

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Centre De Développement des Énergies Renouvelables

Mémoire de master en QHSE-GRI

Analyse des risques au niveau des centrales photovoltaïques
connectées aux réseaux électriques

Kaouther GACI

Sous la direction de :

Mme. Ouzna HAOUCHINE,
M. Aboubaker KERTOUS,

Maître de Conférences B à l'ENP
Maître-Assistant A à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 14/06/2017 devant le jury composé de :

Président
Encadreur
Encadreur
Encadreur
Examineur
Examineur

M. Mohamed OUADJAOUT,
Mme .Ouzna HAOUCHINE,
M.Aboubaker KERTOUS,
M. Kamel BENSARI,
M.Amin BENMOKHTAR,
Mme. Marya FODIL,

Maitre-Assistant à l'ENP
Maitre de Conférences B à l'ENP
Maitre-Assistant A à l'ENP
Directeur HSE Hassi Messaoud
Maitre-Assistant A à l'ENP
Maitre-Assistant A à l'ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Centre De Développement des Énergies Renouvelables

Mémoire de master en QHSE-GRI

Analyse des risques au niveau des centrales photovoltaïques
connectées aux réseaux électriques

Kaouther GACI

Sous la direction de :

Mme. Ouzna HAOUCHINE,
M. Aboubaker KERTOUS,

Maître de Conférences B à l'ENP
Maître-Assistant A à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 14/06/2017 devant le jury composé de :

Président
Encadreur
Encadreur
Encadreur
Examineur
Examineur

M. Mohamed OUADJAOUT,
Mme .Ouzna HAOUCHINE,
M.Aboubaker KERTOUS,
M. Kamel BENSARI,
M.Amin BENMOKHTAR,
Mme. Marya FODIL,

Maitre-Assistant à l'ENP
Maitre de Conférences B à l'ENP
Maitre-Assistant A à l'ENP
Directeur HSE Hassi Messaoud
Maitre-Assistant A à l'ENP
Maitre-Assistant A à l'ENP

Dédicaces

À la mémoire de ma chère tante Zoubida

À mes chers parents

À ma chère sœur Hadjer et ma chère amie Bouckra

À mes deux frères Abderraouf et Ahmed

À mes grands-parents

À ma chère tante Malika

À tous mes chers amis et à tous ceux que je garde dans mon cœur

Je dédie ce modeste travail

Kaouther GACI

Remerciements

*Je tiens à remercier en premier lieu mes encadreurs Madame **O. HAOUCHINE**, Maître de conférences B à l'École Nationale Polytechnique (ENP), Messieurs **A. KERTOUS**, Maître Assistant A à l'ENP, et **K. BENSARI**, directeur HSE à Hassi Messaoud, pour leurs encouragements, leur soutien académique et moral et leur contribution à l'exceptionnel encadrement dont j'ai bénéficié. Leur patience surtout et leur réactivité m'ont permis de mener à terme ce travail.*

*Je remercie très vivement Monsieur **S. OULD AMROUCHE**, Maître de recherche A au CDER, pour le temps qu'il a consacré, pour avoir partagé son expertise, et pour tous les supports qu'il a mis à notre disposition.*

*Tous mes remerciements s'adressent à Monsieur **M. OUADJAOUT**, Enseignant Chercheur à l'ENP, Chef de Département et Directeur du Cycle Préparatoire-ENP, qui me fait l'honneur de présider le jury. Aussi, pour sa disponibilité, pour son aide et ses conseils très précieux. Toute ma gratitude s'adresse aussi à l'ensemble des Enseignants du Département QHSE-GRI de l'École Nationale Polytechnique, à leur tête le Chef de Département, le Professeur **B. BENKOUSSAS**.*

*À Monsieur **A. BENMOKHTAR** et Madame **M. FODIL**, maîtres assistants A à l'ENP, pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je tiens à exprimer mes gratitudes à Madame **S. ZEBOU DJ**, Professeur à l'ENP, pour tous les efforts qu'elle a fournis pour nous assurer une meilleure formation et un meilleur environnement de travail durant mes trois années en QHSE-GRI.*

Enfin, je remercie toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à ma famille et surtout à mes chères parents qui n'ont jamais cessé de m'encourager.

Merci...

