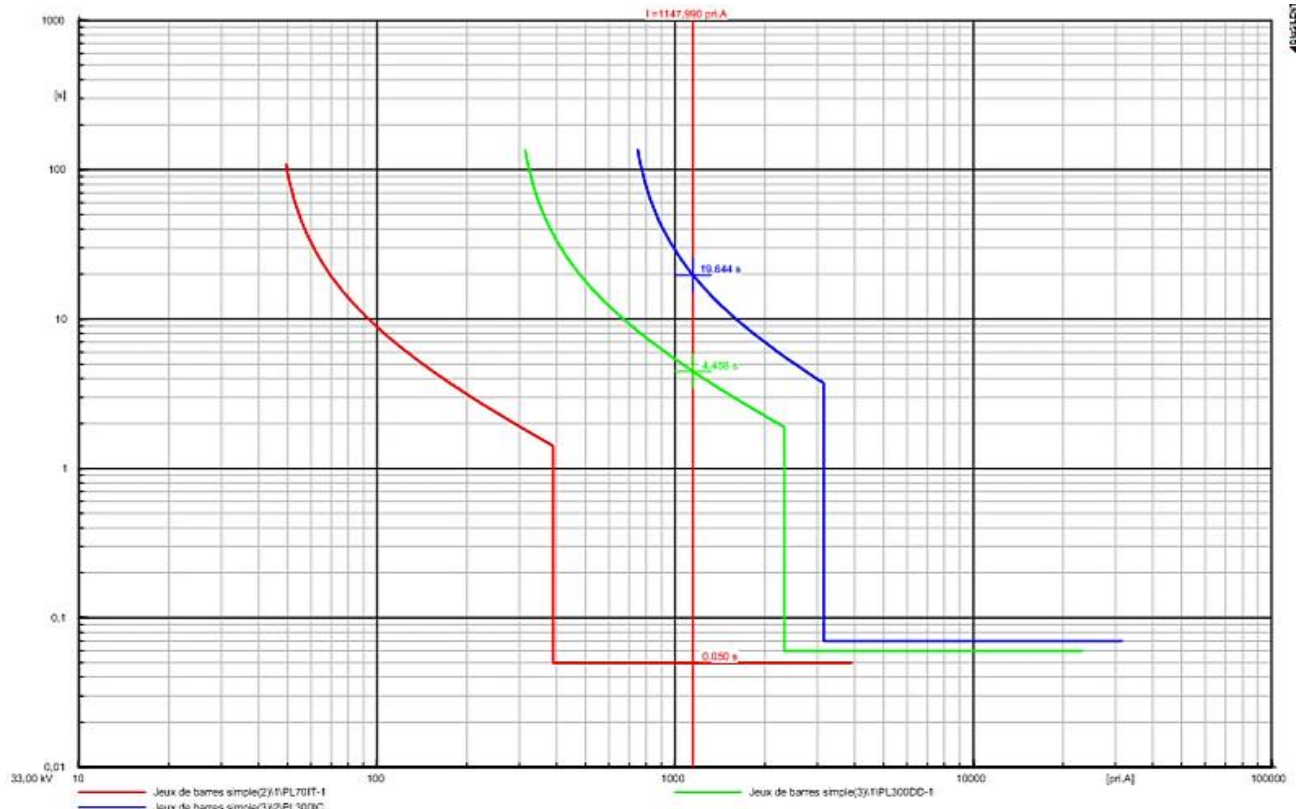
Le court-circuit biphasé a été simulé au jeu de barre 1, dans le CPI1 juste en dessous du transformateur 1.

Les résultats du calcul de court-circuit pour cette ligne sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 16: Résultats du court-circuit biphasé sur le JDB1**

|                   | Tension nominale (kV) | Localisation du court-circuit | I <sub>cc</sub> (kA) |
|-------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
| JDB 1             | 0,42                  |                               | 78,115               |
| JDB CPI 1         | 33                    |                               | 1,148                |
| JDB Poste solaire | 33                    |                               | 1,148                |
| JDB Poste SONABEL | 33                    |                               | 1,148                |

Le comportement des différents relais est plus facile à analyser grâce aux diagrammes de temps-surintensité ci-dessous :



**Figure 28: Digrammes temps-surintensité du court-circuit biphasé sur le JDB 1**

On peut distinguer en rouge le diagramme temps-surintensité du relais PL70IT-1 (relais de protection du transformateur 1), en vert celui du relais PL300DD-1 (protection de la première demi-boucle) et en bleu celui du relais PL300IC (Protection de la ligne principale).

Avec un courant de court-circuit de 1,14 kA, le relais PL70IT-1 déclenche au bout de 0,05s. Le relais PL300DD-1 devrait déclencher en 4,45s si le défaut n'a pas encore été éliminé par le premier relais. Quant au relais PL300IC de la ligne principale, il déclencherait au bout de 19,64s. On peut donc conclure qu'il y a sélectivité dans ce cas.

**b. Court-circuit triphasé max**

➤ **Première simulation**

Le premier court-circuit triphasé a également été simulé juste en dessous du transformateur 1.

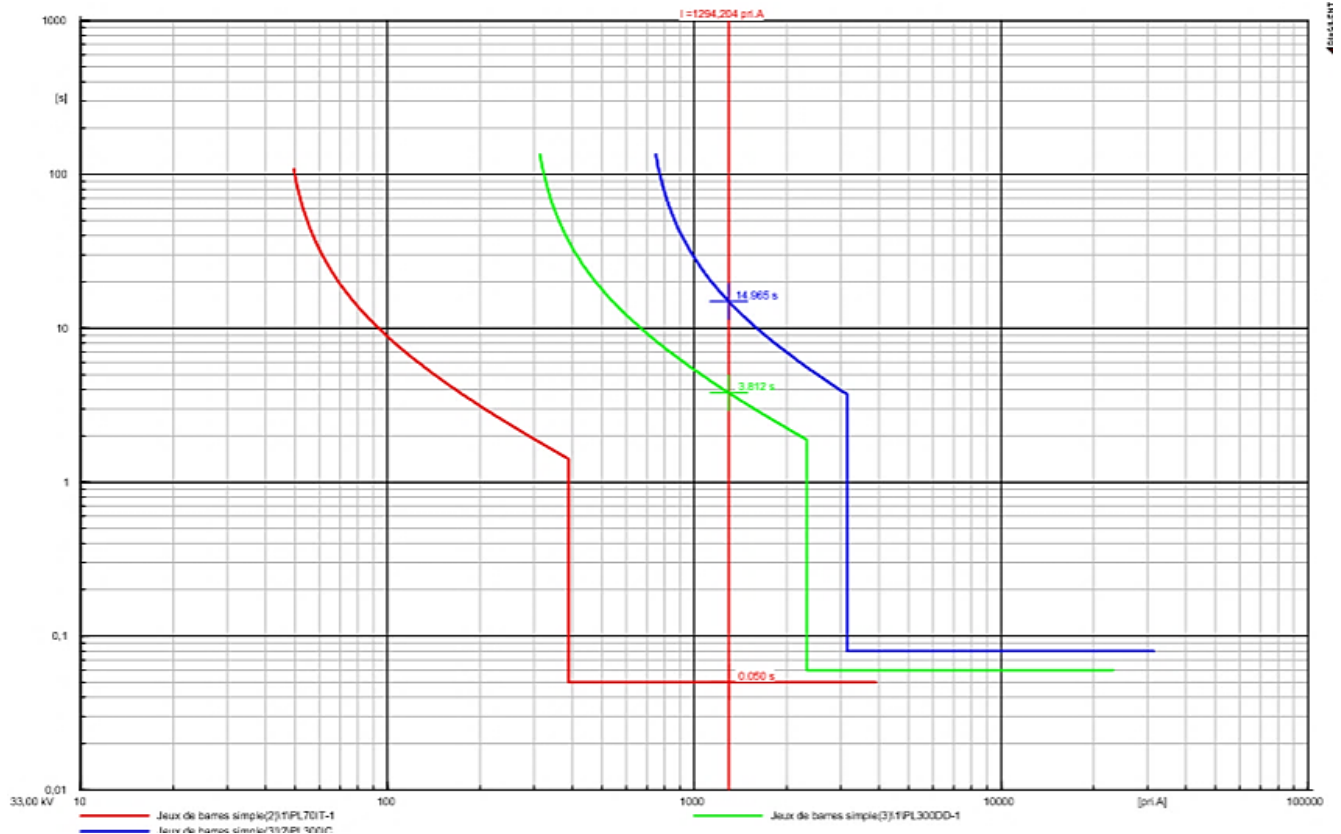
**Tableau 17:** Résultats du court-circuit triphasé sur le JDB1

|                              | Tension nominale<br>(kV) | Localisation du<br>court-circuit | I <sub>cc</sub> (kA) |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------|
| <b>JDB 1</b>                 | 0,42                     |                                  | 101,69               |
| <b>JDB CPI 1</b>             | 33                       |                                  | 1,29                 |
| <b>JDB Poste solaire</b>     | 33                       |                                  | 1,29                 |
| <b>JDB Poste<br/>SONABEL</b> | 33                       |                                  | 1,29                 |

Le courant de court-circuit calculé est de 101,61 KA, puis il passe à 1,29 kA après le poste de transformation. Avant le transformateur, la tension à la sortie de l'onduleur est de 420 V (BT), l'intensité est donc élevée d'où un courant de court-circuit élevé.

A la sortie du transformateur, la tension est fixée à 33 kV (HT), l'intensité est considérablement réduite, par conséquent le courant de court-circuit transitant chute.

Les courbes ci-dessous décrivent le comportement des différents relais.



**Figure 29: Digrammes temps-surintensité du court-circuit triphasé sur le JDB 1**

Avec un courant de court-circuit de 1,294 kA, le relais PL70IT-1 déclenche au bout de 0,05 s. Le relais PL300DD-1 devrait déclencher en 3,81 s et le relais PL300IC de la ligne principale au bout de 14,96 s. Au peut donc conclure qu'il y'a sélectivité dans ce cas.

## ➤ Deuxième simulation

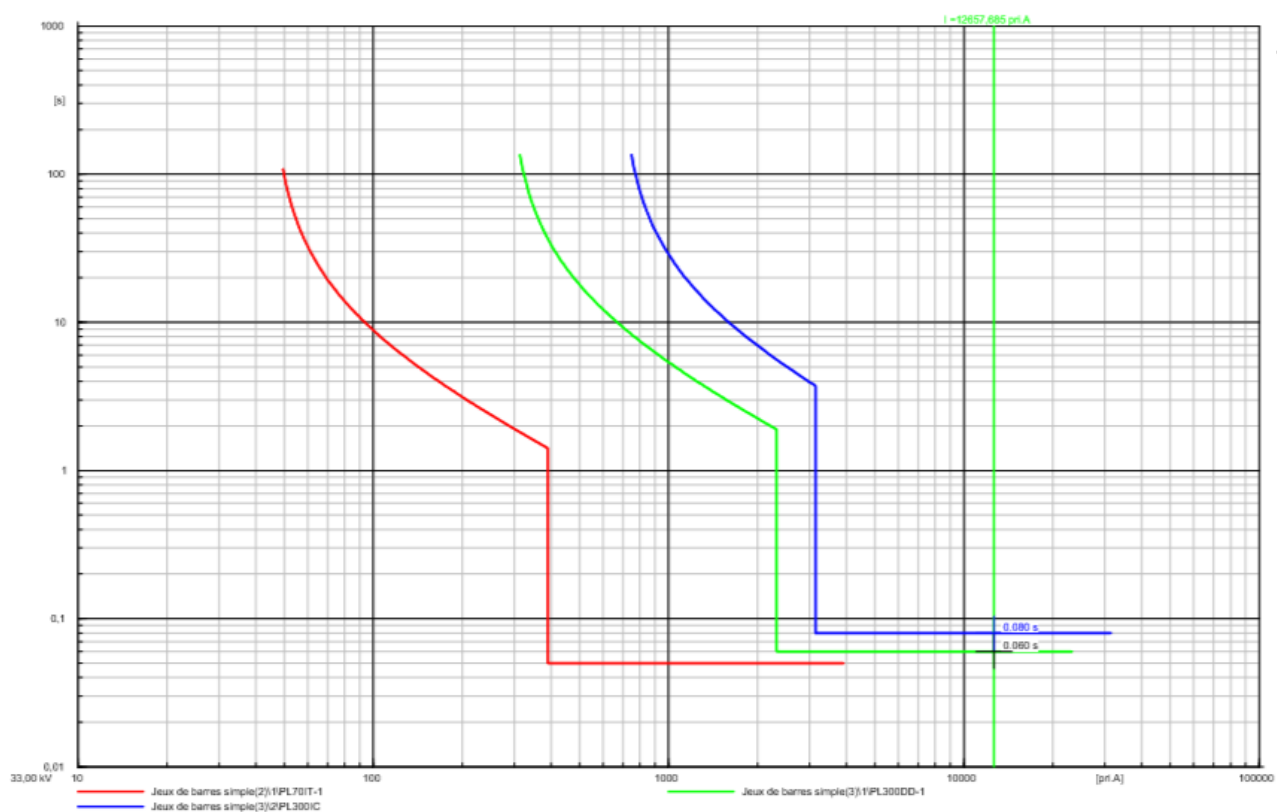
Le deuxième calcul de court-circuit triphasé a été réalisé à mi-chemin sur la ligne CPI 1-Poste solaire. Cette localisation a été choisi de manière stratégique afin d'observer le comportement des relais situés de part et d'autre du défaut. Il devrait entrainer le déclenchement du relais PL300DD-1.

Les résultats du calcul de court-circuit triphasé sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 18:** Résultats du court-circuit triphasé sur la ligne CPI1-Poste solaire

|                                  | Tension nominale (kV) | Localisation du court-circuit | Icc (kA) |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------|
| <b>JDB 1</b>                     | 0,42                  |                               | 0,00     |
| <b>JDB CPI 1</b>                 | 33                    |                               | 0,00     |
| <b>Ligne CPI 1-Poste solaire</b> | 33                    |                               | 12,66    |
| <b>JDB Poste solaire</b>         | 33                    |                               | 12,66    |
| <b>JDB Poste SONABEL</b>         | 33                    |                               | 12,66    |

Comme le montre la figure ci-dessous, le relais PL300DD-1 déclenche en 0,06 s suivit du PL300IC en 0,08 s. Le relais PL70IT-1 du transformateur 1 ne détecte pas ce court-circuit, ce qui est normal.


**Figure 30:** Digrammes temps-surintensité du court-circuit triphasé sur la ligne CPI1-Poste solaire

**Conclusion :**

Les différents résultats obtenus grâce à cette étude nous ont fait remarquer que le courant de court-circuit triphasé est beaucoup plus important que le courant de court-circuit biphasé, ce qui avait déjà été mentionné dans la synthèse bibliographique.

Les calculs de court-circuit ont permis de prouver qu'un défaut simulé sur une partie de la centrale entraîne le déclenchement du dispositif de protection immédiatement situé au-dessus de ce défaut. On peut donc conclure qu'il y'a sélectivité et que les protections ont été bien réglées.

#### **V.4. VERIFICATION DE LA TENUE THERMIQUE ET ELECTRODYNAMIQUE DES JDB**

Afin de vérifier la tenue thermique et électromagnétique des jeux de barres des cellules, un calcul de courants de court-circuit triphasés maximaux selon la norme CEI 909 sur tous les jeux de barre de la centrale a été simulé.

Les résultats du calcul de court-circuit sont résumés dans le tableau 19.

**Tableau 19: courants de court-circuit triphasé des JDB**

| JDB               | V (kV) | I <sub>cc</sub> (kA) | I <sub>p</sub> (kA) | I <sub>th</sub> (kA) |
|-------------------|--------|----------------------|---------------------|----------------------|
| JDB CPI 1         | 33     | 12,17                | 27,30               | 12,28                |
| JDB CPI 2         | 33     | 11,68                | 25,71               | 11,76                |
| JDB CPI 3         | 33     | 11,21                | 24,27               | 11,30                |
| JDB CPI 4         | 33     | 10,87                | 23,24               | 10,95                |
| JDB CPI 5         | 33     | 12,62                | 28,83               | 12,75                |
| JDB CPI 6         | 33     | 12,10                | 27,06               | 12,21                |
| JDB CPI 7         | 33     | 11,74                | 25,91               | 11,84                |
| JDB CPI 8         | 33     | 11,28                | 24,47               | 11,37                |
| JDB CPI 9         | 33     | 10,68                | 22,67               | 10,76                |
| JDB CPI 10        | 33     | 10,31                | 21,61               | 10,38                |
| JDB CPI 11        | 33     | 10,87                | 23,24               | 10,96                |
| JDB CPI 12        | 33     | 11,93                | 26,53               | 12,04                |
| JDB CPI 13        | 33     | 11,52                | 25,21               | 11,61                |
| JDB CPI 14        | 33     | 11,08                | 23,55               | 11,16                |
| JDB CPI 15        | 33     | 11,08                | 23,55               | 11,16                |
| JDB CPI 16        | 33     | 10,66                | 22,61               | 10,74                |
| JDB Poste solaire | 33     | 13,18                | 30,83               | 13,34                |
| JDB Poste SONABEL | 33     | 13,82                | 33,22               | 14,01                |

Dans ce tableau :

Icc est le courant de court-circuit permanent. Sa valeur permet de choisir le réglage des seuils des protections à maximum de courant et les fusibles.

Ith est le courant de courte durée admissible. Il correspond à un courant de court-circuit à proximité immédiate des bornes avalées de l'appareil de coupure. Il est défini en kA pour 1 seconde et sert à définir la tenue thermique que doivent supporter les jeux de barres.

Ip est appelé valeur crête du courant de court-circuit maximal. Elle détermine le pouvoir de coupure et de fermeture des disjoncteurs et interrupteurs, et la tenue électrodynamique des jeux de barres.

En résumé, la tenue thermique est vérifiée si  $I_{th \text{ cellule}} > I_{th \text{ calculé}}$  et la tenue électrodynamique est vérifiée si  $I_p \text{ cellule} > I_p \text{ calculé}$ .

- Les jeux de barres JDB CPI 1 à JDB CPI16 se trouvent à l'intérieur des CPI. Ils sont donc des éléments des cellules siemens dont les caractéristiques ont été mentionnées plus haut (données techniques de la centrale). Pour ces cellules siemens,  $I_{th}=20 \text{ kA}$  et  $I_p= 50 \text{ kA}$  (**Annexe 15**: Fiche technique des cellules Siemens).

On remarque dans le tableau que les valeurs de  $I_{th}$  n'excèdent pas 14 kA et que celles de  $I_p$  n'excèdent pas 29 kA. La tenue thermique et électrodynamique est donc vérifiée.

- Les jeux de barres JDB Poste solaire et JDB Poste SONABEL se trouvent dans des cellules ORMAZABAL. Pour ces cellules,  $I_{th}=25 \text{ kA}$  et  $I_p= 52 \text{ kA}$  (**Annexe 16**: Fiche technique des cellules Omazabal).

On remarque dans le tableau que les valeurs de  $I_{th}$  n'excèdent pas 14 kA et que celles de  $I_p$  n'excèdent pas 34 kA. La tenue thermique et électrodynamique est donc vérifiée.

### **Conclusion :**

Le court-circuit réalisé sur tous les jeux de barres a mis en évidence le fait que les jeux de barres de la centrale ont été bien dimensionnés. En effet, les valeurs des courants de courte durée admissible et valeurs crêtes sont toutes inférieures à celles des cellules. Il n'y a donc pas de risques d'accidents à ces niveaux en cas de surintensité.