ملخص

تعتبر الألواح الشمسية المرتبطة بالشبكات الكهربائية تقنية حديثة في إنتاج الكهرباء في الجزائر. من خلال هذا العمل سوف نلقي نظرة على الأخطار التي يمكنها الحدوث في مثل هذا النوع من التركيبات وتقديم بعض التوصيات التي من شأنها تقليل احتمال وقوع الحوادث فيها.

الكلمات المفتاحية: الألواح الشمسية، الشبكات الكهربائية، HAZID، خطر، احتمال وقوع حادث.

Abstract

Solar panels associated with electrical networks are considered as a modern technology in the production of electricity in Algeria. Through, this study will be based on examining the risks that could occur in such a type of structure and proposing some recommendations that will reduce the likelihood of accidents.

Key Words: Solar panels, electrical networks, HAZID, Danger, likelihood.

Résumé

Les installations photovoltaïques connectées aux réseaux électriques est une nouvelle technologie dans la production d'électricité en Algérie. Dans ce travail, nous allons analyser les risques qui peuvent survenir dans ce type d'installations et proposer des recommandations qui pourront réduire la probabilité d'accidents.

Mots clés : installations photovoltaïques, réseaux électriques, HAZID, Danger, probabilité.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Glossaire

Introduction générale.....	9
CHAPITRE I : Présentation générale du centre.....	11
1. Introduction.....	11
2. Les unités de recherche affiliées au CDER.....	12
2.1. Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES).....	12
2.2. Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER)	12
2.3. Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS)....	12
3. Historique.....	13
4. Domaines d'intervention du CDER.....	14
Chapitre II : Définition des énergies renouvelables (énergie solaire), introduction aux systèmes PV connectés aux réseaux électriques	16
1. Généralités sur l'industrie solaire et introduction à l'effet photovoltaïques.....	16
2. Eléments d'une installation photovoltaïque.....	17
2.1. Modules	17
2.2. Câblage de champ.....	17
2.3. Câblage de liaison.....	17
2.4. Contacteur côté courant continu (DC).....	18
2.5. Onduleur	18
2.6. Contacteur côté courant alternatif (AC)	18
2.7. Injection-comptage	18
3. Accidentologie	19
CHAPITRE III : analyse des risques au niveau des installations PV connectées aux réseaux électriques.....	21
1. Description du process (Cas du SPVCR du CDER).....	21
2. Présentation de la méthode d'analyse de risque.....	22
2.1. Identification des dangers (HAZID) et des scénarios d'accidents.....	23
2.2. Méthodologie d'estimation des conséquences	26
2.3. Méthodologie d'estimation des fréquences	26
2.4. Méthodologie d'estimation/d'évaluation des risques	27
3. Recommandations.....	29

Conclusion générale	31
Références bibliographiques	32

Liste des figures

Figure III.1: Schéma d'un SV connecté aux réseaux électriques	23
Figure III.2: Processus d'analyse de risques	24
Figure III.3 : Modèle développé par le Health and Safety Directive, UK	28

Liste des tableaux

Tableau III.1: Caractéristiques du module PV, Isofoton I_106Wc/12V	22
Tableau III.2: Caractéristiques de l'onduleur PV, FRONIUS IG30 2.5 kW	23
Tableau III.3: Identification des potentiels de danger par la méthode HAZID.....	25
Tableau III.4: Estimation de la gravité	26
Tableau III.5: estimation de la probabilité	27
Tableau III.6: matrice des risques	27
Tableau III.7: Résultats de l'analyse des risques par la méthode HAZID	28

Glossaire

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables ;

CRENO : Centre de Recherche des Energies Nouvelles

EnR : énergie renouvelable ;

EPI : Equipements de Protection Individuels

EPSTA : Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technique

HAZID : HAZard IDentification ;

IES : Institut de l'Energie Solaire

IESUA : Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger

MW : Méga Watt ;

PV : Photovoltaïques

SES : Station de l'Energie Solaire

TEP : Unité de mesure énergétique 1 tep= 10Gcal soit environ 42 J ;

UDES : Unité de Développement des Equipements Solaires

URAER : Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables

URERMS : Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien

USA : United States of America

Watt-crête : dans une installation photovoltaïque, c'est la puissance électrique maximale pouvant être fournie dans des conditions standards ;

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie s'est engagée depuis quelques années dans une politique de transition énergétique dont l'objectif est à la fois d'assurer une sécurité énergétique en optant pour une diversification de ses ressources énergétiques et aussi d'honorer ses engagements contractuels d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, cette politique de transition énergétique se décline à travers le programme national sur l'efficacité énergétique (2015-2030) qui se fixe comme objectif d'économiser 30 millions de TEP d'ici 2030 [1] et du programme national de développement des énergies renouvelables qui vise à produire 22000 MW à partir des énergies renouvelables à horizon 2030. Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), à travers sa division de recherche en énergie thermique et thermodynamique solaire et géothermie, œuvre à accompagner ces deux programmes en développant des projets de recherche sur la gestion de l'énergie thermique.