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude a permis la réalisation d'un modèle détaillé et d'un modèle simplifié de la centrale sur le logiciel power factory grâce aux données collectées sur la centrale.

Les calculs de flux de puissances réalisés avec chacun des deux modèles ont permis de comparer les puissances théoriques produites avec les puissances réelles relevées sur le site de la centrale. Nous avons pu constater que le modèle détaillé est beaucoup plus fiable avec une erreur relative moyenne de 3,69% tandis que celle du modèle simplifié est d'environ 6,83%. Il en ressort que :

- Le modèle détaillé est beaucoup plus précis et réaliste que le modèle simplifié ;
- Avec ce type de modélisation, d'autres études peuvent être réalisées notamment l'étude de sélectivité (car les protections peuvent être intégrées au modèle), l'étude harmonique ;
- Le modèle simplifié nécessite moins d'informations pour son fonctionnement.

Nous recommandons donc la modélisation détaillée lorsque l'étude porte sur les éléments de la centrale, elle s'avère même incontournable. En effet, la modélisation détaillée est nécessaire lorsqu'on désire par exemple estimer les pertes induites par les transformateurs, les harmoniques induits par les onduleurs, observer le comportement des dispositifs de protection en cas de problème sur le réseau ou connaître le niveau maximum de chute de tension pouvant occasionner la déconnection des onduleurs. Le modèle simplifié quant à lui peut permettre d'estimer le taux de pénétration d'énergie de la centrale de zagtoui sur le réseau à un moment donné en donnant une idée globale des pertes.

Compte tenu des résultats obtenus lors des calculs de flux de puissances, nous pouvons dire qu'on est parvenu à concevoir un modèle réaliste de la centrale de Zagtouli.

Par la suite, la série de courts-circuits réalisée a permis de vérifier la sélectivité des dispositifs de protection et la tenue thermique et électrodynamique des jeux de barres.

En dépit du fait que les relais réagissent aux défauts de manière chronologique, nous avons remarqué que les diagrammes temps-surintensité des relais PL300DD et PL300IC étaient assez proches. En cas de défaut triphasé, seulement 20 ms les séparent alors que le disjoncteur pourrait prendre quelques millisecondes avant d'exécuter l'ordre. Il serait donc plus judicieux de pousser l'étude dans ce sens et de reparamétrer ces relais en cas de problème.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **Ouvrages**

- Benoit de METZ-NOBLAT, F. D. (2005). Cahier technique n 158: calcul des courants de court-circuit.
- Gerin, M. (2016). Code ANSI.
- GmbH, D. (Octobre 2014). Power factory 15, Manuel d'utilisation.
- LAZAR, B. (2017). Protection des réseaux électriques .
- OUEDRAOGO, P. (2013). Structure des réseaux électriques.
- SANKARA, H. (Novembre 2015). Impact de l'intégration de l'énergie photovoltaïque sur les réseaux électriques.
- Stuart WENHAM, M. G. (2013). Applied photovoltaics.
- VANDAMME, D. (2016). Rapport d'étude sur le raccordement du parc SCATEC SOLAR 19,6 MW.
- Violaine DIDIER, B. G. (Août 2007). Les onduleurs pour système photovoltaïques.

### **Sites internet**

- COLLET, P. (s.d.). les émissions de CO2 du secteur de l'énergie ont augmenté de 1,7% en 2018. Récupéré sur Actu Environnement.com:  
<https://www.google.com/amp/s/m.actu-environnement.com/amp/actualites/hausse-emissions-co2-energie-chiffres-aie-2018-33158.html>
- SONABEL. (s.d.). Présentation. Récupéré sur Sonabel.bf:  
<http://www.sonabel.bf/index.php/nousconnaitre/presentation/167-la-sonabel/organigramme>

## ANNEXES

|                                                                                       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Annexe 1:</b> Fiche technique du module .....                                      | iii   |
| <b>Annexe 2:</b> Fiche technique de l'onduleur .....                                  | iv    |
| <b>Annexe 3:</b> Fiche technique du transformateur .....                              | v     |
| <b>Annexe 4:</b> Caractéristiques des câbles.....                                     | vi    |
| <b>Annexe 5:</b> Fiche de relevés des postes .....                                    | viii  |
| <b>Annexe 6:</b> Calcul de flux de puissance (modèle détaillée 6h).....               | ix    |
| <b>Annexe 7:</b> Rapport du calcul de flux de puissance (modèle détaillé 6h) .....    | x     |
| <b>Annexe 8:</b> Calcul de flux de puissance (modèle détaillée 14h).....              | xi    |
| <b>Annexe 9:</b> Rapport du calcul de flux de puissance (modèle détaillé 14h) .....   | xii   |
| <b>Annexe 10:</b> Calcul de flux de puissance du modèle simplifié à 6h .....          | xiii  |
| <b>Annexe 11:</b> Rapport du calcul de flux de puissance (modèle simplifié 6h) .....  | xiv   |
| <b>Annexe 12:</b> Calcul de flux de puissance du modèle simplifié à 14h .....         | xv    |
| <b>Annexe 13:</b> Rapport du calcul de flux de puissance (modèle simplifié 14h) ..... | xvi   |
| <b>Annexe 14 :</b> Fonctions du code ANSI .....                                       | xvii  |
| <b>Annexe 15:</b> Fiche technique des cellules Siemens .....                          | xviii |
| <b>Annexe 16:</b> Fiche technique des cellules Omazabal.....                          | xix   |

# Annexe 1: Fiche technique du module

## Sunmodule<sup>+</sup> Plus SW 250 - 260 poly



COMPORTEMENT LORS DE CONDITIONS DE TEST STANDARD (STC\*)

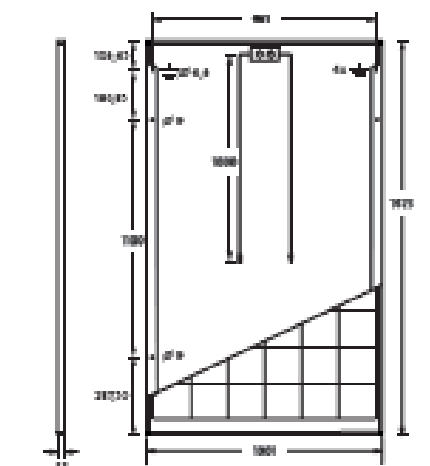
|                                          |           | SW 250  | SW 255  | SW 260  |
|------------------------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| Puissance au point de puissance maximale | $P_{max}$ | 250 Wc  | 255 Wc  | 260 Wc  |
| Tension à vide                           | $U_{oc}$  | 37,6 V  | 38,0 V  | 38,8 V  |
| Tension au point de puissance maximale   | $U_{mp}$  | 30,5 V  | 30,9 V  | 31,6 V  |
| Courant de court-circuit                 | $I_{sc}$  | 8,80 A  | 8,89 A  | 8,94 A  |
| Courant au point de puissance maximale   | $I_{mp}$  | 8,27 A  | 8,32 A  | 8,37 A  |
| Rendement du module                      | $\eta_m$  | 16,91 % | 15,21 % | 15,51 % |

Tolérance sur la mesure de puissance ( $P_{max}$ ) attribuée par TÜV Rheinland : +/- 3 % (TUV Power controlled) \*STC : 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5

COMPORTEMENT A 800 W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM 1.5

|                                          |           | SW 250   | SW 255   | SW 260   |
|------------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| Puissance au point de puissance maximale | $P_{max}$ | 165,6 Wc | 169,7 Wc | 169,6 Wc |
| Tension à vide                           | $U_{oc}$  | 38,2 V   | 38,5 V   | 38,8 V   |
| Tension au point de puissance maximale   | $U_{mp}$  | 30,6 V   | 30,7 V   | 30,5 V   |
| Courant de court-circuit                 | $I_{sc}$  | 7,36 A   | 7,39 A   | 7,55 A   |
| Courant au point de puissance maximale   | $I_{mp}$  | 6,66 A   | 6,73 A   | 6,76 A   |

Faible réduction du rendement en conditions de charge partielle à 25 °C : à 300 W/m<sup>2</sup>, la puissance est égale à 100 % (+/- 2 %) de la puissance en condition STC.



### MATERIAUX UTILISES

|                              |                                     |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Cellules par panneau solaire | 60                                  |
| Type de cellules             | polycristallin                      |
| Dimensions des cellules      | 154 mm x 156 mm                     |
| Face avant                   | verre de sécurité trempé (EN 12783) |
| Face arrière                 | film blanc                          |
| Encadrement                  | aluminium argent anodisé            |
| Boîte de jonction            | IP65                                |
| Connecteur                   | MC4                                 |

### DIMENSIONS

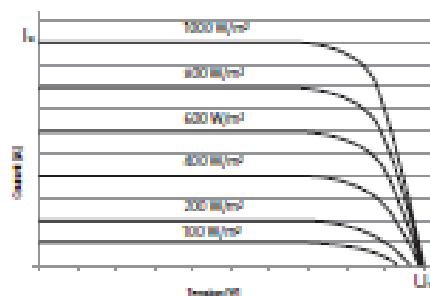
|           |         |
|-----------|---------|
| Longueur  | 1675 mm |
| Largeur   | 1000 mm |
| Epaisseur | 31 mm   |
| Poids     | 16,5 kg |

### CARACTERISTIQUES THERMIQUES

|                     |            |
|---------------------|------------|
| NOCT °C             | 46 °C      |
| TK L                | 0,051 W/K  |
| TK U <sub>oc</sub>  | -0,018 W/K |
| TK P <sub>max</sub> | -0,451 W/K |

### CARACTERISTIQUES POUR UNE INTEGRATION OPTIMALE

|                                       |                             |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Classification de puissance           | -0 Wc / +5 Wc               |
| Tension de système maximale classe II | 1000 V                      |
| Valeur n. limite de courant inverse   | 25 A                        |
| Antagonisme dynamique                 | 5,4 / 7,4 kN/m <sup>2</sup> |
| Nombre de diodes typiques             | 3                           |
| Température d'exploitation admissible | -40 °C à +85 °C             |



SolarWorld AG se réserve le droit de modifier des spécifications.  
Cette fiche technique correspond aux mentions de la norme EN 50363. Cette fiche technique est également disponible en anglais.