30% [2] des incendies seraient d'origine électrique. Les principales causes sont, l'échauffement des câbles dû à une surcharge, le court-circuit entraînant un arc électrique, un défaut d'isolement conduisant à une circulation anormale du courant entre récepteur et masse ou entre récepteur et terre, et bien d'autres causes qui doivent être prises en compte lors de la conception de ces installations.

Pour cela, nous allons faire une analyse de risques dans un premier temps pour identifier, voire quantifier les risques et les sources de danger qui existent. Par la suite, nous allons proposer des mesures de sécurité correctives.

Ce mémoire est organisé ainsi :

Chapitre 1 : Une description du centre des énergies renouvelables (CDER), ses missions ainsi que les principaux objectifs de l'organisme.

Chapitre 2 : Définition des énergies renouvelables, et plus particulièrement les énergies photovoltaïques.

Chapitre 3 : Application de la méthode HAZID sur le système PV du CDER et présentation des résultats. A la fin du chapitre, nous proposons des recommandations à mettre en place.

CHAPITRE I : Présentation générale du centre

CHAPITRE I : Présentation générale du centre

1. Introduction

Le centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) est un centre de recherche, issu de la restructuration du haut-commissariat à la recherche, créé le 22 Mars 1988.

C'est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPSTA). Il est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement scientifiques et technologiques des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

Le CDER en tant que pôle scientifique représente l'un des piliers du programme national de recherche et de développement technologique définis par la loi d'orientation et de programme à projection quinquennale sur la recherche scientifique et le développement technologique.

Les projets nationaux retenus dans ce programme sont orientés sur des priorités économiques et sociétales pour répondre aux principaux besoins stratégiques de développement économique.

Le CDER active depuis sa création dans la mise en œuvre de cette stratégie à travers le déploiement et l'intégration de plusieurs réalisations et projets pilotes au niveau national.

Le CDER, grâce à ses chercheurs du siège, de ses trois unités de recherche ainsi que de sa filiale commerciale ER2, se déploie dans tout le territoire national comme étant un centre d'excellence en énergies renouvelables à travers ses productions scientifiques et ses innovations au service du secteur socioéconomique au profit des populations notamment isolées.

Le CDER est constitué de cinq divisions de recherche [3] :

- Division bioénergie et environnement ;
- Division énergie éolienne ;
- Division énergie solaire photovoltaïques ;
- Division hydrogène énergie renouvelables ;
- Division solaire thermique et géothermie.

2. Les unités de recherche affiliées au CDER

2.1. Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES)

Située à BOUISMAIL, cette unité a été créée par arrêté N° 008 du 09 Janvier 1988 de la présidence de la république [**Journal officiel N° 06 du 10 Février 1988**].

On peut résumer ses missions principales e ces trois points :

- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux ; Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes, équipements et des préséries ;
- Etablir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le transfert et la maîtrise de nouvelles technologies ;
- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification ; l'homologation et la certification des équipements développés.

2.2. Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER)

Inaugurée en 1999 et rattachée au centre de développement des énergies renouvelables (CDER), est située dans la ville de Ghardaïa. L'URAER à travers ces programmes de recherches contribue à la maîtrise et au développement de ces technologies.

2.3. Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS)

L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS), rattachée au Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER) est une structure de recherche, créée par Arrêté ministériel n° 76 du 22 mai 2004 au sein de l'EPST CDER.

Les activités de recherche scientifique et de développement technologique menées à l'URERMS s'inscrivent dans le cadre du programme national de recherche en énergies renouvelables, considéré par les pouvoirs publics comme prioritaire et mobilisateur.

La vocation essentielle de l'Unité est la recherche scientifique appliquée et le développement technologique. Elle est chargée d'entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation

pour la promotion et le développement des énergies renouvelables dans les régions sahariennes.