SOLARWORLD 2015-07-10 FR

## Annexe 2: Fiche technique de l'onduleur

| <div> <div>INGECON</div> <div>SUN</div> </div> <div>PowerMax Série B 420 Vac</div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1165TL B420                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Valeurs d'Entrée (DC)                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Plage puis. clamp PV recommandée <sup>®</sup>                                      | 1.179,3 - 1.513,2 kWp                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Plage de tension MPP                                                               | 610 - 820 V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Tension maximale <sup>®</sup>                                                      | 1.050 V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Courant maximal                                                                    | 2.000 A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| N° entrées avec porte fusibles                                                     | 15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Dimensions fusibles                                                                | Fusibles de 63 A / 1.000 V à 630 A / 1.000 V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Type de connexion                                                                  | Connexion aux bornes de cuivre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| États de puissance                                                                 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| MPP1                                                                               | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Courant maximal à chaque entrée                                                    | Pour courant max. de 40 à 410 A, sur les pôles positif et négatif                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Protections d'entrée                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Protections de surtension                                                          | Parafoudres type 1-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Interrupteur DC                                                                    | Interrupteur sectionneur d'ouverture en charge DC motorisé                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Autres protections                                                                 | Polarisation inverse, surveillance d'échauffement, protection anti-îlotage                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Valeurs de Sortie (AC)                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Puissance @35 °C / @50 °C <sup>®</sup>                                             | 1.163,9 kVA / 1.071 kVA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Courant @35 °C / @50 °C                                                            | 1.600 A / 1.472 A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tension nominale                                                                   | 420 V Système IT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Fréquence nominale                                                                 | 50 / 60 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Cosinus Phi <sup>®</sup>                                                           | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Cosinus Phi réglable                                                               | Oui. Sinus - 1.163,9 kVA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| THD (Taux de Distorsion Harmonique Totale) <sup>®</sup>                            | <3%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Protections de Sortie                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Protections de surtension                                                          | Parafoudres type 1-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Déjoncteur AC                                                                      | Optionnel disjoncteur magnétothermique AC avec commande sur la porte, déclenchement à distance ou motorisé                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Protection anti-îlotage                                                            | Oui, avec déconnexion automatique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Autres protections                                                                 | Courts circuits et surcharges AC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Prestations                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Rendement maximal                                                                  | 99%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Rendement Euro                                                                     | 98,7%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Consommation énergie stand by <sup>®</sup>                                         | 50 W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Consommation nocturne                                                              | 50 W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Données Générales                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Température de fonctionnement                                                      | -20 °C à +65 °C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Humidité relative (sans condensation)                                              | 0 - 95%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Degré de protection                                                                | IP54                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Altitude maximale <sup>®</sup>                                                     | 3.000 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Système de refroidissement                                                         | Ventilation forcée avec contrôle thermique (alimentation 230 V phase + neutre)                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Débit d'air                                                                        | 7.200 m³/h (consommation : 2.500 W)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Émission acoustique                                                                | <70 dB (A) à 1 m.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Certification                                                                      | CE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Normes CEM et normes de sécurité                                                   | EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12, EN 62109-1, EN 62109-2, IEC 62103, EN 50178, FCC Part 15, AS3100                                                                                                                                                                                                                                          |
| Normes de connexion au réseau                                                      | IEC 62116, Arrêté 23-04-2008, CEI 0-36 Ed. III, Norme A58, C562, BDEW-Mittelspannungsrichtlinie 2001, P.D.12.3, South African Grid code (ver 2.6), Chilean Grid Code, Ecuadorian Grid Code, Peruvian Grid code, Thailand PEA requirements, IEC61722, UNE 206007-1, ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, IEEE 1547, IEEE1547.1, GCC&CCG China, DEWA (Dubai) Grid code, Jordan Grid Code |

### Annexe 3: Fiche technique du transformateur

| TRANSFORMER TECHNICAL DESCRIPTION                              |                                                                                    | Ingeteam |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|
|                                                                |                                                                                    |          |
| 1. TRANSFORMER DESCRIPTION                                     |                                                                                    |          |
| 1.1 General features                                           |                                                                                    |          |
| Standard compliance                                            | IEC60076                                                                           |          |
| Transformer type                                               | Completely filled                                                                  |          |
| Rated Power                                                    | 2330kVA                                                                            |          |
| Rated frequency                                                | 50 Hz                                                                              |          |
| Cooling:                                                       | ONAN                                                                               |          |
| Rated primary Voltage:                                         | 33kV                                                                               |          |
| Rated secondary Voltage:                                       | 0.42kV                                                                             |          |
| Windings connection:                                           | Dyn11                                                                              |          |
| Short circuit impedance Ucc 1-2:                               | 8% (tolerance -15%..0%)                                                            |          |
| Short circuit impedance Ucc 1-3:                               | NA                                                                                 |          |
| Short circuit impedance Ucc 2-3:                               | NA                                                                                 |          |
| Insulation Class, primary winding                              | 36                                                                                 |          |
| Short time withstand voltage:                                  | 70kV                                                                               |          |
| Impulse withstand voltage:                                     | 170kV                                                                              |          |
| Insulation class, secondary winding                            | 1.1kV                                                                              |          |
| No load current:                                               | <1%                                                                                |          |
| Working cycle duration:                                        | As per spec                                                                        |          |
| Working cycle repetition:                                      | Continuous                                                                         |          |
| Winding material:                                              | Aluminium                                                                          |          |
| Taps:                                                          | +/-2x2.5%                                                                          |          |
| Total harmonic distortion:                                     | <3%                                                                                |          |
| Maximum inrush current peak:                                   | <12*In                                                                             |          |
| 1.2 Power Losses                                               |                                                                                    |          |
| Maximum NO Load Losses (EU548/2014):                           | 1895 W                                                                             |          |
| Maximum Load Losses (EU 548/2014):                             | 22695 W                                                                            |          |
| 1.3 Environmental conditions                                   |                                                                                    |          |
| Installation:                                                  | OUTDOOR                                                                            |          |
| Max operating altitude:                                        | 1000m                                                                              |          |
| Max operating temperature:                                     | 45°C                                                                               |          |
| Monthly average temperature                                    | 35°C                                                                               |          |
| Yearly average temperature:                                    | 25°C                                                                               |          |
| Corrosion degree:                                              | C4-H                                                                               |          |
| Average increase of temperature allowed in the windings:       | +60°C                                                                              |          |
| Average increase of temperature allowed in the coolant:        | +55°C                                                                              |          |
| maximum hot spot temperature increase allowed in the windings: | +73°C                                                                              |          |
| Seismic requirements:                                          |                                                                                    |          |
| 1.4 Mechanical requirements and interfaces                     |                                                                                    |          |
| Max Height (H):                                                | 2019mm                                                                             |          |
| Max Length(L):                                                 | 2200mm                                                                             |          |
| Max Depth(D):                                                  | 1200mm                                                                             |          |
| Distance between wheels/fixing points (WD)                     | 820                                                                                |          |
| Distance between wheels/fixing points (WL)                     | NA                                                                                 |          |
| HV Bushings:                                                   | Type C-36kV 630 A                                                                  |          |
| LV Bushings:                                                   | 6xEN50386 1kV type -2000A<br>with flag tinned<br>1xEN50386 1kV type-250A<br>tinned |          |

Annexe 4: Caractéristiques des câbles

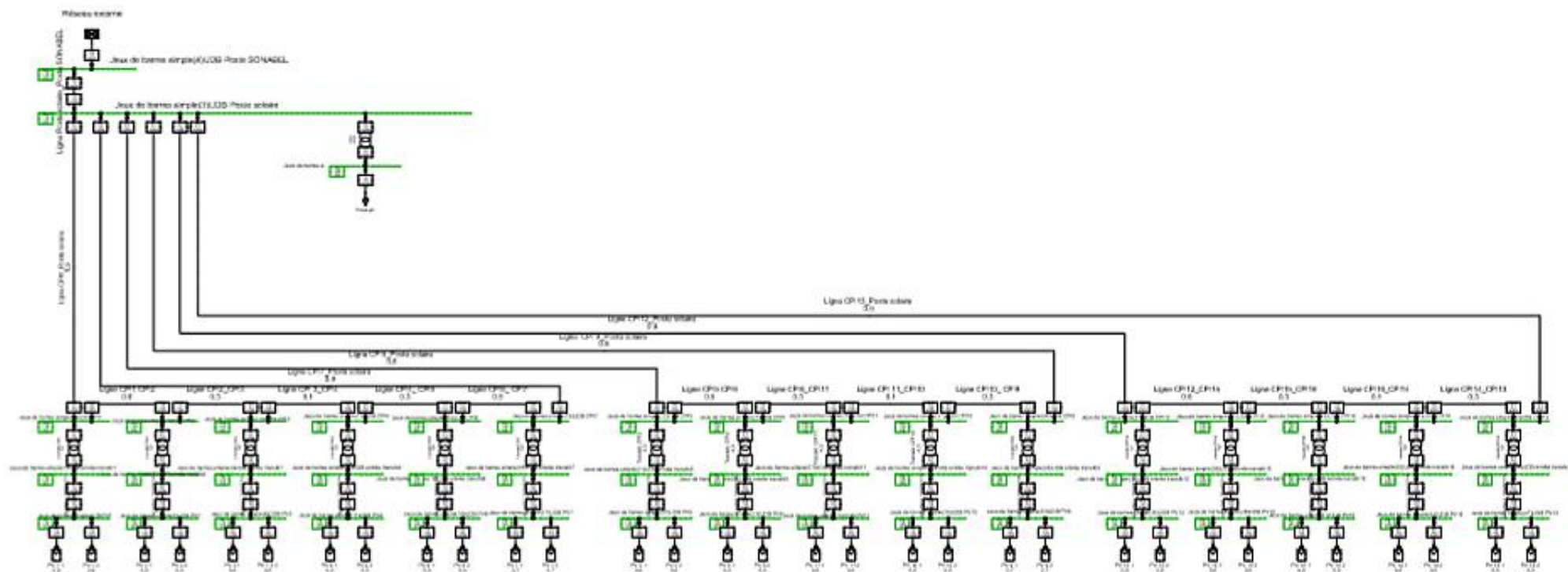
| <b>BOUCLE 1</b>          |                             |               |               |
|--------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Repère                   | Section                     | Longueur (ml) | Type câble    |
| Départ cellule 6-CPI 1   | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 361           | Torsadé usine |
| CPI 1- CPI2              | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 2- CPI 3             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 198           | Torsadé usine |
| CPI 3- CPI 4             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 4- CPI 8             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 186           | Torsadé usine |
| CPI 8- CPI 7             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 7- Départ cellule 7  | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 529           | Torsadé usine |
| <b>BOUCLE 2</b>          |                             |               |               |
| Départ cellule 8- CPI 5  | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 5- CPI 6             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 6- CPI 11            | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 520           | Torsadé usine |
| CPI 11- CPI 10           | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |
| CPI 10-CPI 9             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 198           | Torsadé usine |
| CPI 9- Départ cellule 9  | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 295           | Torsadé usine |
| <b>BOUCLE 3</b>          |                             |               |               |
| Départ cellule 10-CPI 12 | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 452           | Torsadé usine |
| CPI 12- CPI 15           | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 365           | Torsadé usine |
| CPI 15- CPI 16           | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194           | Torsadé usine |