Il s'agit de :

- Collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes ;
- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipements de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse ;
- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne ;
- Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire et éolienne ;
- Entreprendre des travaux de production et de valorisation de la biomasse à des fins énergétiques, environnementales et agronomiques.

3. Historique

Depuis le projet de construction de l'Héliodyne entre 1952 et 1954 [4], une entité située à Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger, actuellement le "Centre de Développement des Energies Renouvelables", assure jusqu'à aujourd'hui la continuité des activités scientifiques dans le domaine des Energies Renouvelables. Néanmoins, cette entité a subi plusieurs changements de statuts et de tutelle. Sommairement, elle a suivi l'évolution ci-après :

- **1959-1962** : Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger (IESUA)
- **1962-1972** : Institut de l'Energie Solaire (IES)
- **1972-1981** : Station de l'Energie Solaire (SES)
- **1981-1982** : Centre de Recherche des Energies Nouvelles (CRENO)
- **1982-1988** : Station d'Expérimentation des Equipements Solaires (SEES)
- **1988** : Création du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Il est placé sous la tutelle du Haut-Commissariat à la Recherche
- **1988** : Rattachement de l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), située à Tipaza, au CDER

- **2002** : Création de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables à Ghardaïa, rattachée au CDER
- **2003** : Le CDER devient un Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique (EPST) à vocation intersectorielle. Il est placé sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Le siège de l'EPST CDER est situé à Bouzaréah, Alger
- **2004** : Création de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS) à Adrar, rattachée au CDER
- **2007** : Création de la filiale commerciale Etudes et Réalisations en Energies Renouvelables (ER2), rattachée au CDER.

4. Domaines d'intervention du CDER

Le CDER intervient dans différents domaines :

- ❖ Montage de projets pilotes de Recherche et de Développement dans le domaine des Energies Renouvelables ;
- ❖ Certification, normalisation et standardisation des équipements de conversion des Energies Renouvelables ;
- ❖ Etudes de faisabilité en Energies Renouvelables ;
- ❖ Expertises et le consulting en Energies Renouvelables ;
- ❖ Formation spécialisée ou à la carte dans le domaine des Energies Renouvelables ;
- ❖ Formation doctorale dans le cadre du LMD.

Chapitre II : Définition des énergies renouvelables
(énergie solaire), introduction aux systèmes PV
connectés aux réseaux électriques

Chapitre II : Définition des énergies renouvelables (énergie solaire), introduction aux systèmes PV connectés aux réseaux électriques

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

1. Généralités sur l'industrie solaire et introduction à l'effet photovoltaïques

Lorsque la lumière atteint une cellule solaire, une partie de l'énergie incidente est convertie directement en électricité sans aucun mouvement ou réaction produisant des déchets ou pollutions. Cette propriété remarquable est au cœur de toute installation photovoltaïque. L'effet photovoltaïque fut observé pour la première fois par Becquerel en 1839 [5] entre des électrodes plongées dans un électrolyte à la lumière.

Dans un solide, c'est en 1876 que l'on observa un phénomène photoélectrique dans le sélénium et ce matériau fut utilisé pour la mesure de la lumière avant que le silicium ne soit développé. Le développement des cellules solaires a suivi les progrès de l'industrie des semi-conducteurs, en particulier ceux de l'industrie du silicium qui constitue le principal matériau à partir duquel sont fabriquées les cellules. Les premières cellules ont été conçues pour permettre une alimentation électrique fonctionnant plusieurs années sur les satellites. De grandes sociétés de l'électronique se sont intéressées, au début, à cette technologie pour alimenter des sites isolés (mesures, télécommunications, balises...) avant que les chocs pétroliers successifs relancent leur intérêt dans les années soixante-dix. À partir de cette période, des sociétés spécialisées dans ce domaine se sont créées, tout d'abord aux USA, ensuite au Japon et en Europe. [6]

La technologie des cellules au silicium est maintenant bien maîtrisée et les nouveaux développements se concentrent sur l'amélioration du rendement et l'abaissement des coûts de fabrication [7].

2. Eléments d'une installation photovoltaïque

Selon la puissance souhaitée, une installation PV peut ne pas avoir les mêmes composants. Cependant, quelques parties ne peuvent être remplacées et doivent exister dans toute installation.