|                                                 |                             |     |               |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----|---------------|
| CPI 16- CPI 14                                  | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 187 | Torsadé usine |
| CPI 14- CPI 13                                  | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 194 | Torsadé usine |
| CPI 13- Départ cellule<br>11                    | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 621 | Torsadé usine |
| <b>LIAISON POSTE SOLAIRE-POSTE DE ZAG0TOULI</b> |                             |     |               |
| Cellule arrivée-ZAG                             | 3×1×240 mm <sup>2</sup> Alu | 404 | Torsadé usine |

Annexe 5:Fiche de relevés des postes

| Fiche de relevés des compteurs |                              |                             |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Heures                         | Puissance poste Solaire (MW) | Puissance Poste SONABEL(MW) |
| 06 :00                         | 0,21                         | 0,18                        |
| 07 :00                         | 5,75                         | 5,7                         |
| 08 :00                         | 8,44                         | 8,11                        |
| 09 :00                         | 16,64                        | 16,58                       |
| 10 :00                         | 23,45                        | 23,32                       |
| 11 :00                         | 24,11                        | 23,98                       |
| 12 :00                         | 11,97                        | 11,75                       |
| 13 :00                         | 10,76                        | 10,49                       |
| 14 :00                         | 21,86                        | 21,6                        |
| 15 :00                         | 16,37                        | 16,31                       |
| 16 :00                         | 5,75                         | 5,49                        |
| 17 :00                         | 4,63                         | 4,52                        |
| 18 :00                         | 0,0072                       | 0,0044                      |

### Annexe 6: Calcul de flux de puissance (modèle détaillée 6h)



## Modélisation détaillée sur Power factory de la centrale solaire de Zagtoui

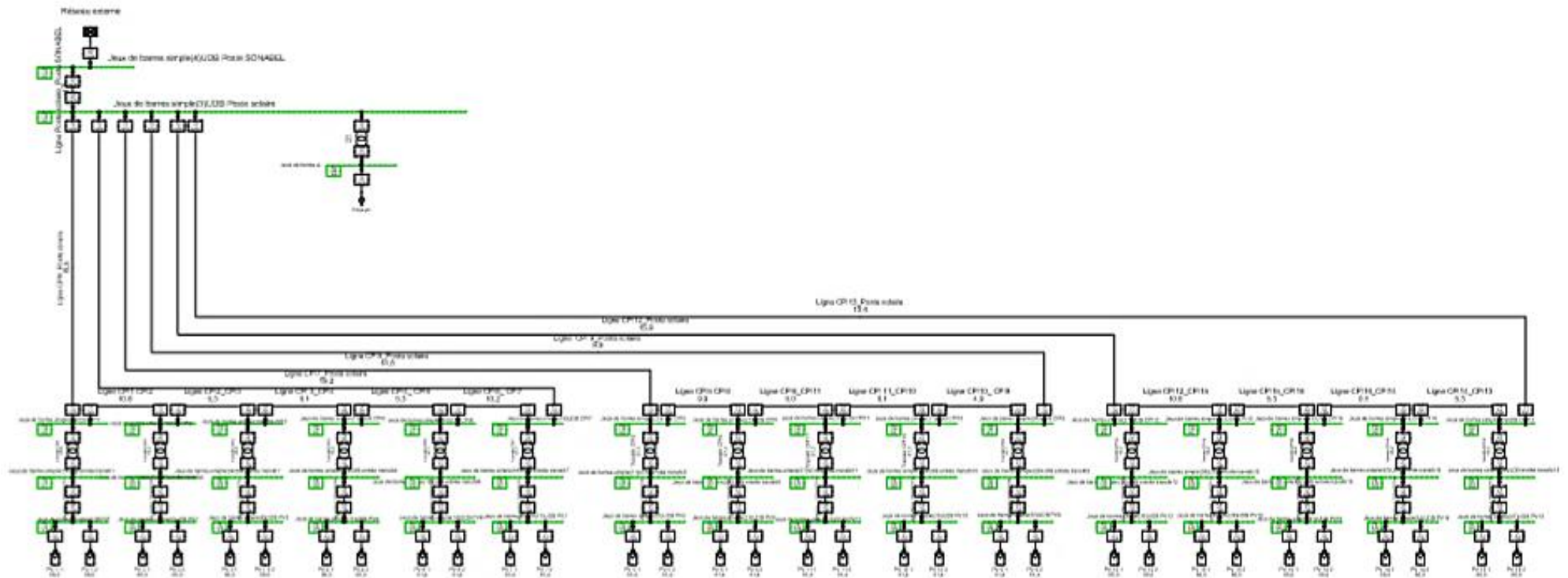
### Annexe 7: Rapport du calcul de flux de puissance (modèle détaillé 6h)

|  |  |                                     |                  |
|--|--|-------------------------------------|------------------|
|  |  | DIgSILENT<br>PowerFactory<br>15.1.7 | Projet:          |
|  |  |                                     | Date: 28/06/2019 |

| Calcul Flux de puissance                        |     | Résumé Système complet                            |          |
|-------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------|----------|
| Flux de puissance AC, équilibré, régime directe |     | Adaptation automatique du modèle pour convergence | Non      |
| Réglage auto. des prises des transformateurs    | Non | Erreur de flux de puissance max. acceptable pour  |          |
| Considérer les limites de puissance réactive    | Oui | Nœuds                                             | 1,00 kVA |
|                                                 |     | Equations du modèle                               | 0,10 %   |

| Résumé système complet      |    |                   |            | Cas d'Étude: Cas d'étude |     | Annex: / 1       |    |
|-----------------------------|----|-------------------|------------|--------------------------|-----|------------------|----|
| Nb Poste                    | 51 | Nb jeux de barres | 51         | Nb Terminaux             | 624 | Nb Lignes        | 36 |
| Nb Trfs 2-w                 | 17 | Nb Trfs 3-w       | 0          | Nb Mach. Synch.          | 0   | Nb Mach. Asynch. | 0  |
| Nb Charges                  | 2  | Nb Shunts         | 0          | Nb SVS                   | 0   |                  |    |
| Production                  | =  | 0,24 MW           | -0,03 Mvar | 0,24 MVA                 |     |                  |    |
| Alimentation externe        | =  | -0,19 MW          | 0,98 Mvar  | 1,00 MVA                 |     |                  |    |
| Charge P(U)                 | =  | 0,02 MW           | 0,00 Mvar  | 0,02 MVA                 |     |                  |    |
| Charge P(Un)                | =  | 0,02 MW           | 0,00 Mvar  | 0,02 MVA                 |     |                  |    |
| Charge P(Un-U)              | =  | 0,00 MW           | 0,00 Mvar  |                          |     |                  |    |
| Puissance Moteur            | =  | 0,00 MW           | 0,00 Mvar  | 0,00 MVA                 |     |                  |    |
| Pertes du réseau            | =  | 0,03 MW           | 0,94 Mvar  |                          |     |                  |    |
| Débit capacitif             | =  |                   | 0,94 Mvar  |                          |     |                  |    |
| Compensation ind.           | =  |                   | 0,00 Mvar  |                          |     |                  |    |
| Compensation cap.           | =  |                   | 0,00 Mvar  |                          |     |                  |    |
| Puissance installée         | =  | 34,56 MW          |            |                          |     |                  |    |
| Réserve tournante           | =  | 0,00 MW           |            |                          |     |                  |    |
| Facteur de Puissance total: |    |                   |            |                          |     |                  |    |
| Production                  | =  | 0,99 [-]          |            |                          |     |                  |    |
| Charge/Moteur               | =  | 0,99 / 0,00 [-]   |            |                          |     |                  |    |