2.1. Modules

En pratique, le projet devra définir le type de modules par ses dimensions ou par le nombre de cellules qu'il comporte. Les modules mono- et polycristallins les plus courants sont composés de 36 cellules disposées en 3 x 12 ou en 4 x 9. Les dimensions des modules dépendent de celles des cellules ; de l'ordre de 100 x 100 mm, avec une tendance vers des cellules plus grandes pour les polycristallines.

Avec l'augmentation de la dimension des centrales photovoltaïques, les constructeurs proposent maintenant des modules composés de plus de cellules, souvent 72 cellules, soit l'équivalent d'un module double [8].

2.2. Câblage de champ

Une centrale photovoltaïque dans la gamme des 100 kW peut fonctionner sous une tension de 2 x 350 V DC avec des courants pouvant atteindre plusieurs dizaines d'ampères.

La qualité du câblage DC est un élément déterminant pour assurer la sécurité et l'efficacité de la production d'énergie.

La tension d'essai du câblage et des éléments (modules compris) est égale à deux fois la tension à vide maximale du générateur photovoltaïque plus 1000 V, soit plus de 2000 V pour l'exemple ci-dessus [9].

Le raccordement des modules représente des milliers de boîtiers de connexion dont la fiabilité est primordiale ; en outre la commodité de montage n'est pas à négliger.

2.3. Câblage de liaison

Les coffrets de raccordement, situés à proximité des capteurs, sont reliés au coffret de l'armoire d'entrée de l'onduleur par des câbles blindés, ou sous tubes métalliques.

La liaison sera conduite par le plus court chemin et la pénétration dans le bâtiment ne devra pas compromettre l'étanchéité de l'enveloppe. Dans la mesure du possible le local pour le montage de l'onduleur sera choisi le plus près possible du champ photovoltaïque.

Certains onduleurs sont livrés dans des armoires étanches, ce qui permet leur montage extérieur, à proximité immédiate des générateurs.

Cet avantage est appréciable dans le cas de montage sur toit plat, ou en terrain, mais il est rarement applicable dans les cas d'intégration architecturale des modules.

2.4. Contacteur côté courant continu (DC)

La plupart des onduleurs, tels que décrits dans le chapitre précédent, sont équipés de tous les dispositifs nécessaires pour assurer la sécurité de fonctionnement et la protection des personnes et du matériel.

Il peut toutefois être nécessaire, ou pratique, de regrouper dans une armoire d'entrée avant l'onduleur les câbles provenant de champs séparés, les sectionneurs DC, les dispositifs de protection anti surtensions.

Le contacteur principal DC doit pouvoir séparer le champ photovoltaïque sous charge. Il ne faut utiliser que des contacteurs conçus et testés pour commuter du courant continu à la tension nominale.

Il ne doit pas être utilisé normalement pour arrêter le fonctionnement de l'onduleur.

Un câblage au plus court diminue les pertes [10]

2.5. Onduleur

Le local de l'onduleur doit être bien ventilé, de façon à permettre l'évacuation de l'énergie thermique produite par les pertes de transformation [11].

2.6. Contacteur côté courant alternatif (AC)

De même si le point d'injection dans le réseau est relativement éloigné, un disjoncteur AC et les protections de ligne seront montés dans une armoire de sortie, à proximité de l'onduleur. Il ne doit pas être utilisé pour interrompre le fonctionnement de l'onduleur.

2.7. Injection-comptage

L'injection dans le réseau s'effectue à travers un tableau de distribution faisant partie de l'installation.

Pour choisir le point d'injection, il faut se rappeler que la centrale photovoltaïque produit un courant de puissance variable, dont le maximum dépend de la puissance installée et des conditions météorologiques. Cette puissance doit pouvoir être absorbée sans perte par les consommateurs présents au point d'injection, ou en amont de ce point.

Tous les systèmes de synchronisation et de sécurité étant déjà compris dans l'onduleur, le point d'injection ne comporte pas de dispositif particulier, à l'exception d'un sectionneur AC et d'une mise en garde relative à la nature particulière de la ligne. Le tableau au point d'injection comporte également les dispositifs de comptage décrits plus loin.

3. Accidentologie

- dans l'installation du Mont-Soleil (500 kW), lors d'un essai, un arc s'est formé sur un disjoncteur, s'est propagé dans tout le local de service et a détruit la régulation et l'onduleur ;
- dans une installation photovoltaïque de 3 x 3 kW sur une ferme, un incendie a complètement détruit les combles et l'installation ; le système fonctionnait à une tension nominale de 100 V mais les sectionneurs de ligne étaient garantis jusqu'à 60 Vdc. L'enquête prétend que l'incendie s'est déclaré à la suite d'une perturbation d'un répartiteur de charge qui était monté dans un boîtier polyamide inflammable. Ce boîtier était monté sur une poutre dans le grenier à foin. Tout ayant brûlé, on peut supposer que l'incendie a plutôt été provoqué par le boîtier qui s'est enflammé par un arc provenant d'un mauvais contact. Le sectionneur n'ayant pas été déclenché, l'hypothèse du mauvais contact est plus plausible.

Ce chapitre nous a permis de comprendre le fonctionnement d'une installation PV, qui met en relation plusieurs composants et c'est grâce à l'effet photovoltaïque que cette installation pourra se mettre en état de marche.

Le chapitre suivant nous allons commencer l'analyse des risques sur ces installations pour voir les défaillances qui pourront avoir lieu.

CHAPITRE III : analyse des risques au niveau des installations PV connectées aux réseaux électriques

CHAPITRE III : analyse des risques au niveau des installations PV connectées aux réseaux électriques

Dans cette partie du document, nous allons recenser tous les dangers qui existent dans l'installation et les risques potentiels auxquels peuvent être exposés les employés. Nous définissons ensuite les scénarios et nous estimons la sévérité des effets néfastes qu'ils pourraient causer sur la population, l'environnement et les biens matériels. Cette étude permet aussi de fournir des informations sur la probabilité d'occurrence des événements redoutés centraux identifiés.

Aussi, dans ce chapitre nous commençons par une description de l'installation et de son environnement. Ensuite, nous présentons la méthodologie utilisée pour cette étude et les différents scénarios qui pourront s'y dérouler.

1. Description du process (Cas du SPVCR du CDER)

L'installation PV du CDER est constituée d'un GPV de 90 modules solaire totalisant une puissance installée de 9,54 kWc sur une surface de 70 m², les modules sont de type Isofoton d'une puissance de 106Wc et une tension de 12V. Le GPV est partagé en trois champs de 30 modules pour une puissance installée de 3,18 kWc. Chaque champ PV est structuré en deux (02) branches parallèles de 15 modules en série. Les trois champs identiques sont connectés au réseau de distribution à travers trois onduleurs monophasés de type FRONIUS IG30 d'une puissance nominale de 2,5kW.

Les tableaux III.1 et III.2 [6] donnent les caractéristiques électriques spécifiés dans les fiches techniques du module PV et de l'onduleur.

Tableau III.1: Caractéristiques du module PV, Isofoton I_106Wc/12V

Symbole	Paramètres	Valeur	Unités
$NOCT$	Température de fonctionnement nominale de la cellule	47	°C
V	Tension nominale	12	V
P_{max}	Puissance Max	106 ±5%	Wc
I_{sc_ref}	Courant de court-circuit	6,54	A
V_{oc_ref}	Tension en circuit ouvert	21,8	V
I_{mpp_ref}	Courant MPP	6,1	A
V_{mpp_ref}	Tension MPP	17,4	V

Tableau III.2: Caractéristiques de l'onduleur PV, FRONIUS IG30 2.5 kW

Symbole	Paramètres	Valeur	Unités
V_{mpp}	Limites de la tension MPP	150 - 400	V
P_n	Puissance AC nominale	2500	W
$\cos \varphi$	Facteur de puissance	1	
f	Limites de la Fréquence	49,8- 50,2	Hz
$V_{réseau}$	Limite de la tension réseau	195 – 253	V
η	Rendement	92,7 - 94,3	%