### Annexe 8: Calcul de flux de puissance (modèle détaillé 14h)

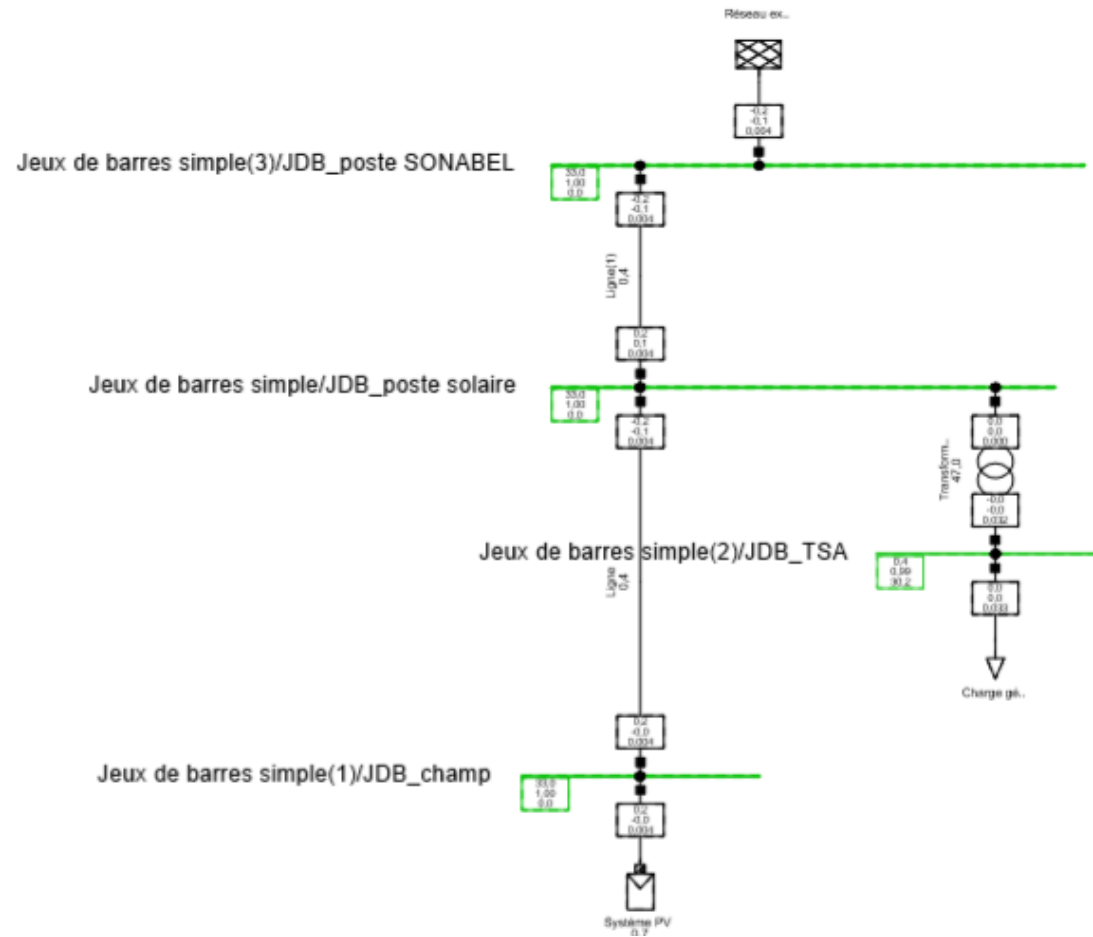


## Modélisation détaillée sur Power factory de la centrale solaire de Zagtoui

### Annexe 9: Rapport du calcul de flux de puissance (modèle détaillé 14h)

|                                                 |               |                                                   |                  |
|-------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|------------------|
|                                                 |               | DIGSILENT<br>PowerFactory<br>15.1.7               | Projet:          |
|                                                 |               |                                                   | Date: 06/07/2019 |
| Calcul Flux de puissance                        |               | Résumé Système complet                            |                  |
| Flux de puissance AC, équilibré, régime directe |               | Adaptation automatique du modèle pour convergence |                  |
| Réglage auto. des prises des transformateurs    | Non           | Erreur de flux de puissance max. acceptable pour  | Non              |
| Considérer les limites de puissance réactive    | Oui           | Noeuds                                            | 1,00 kVA         |
|                                                 |               | Equations du modèle                               | 0,10 %           |
| Résumé système complet                          |               | Cas d'Étude: Cas d'étude                          | Annex: / 1       |
| Nb Poste                                        | 51            | Nb jeux de barres                                 | 51               |
| Nb Trfs 2-w                                     | 17            | Nb Trfs 3-w                                       | 0                |
| Nb Charges                                      | 2             | Nb Shunts                                         | 0                |
| Nb Terminaux                                    | 624           | Nb Mach. Synch.                                   | 0                |
| Nb SVS                                          | 0             |                                                   |                  |
| Nb Lignes                                       | 36            | Nb Mach. Asynch.                                  | 0                |
| Production                                      | = 22,18 MW    | -3,16 Mvar                                        | 22,41 MVA        |
| Alimentation externe                            | = -21,96 MW   | 8,16 Mvar                                         | 23,43 MVA        |
| Charge P(U)                                     | = 0,02 MW     | 0,00 Mvar                                         | 0,02 MVA         |
| Charge P(Un)                                    | = 0,02 MW     | 0,00 Mvar                                         | 0,02 MVA         |
| Charge P(Un-U)                                  | = 0,00 MW     | -0,00 Mvar                                        |                  |
| Puissance Moteur                                | = 0,00 MW     | 0,00 Mvar                                         | 0,00 MVA         |
| Pertes du réseau                                | = 0,21 MW     | 5,00 Mvar                                         |                  |
| Débit capacitif                                 | =             | 3,88 Mvar                                         |                  |
| Compensation ind.                               | =             | 0,00 Mvar                                         |                  |
| Compensation cap.                               | =             | 0,00 Mvar                                         |                  |
| Puissance installée                             | = 34,56 MW    |                                                   |                  |
| Réserve tournante                               | = 0,00 MW     |                                                   |                  |
| Facteur de Puissance total:                     |               |                                                   |                  |
| Production                                      | = 0,99        | [-]                                               |                  |
| Charge/Moteur                                   | = 0,99 / 0,00 | [-]                                               |                  |