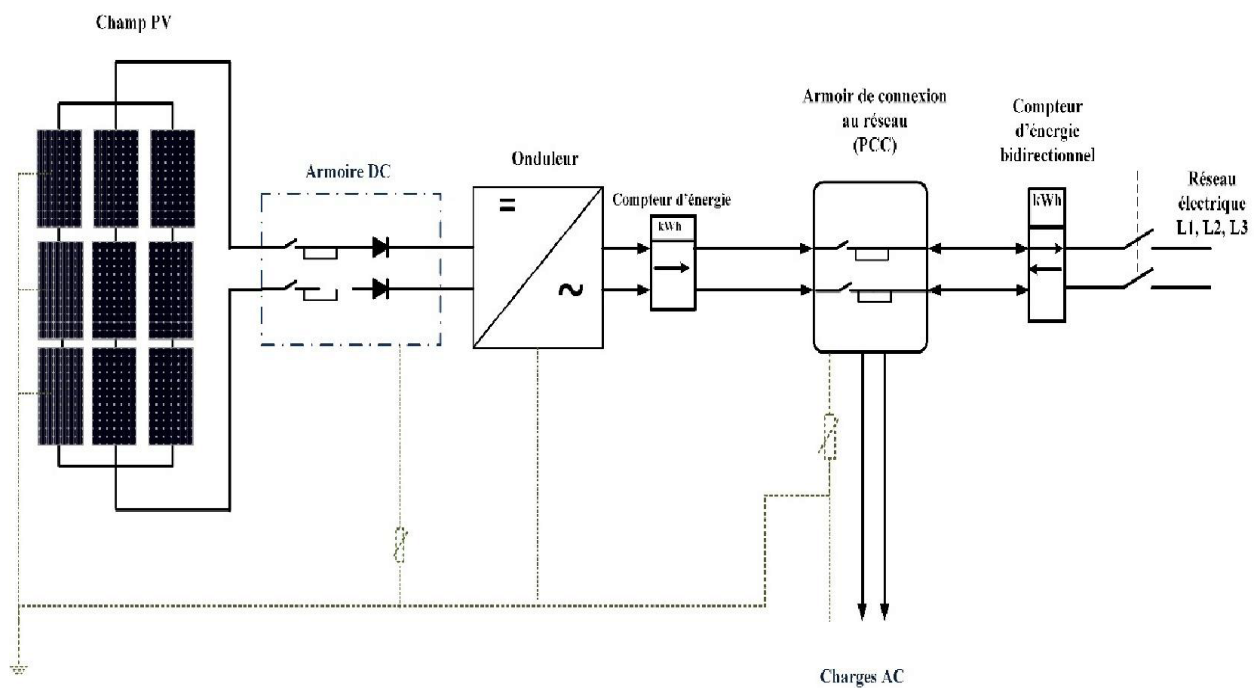


Figure III.1: Schéma d'un SV connecté aux réseaux électriques

2. Présentation de la méthode d'analyse de risque

Le processus d'évaluation de risque est illustré à la Figure III.2. En premier lieu, les dangers liés à l'installation sont identifiés par la méthode HAZID (HAZard Identification), ce qui permet de définir les scénarios d'accidents. Par la suite, on estime les conséquences potentielles puis on évalue les fréquences de ces scénarios basés sur un historique d'accident (Nous prenons en compte les accidentologies dans les installations qui existent déjà). Finalement, on estime et évalue les risques [12].