Annexe 10: Calcul de flux de puissance du modèle simplifié à 6h

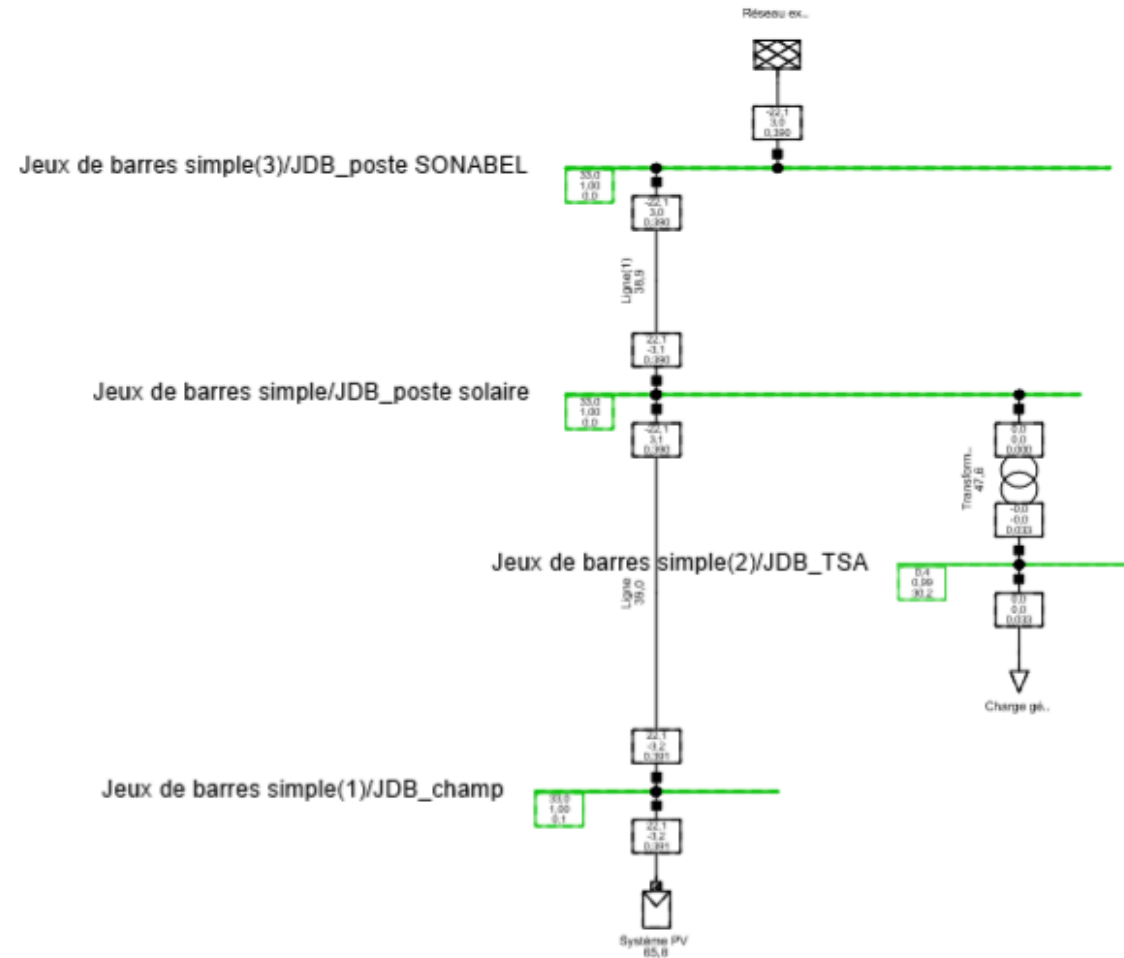


## Modélisation détaillée sur Power factory de la centrale solaire de Zagtoui

### Annexe 11: Rapport du calcul de flux de puissance (modèle simplifié 6h)

|                                                                                                                                                 |  |   |                                     |                          |                                                                                                                                        |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------|-----------------|--|----|--|------------------|--|---|--|
|                                                                                                                                                 |  |   | DigSILENT<br>PowerFactory<br>15.1.7 |                          | Projet:<br><br>Date: 03/07/2019                                                                                                        |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Calcul Flux de puissance                                                                                                                        |  |   |                                     |                          | Résumé Système complet                                                                                                                 |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Flux de puissance AC, équilibré, régime directe<br>Réglage auto. des prises des transformateurs<br>Considérer les limites de puissance réactive |  |   | Non<br>Oui                          |                          | Adaptation automatique du modèle pour convergence<br>Erreur de flux de puissance max. acceptable pour<br>Noeuds<br>Equations du modèle |            | Non<br><br>1,00 kVA<br>0,10 % |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Résumé système complet                                                                                                                          |  |   |                                     | Cas d'Étude: Cas d'étude |                                                                                                                                        | Annex:     |                               | / 1             |  |    |  |                  |  |   |  |
| Nb Poste                                                                                                                                        |  | 4 |                                     | Nb jeux de barres        |                                                                                                                                        | 4          |                               | Nb Terminaux    |  | 48 |  | Nb Lignes        |  | 2 |  |
| Nb Trfs 2-w                                                                                                                                     |  | 1 |                                     | Nb Trfs 3-w              |                                                                                                                                        | 0          |                               | Nb Mach. Synch. |  | 0  |  | Nb Mach. Asynch. |  | 0 |  |
| Nb Charges                                                                                                                                      |  | 1 |                                     | Nb Shunts                |                                                                                                                                        | 0          |                               | Nb SVS          |  | 0  |  |                  |  |   |  |
| Production                                                                                                                                      |  | = |                                     | 0,24 MW                  |                                                                                                                                        | -0,03 Mvar |                               | 0,24 MVA        |  |    |  |                  |  |   |  |
| Alimentation externe                                                                                                                            |  | = |                                     | -0,22 MW                 |                                                                                                                                        | -0,12 Mvar |                               | 0,25 MVA        |  |    |  |                  |  |   |  |
| Charge P(U)                                                                                                                                     |  | = |                                     | 0,02 MW                  |                                                                                                                                        | 0,01 Mvar  |                               | 0,02 MVA        |  |    |  |                  |  |   |  |
| Charge P(Un)                                                                                                                                    |  | = |                                     | 0,02 MW                  |                                                                                                                                        | 0,01 Mvar  |                               | 0,02 MVA        |  |    |  |                  |  |   |  |
| Charge P(Un-U)                                                                                                                                  |  | = |                                     | 0,00 MW                  |                                                                                                                                        | -0,00 Mvar |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Puissance Moteur                                                                                                                                |  | = |                                     | 0,00 MW                  |                                                                                                                                        | 0,00 Mvar  |                               | 0,00 MVA        |  |    |  |                  |  |   |  |
| Pertes du réseau                                                                                                                                |  | = |                                     | 0,00 MW                  |                                                                                                                                        | -0,16 Mvar |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Débit capacitif                                                                                                                                 |  | = |                                     |                          |                                                                                                                                        | -0,16 Mvar |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Compensation ind.                                                                                                                               |  | = |                                     |                          |                                                                                                                                        | 0,00 Mvar  |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Compensation cap.                                                                                                                               |  | = |                                     |                          |                                                                                                                                        | 0,00 Mvar  |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Puissance installée                                                                                                                             |  | = |                                     | 33,66 MW                 |                                                                                                                                        |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Réserve tournante                                                                                                                               |  | = |                                     | 0,00 MW                  |                                                                                                                                        |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Facteur de Puissance total:                                                                                                                     |  |   |                                     |                          |                                                                                                                                        |            |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Production                                                                                                                                      |  | = |                                     | 0,99                     |                                                                                                                                        | [-]        |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |
| Charge/Moteur                                                                                                                                   |  | = |                                     | 0,89 / 0,00              |                                                                                                                                        | [-]        |                               |                 |  |    |  |                  |  |   |  |

Annexe 12: Calcul de flux de puissance du modèle simplifié à 14h



## Modélisation détaillée sur Power factory de la centrale solaire de Zagtoui

### Annexe 13: Rapport du calcul de flux de puissance (modèle simplifié 14h)

|                                                 |                   |                                                   |                  |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|------------------|
|                                                 |                   | DiGSILENT<br>PowerFactory<br>15.1.7               | Projet:          |
|                                                 |                   |                                                   | Date: 03/07/2019 |
| Calcul Flux de puissance                        |                   | Résumé Système complet                            |                  |
| Flux de puissance AC, équilibré, régime directe |                   | Adaptation automatique du modèle pour convergence | Non              |
| Réglage auto. des prises des transformateurs    | Non               | Erreur de flux de puissance max. acceptable pour  | 1,00 kVA         |
| Considérer les limites de puissance réactive    | Oui               | Noeuds                                            | 0,10 %           |
|                                                 |                   | Equations du modèle                               |                  |
| Résumé système complet                          |                   | Cas d'Étude: Cas d'étude                          | Annex: / 1       |
| Nb Poste                                        | 4                 | Nb jeux de barres                                 | 4                |
| Nb Trfs 2-w                                     | 1                 | Nb Trfs 3-w                                       | 0                |
| Nb Charges                                      | 1                 | Nb Shunts                                         | 0                |
| Nb Terminaux                                    | 48                | Nb Mach. Synch.                                   | 0                |
| Nb SVS                                          | 0                 | Nb Mach. Asynch.                                  | 0                |
| Production                                      | = 22,13 MW        | -3,15 Mvar                                        | 22,36 MVA        |
| Alimentation externe                            | = -22,08 MW       | 3,03 Mvar                                         | 22,29 MVA        |
| Charge P(U)                                     | = 0,02 MW         | 0,01 Mvar                                         | 0,02 MVA         |
| Charge P(Un)                                    | = 0,02 MW         | 0,01 Mvar                                         | 0,02 MVA         |
| Charge P(Un-U)                                  | = 0,00 MW         | 0,00 Mvar                                         |                  |
| Puissance Moteur                                | = 0,00 MW         | 0,00 Mvar                                         | 0,00 MVA         |
| Pertes du réseau                                | = 0,03 MW         | -0,14 Mvar                                        |                  |
| Débit capacitif                                 | =                 | -0,16 Mvar                                        |                  |
| Compensation ind.                               | =                 | 0,00 Mvar                                         |                  |
| Compensation cap.                               | =                 | 0,00 Mvar                                         |                  |
| Puissance installée                             | = 33,66 MW        |                                                   |                  |
| Réserve tournante                               | = 0,00 MW         |                                                   |                  |
| Facteur de Puissance total:                     |                   |                                                   |                  |
| Production                                      | = 0,99 [-]        |                                                   |                  |
| Charge/Moteur                                   | = 0,89 / 0,00 [-] |                                                   |                  |

**Annexe 14 : Fonctions du code ANSI**

| <b>Code ANSI</b> | <b>Libellé de la fonction</b>        | <b>Définition</b>                                                                            |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>27</b>        | Minimum de tension                   | Protection pour contrôle d'une baisse de tension                                             |
| <b>50</b>        | Maximum de courant phase instantané  | Protection triphasée contre les courts-circuits entre phases                                 |
| <b>50N</b>       | Maximum de courant terre instantanée | Protection contre les défauts à la terre : 50N : courant résiduel calculé ou mesuré par 3 TC |
| <b>51</b>        | Maximum de courant phase temporisée  | Protection triphasée contre les surcharges et les courts-circuits entre phases               |
| <b>59</b>        | Maximum de tension                   | Protection de contrôle d'une tension trop élevée ou suffisante                               |
| <b>59N</b>       | Maximum de tension résiduelle        | Protection de détection de défaut d'isolement                                                |
| <b>81-step1</b>  | Minimum de fréquence                 | Protection contre une fréquence anormalement basse                                           |
| <b>81-step2</b>  |                                      |                                                                                              |
| <b>81-step3</b>  | Maximum de fréquence                 | Protection contre une fréquence anormalement élevée                                          |
| <b>81-step4</b>  |                                      |                                                                                              |

# Annexe 15: Fiche technique des cellules Siemens

## Données techniques

### Données électriques du tableau, classification

|                                                        |                                                        |                                                                             |                           |                                  |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Niveau d'isolement assigné                             |                                                        | Tension assignée $U_T$                                                      | kV                        | 36                               |
|                                                        |                                                        | Tension de tenue assignée de courte durée à fréquence Industrielle $U_d$    |                           |                                  |
|                                                        |                                                        | – phase / phase, phase / terre, distance d'isolement entre contacts ouverts | kV                        | 70                               |
|                                                        |                                                        | – sur la distance de sectionnement                                          | kV                        | 80                               |
|                                                        |                                                        | Tension de tenue assignée aux chocs de foudre $U_p$                         |                           |                                  |
|                                                        |                                                        | – phase / phase, phase / terre, distance d'isolement entre contacts ouverts | kV                        | 170                              |
|                                                        |                                                        | – sur la distance de sectionnement                                          | kV                        | 195                              |
| Fréquence assignée fr                                  |                                                        |                                                                             | Hz                        | 50/60                            |
| Courant assigné en service continu $I_r$ <sup>2)</sup> |                                                        | pour départs Interrupteur-sectionneur                                       | A                         | 630                              |
|                                                        |                                                        | pour départs disjoncteur                                                    | A                         | 630                              |
|                                                        |                                                        | pour jeu de barres                                                          | A                         | 630                              |
|                                                        |                                                        | pour départs protection transformateur                                      | A                         | 200 <sup>3)</sup>                |
| 50 Hz                                                  | Courant de courte durée admissible assigné $I_k$       | pour tableaux avec $t_k = 3$ s                                              | jusqu'à kA                | 20                               |
|                                                        | Valeur de crête du courant admissible assigné $I_p$    |                                                                             | jusqu'à kA                | 50                               |
|                                                        | Courant assigné de fermeture de court-circuit $I_{ma}$ | pour départs Interrupteur-sectionneur                                       | jusqu'à kA                | 50                               |
|                                                        |                                                        | pour départs disjoncteur                                                    | A                         | 630                              |
| 60 Hz                                                  | Courant de courte durée admissible assigné $I_k$       | pour tableaux avec $t_k = 3$ s                                              | jusqu'à kA                | 20                               |
|                                                        |                                                        |                                                                             | jusqu'à kA                | 52                               |
|                                                        | Courant assigné de fermeture de court-circuit $I_{ma}$ | pour départs Interrupteur-sectionneur                                       | jusqu'à kA                | 52                               |
|                                                        |                                                        | pour départs disjoncteur                                                    | A                         | 630                              |
|                                                        |                                                        | pour départs protection transformateur                                      | jusqu'à kA                | 52                               |
|                                                        |                                                        |                                                                             |                           |                                  |
| Pression de remplissage (valeurs de pression à 20 °C)  |                                                        | Niveau de remplissage assigné $p_{re}$ (absolu)                             | kPa                       | 150                              |
|                                                        |                                                        | Pression minimale de fonctionnement $p_{re}$ (absolue)                      | kPa                       | 130                              |
| Température de l'air ambiant T                         |                                                        | sans équipement secondaire                                                  | °C                        | –25 à +55                        |
|                                                        |                                                        | avec équipement secondaire                                                  | °C                        | –5 / –25 <sup>4)</sup> à +55     |
|                                                        |                                                        | pour stockage / transport y compris systèmes secondaires                    | °C                        | –25 / –40 <sup>5)</sup> à +70 °C |
| Degré de protection                                    |                                                        | pour le caisson d'appareillage à remplissage de gaz                         | IP65                      |                                  |
|                                                        |                                                        | pour l'enveloppe du tableau                                                 | IP2X / IP3X <sup>1)</sup> |                                  |
|                                                        |                                                        | pour le compartiment basse tension                                          | IP3X / IP4X <sup>1)</sup> |                                  |

# Annexe 16: Fiche technique des cellules Omazabal

## 1.4 Tableau de caractéristiques

|                                                                  |                                |                           |         |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------|
| Tension assignée [kV]                                            | 36                             | 38.5                      | 40.5    |
| Fréquence [Hz]                                                   | 50/60                          |                           |         |
| Intensité nominale [A]                                           |                                |                           |         |
| Barres et interconnexion de cellules                             | 400/630                        | 630                       |         |
| Ligne                                                            | 400/630                        | 630                       |         |
| Sortie au transformateur                                         | 200                            | 200                       |         |
| Courant admissible assigné de courte durée [kA]                  |                                |                           |         |
| Avec $t_x = (x) \text{ s}$                                       | 16 / 20* (1 / 3 s)<br>25 (1 s) | 20* (1 / 3 s)<br>25 (1 s) |         |
| Valeur de crête                                                  | 40 / 52* / 62,5                | 52* / 62,5                |         |
| Niveau d'isolation assignée [kV]                                 |                                |                           |         |
| Tension de tenue assignée à fréquence Industrielle durant 1 min. | 70/80                          | 80/90                     | 95/118  |
| Tension de tenue au choc de foudre                               | 170/195                        | 180/210                   | 185/215 |
| Arc Interne dans la cuve                                         |                                |                           |         |
| Accessibilité frontale                                           | 16 / 20* kA (0,5 s)            | 20* kA (0,5 s)            |         |
| Accessibilité frontale et latérale                               | 16 / 20* / 25 kA (1 s)         | 20* / 25 kA (1 s)         |         |
| Accessibilité frontale, latérale et arrière***                   | 16 / 20* / 25 kA (1 s)         | 20* / 25 kA (1 s)         |         |
| Classement d'arc Interne selon CEI 62271-200                     |                                |                           |         |
| IAC AF / AFL                                                     | 16 / 20* / 25 kA (1 s)         | 20* / 25 kA (1 s)         |         |
| IAC AFLR                                                         | 16 / 20* / 25 kA (1 s)         | 20* / 25 kA 1 s           |         |
| Degré de protection : Cuve de gaz                                | IP X8                          |                           |         |
| Degré de protection : Enveloppe externe                          | IP 2XD                         |                           |         |
| Couleur de l'équipement standard [RAL]                           | gris 7035 / bleu 5005          |                           |         |
| Catégorie de perte de continuité de service [LSC]                | LSC2                           |                           |         |
| Classe de compartimentation                                      | PM                             |                           |         |

(\*) Essais réalisés avec un courant de 21 kA / 54,6 kA

(\*\*) Avec sortie de gaz vers le haut à travers la cheminée

## TABLE DES MATIERES

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>DEDICACES.....</b>                                                           | <b>i</b>   |
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>                                                       | <b>iii</b> |
| <b>RESUME.....</b>                                                              | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                            | <b>v</b>   |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>                                             | <b>vi</b>  |
| <b>SOMMAIRE.....</b>                                                            | <b>vii</b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>                                                  | <b>ix</b>  |
| <b>LISTE DES FIGURES.....</b>                                                   | <b>x</b>   |
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                              | <b>1</b>   |
| <b>I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCEUIL ET DU PROJET.....</b>              | <b>3</b>   |
| <b>I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D’ACCUEIL .....</b>                        | <b>3</b>   |
| a. Organisation et fonctionnement de la SONABEL.....                            | 3          |
| b. Présentation de la direction du transport et des mouvements d’énergie.....   | 3          |
| c. Présentation du département contrôles électriques et télécommunication ..... | 4          |
| <b>I.2. PRESENTATION DU PROJET.....</b>                                         | <b>7</b>   |
| a. Objectifs .....                                                              | 7          |
| b. Résultats attendus .....                                                     | 7          |
| c. Méthodologie.....                                                            | 8          |
| <b>II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>                                        | <b>10</b>  |
| <b>II.1. GENERALITES SUR LES CENTRALES PV .....</b>                             | <b>10</b>  |
| <b>II.2. MODELES DES COMPOSANTS ELEMENTAIRES D’UNE CENTRALE PV.....</b>         | <b>11</b>  |
| a. Panneaux PV .....                                                            | 11         |
| b. Onduleur réseau .....                                                        | 12         |
| c. Ligne électrique.....                                                        | 14         |
| d. Transformateur à deux enroulements.....                                      | 16         |
| <b>II.3. GENERALITES SUR LES PROTECTIONS .....</b>                              | <b>17</b>  |
| a. Différents types de défauts électriques .....                                | 17         |

|               |                                                                                |           |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| b.            | Eléments constitutifs d'un système de protection .....                         | 19        |
| <b>III.</b>   | <b>COLLECTE DES DONNEES.....</b>                                               | <b>21</b> |
| <b>III.1.</b> | <b>SCHEMA DE LA CENTRALE.....</b>                                              | <b>22</b> |
| <b>III.2.</b> | <b>DONNEES TECHNIQUES DES EQUIPEMENTS.....</b>                                 | <b>23</b> |
| a.            | Modules photovoltaïques .....                                                  | 23        |
| b.            | Centres photovoltaïques intégrés (CPI) .....                                   | 23        |
| c.            | Câbles électriques .....                                                       | 26        |
| d.            | Poste solaire.....                                                             | 26        |
| e.            | Salle de commande.....                                                         | 26        |
| f.            | Stations météorologiques.....                                                  | 26        |
| g.            | Données des protections .....                                                  | 27        |
| <b>III.3.</b> | <b>ACQUISITION DE DONNEES DES COMPTEURS .....</b>                              | <b>28</b> |
| <b>IV.</b>    | <b>MODELISATION SUR POWER FACTORY.....</b>                                     | <b>29</b> |
| <b>IV.1.</b>  | <b>PRESENTATION DU LOGICIEL POWER FACTORY .....</b>                            | <b>29</b> |
| <b>IV.2.</b>  | <b>MODELISATION DES ELEMENTS DE BASE.....</b>                                  | <b>30</b> |
| a.            | Modèle détaillé .....                                                          | 30        |
| b.            | Modèle simplifié .....                                                         | 33        |
| <b>IV.3.</b>  | <b>CRITERES DE VALIDATION DE LA STABILITE .....</b>                            | <b>34</b> |
| <b>IV.4.</b>  | <b>SCHEMA UNIFILAIRE DU MODELE DETAILLE DE LA CENTRALE DE ZAGTOULI .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>IV.5.</b>  | <b>SCHEMA UNIFILAIRE DU MODELE DETAILLE .....</b>                              | <b>36</b> |
| <b>V.</b>     | <b>RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>                                            | <b>37</b> |
| <b>V.1.</b>   | <b>VALIDATION DES MODELES .....</b>                                            | <b>37</b> |
| a.            | Etude en régime statique.....                                                  | 37        |
| b.            | Etude en régime quasi dynamique .....                                          | 42        |
| <b>V.2.</b>   | <b>ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MODELE DETAILLE ET LE MODELE SIMPLIFIE .....</b> | <b>51</b> |
| a.            | Avantages et inconvénients de la modélisation détaillée.....                   | 51        |
| b.            | Avantages et inconvénients de la modélisation simplifiée .....                 | 52        |
| <b>V.3.</b>   | <b>ETUDE DE SELECTIVITE DU MODELE DETAILLE .....</b>                           | <b>52</b> |
| a.            | Court-circuit biphasé max.....                                                 | 53        |
| b.            | Court-circuit triphasé max .....                                               | 55        |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| V.4. VERIFICATION DE LA TENUE THERMIQUE ET ELECTRODYNAMIQUE DES JDB ..... | 58        |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                          | <b>60</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                 | <b>i</b>  |
| <b>ANNEXES .....</b>                                                      | <b>ii</b> |