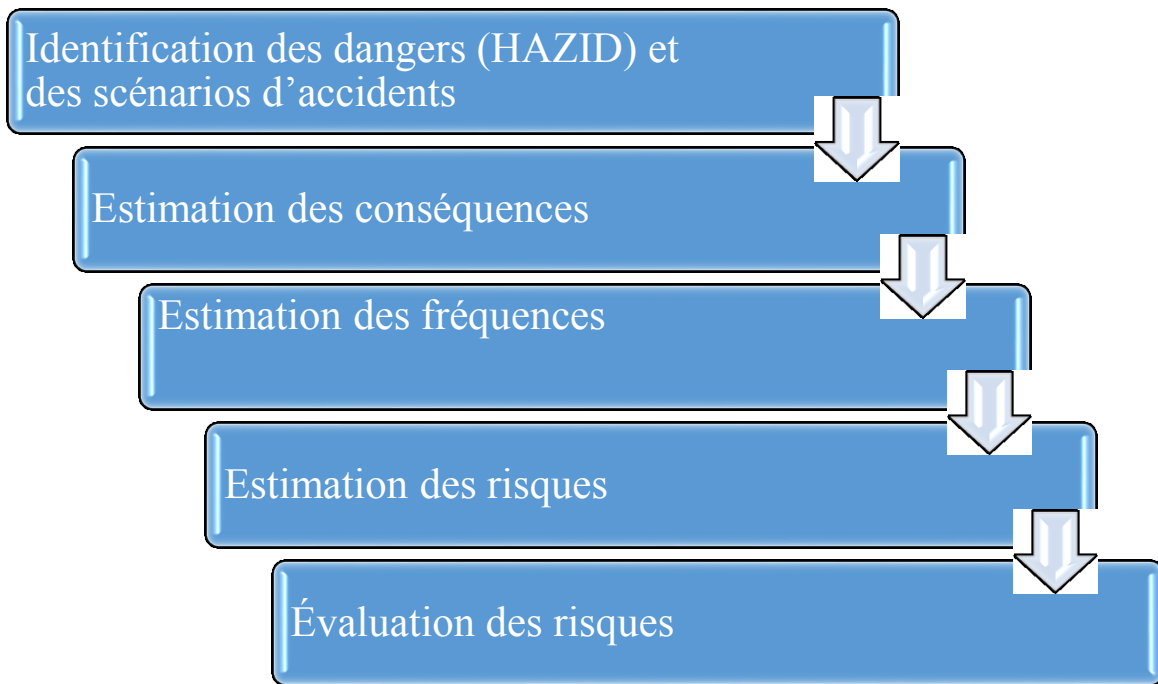


Figure III.2: Processus d'analyse de risques

2.1. Identification des dangers (HAZID) et des scénarios d'accidents

Cette étape vise à identifier les sources de dangers reliés à l'installation. En utilisant la méthode HAZID, nous pouvons identifier des sources de danger externes et internes à l'installation, leurs causes, ainsi que l'identification des mesures d'atténuation qui seront mises en place. Cette identification tient compte autant des sources chroniques de danger engendrées par le fonctionnement normal ou quasi normal que des sources de danger de caractère accidentel.

Tableau III.3: Identification des potentiels de danger par la méthode HAZID

Danger	Cause	Conséquence	Mesure de sécurité proposée
Dangers liés à la conception			
Matière isolante des panneaux PV non adaptée	Erreur dans le choix des matériaux	Electrocution du personnel.	Application des normes et critères de conception
Dangers liés au fonctionnement/manipulation			
Formation d'un arc électrique	Contacts défectueux Vis mal serré ou corrodé	Incendie Destruction du module provoquant l'arc.	Utiliser des équipements DC et assurer qu'ils sont bien isolés
Production d'étincelle	Mauvais serrage Mauvais dimensionnement des câbles	Incendie	Application des normes et critères de conception Refaire les serrages deux fois tous les 6 mois
Dangers liés aux conditions météorologiques			
Dépôt de sable	/	Corrosion et pertes financières	Assurer le nettoyage des modules.
Phénomène de jaunage	Forte exposition au soleil.	Diminution de la performance Pertes financières.	/

2. 2. Méthodologie d'estimation des conséquences

La deuxième étape de l'analyse de risque c'est l'estimation de la gravité des conséquences. Nous avons pris en compte trois éléments qui peuvent être affectés : Les Hommes, les biens et l'environnement.

Pour passer du niveau qualitatif au niveau quantitatif, nous proposons la grille suivante comme le montre le tableau III.4 :

Tableau III.4: Estimation de la gravité

Niveau de gravité	Hommes	Biens	Environnement
1. Catastrophique	Décès ou blessure causées par l'exposition directe.	<ul style="list-style-type: none">• Dommages majeurs aux propriétés nécessitant l'abandon des bâtiments.• Panne d'électricité majeure nécessitant plusieurs jours de réparation	<ul style="list-style-type: none">• Les espèces régionales / sous espèces sont éliminées.• Contamination d'aquifère et de l'eau potable.
2. Critique	<ul style="list-style-type: none">• Incapacités permanentes ;• Blessures sévères ;• Maladies graves.	<ul style="list-style-type: none">• Dommages importants.• Panne d'électricité inférieure à 1 journée.	<ul style="list-style-type: none">• Dommages locaux ou dommages aux espèces ou sous-espèces locales.• Contamination de puits d'eau potable individuels.
3. Marginale	<ul style="list-style-type: none">• Blessures ou maladies ne résultant pas en incapacité ;• Perte majeure de la qualité de vie.• Maladies légères	<ul style="list-style-type: none">• Délestage de la ligne électrique.• Dommages mineurs.	<ul style="list-style-type: none">• Une partie des organismes locaux est soumis à un impact négatif.
4. Négligeable	<ul style="list-style-type: none">• Atteinte mineure à la qualité de vie.	<ul style="list-style-type: none">• Pas d'impact mesurable dans les environs.	<ul style="list-style-type: none">• Aucun dommage ni interruption de courant.

2.3. Méthodologie d'estimation des fréquences

La fréquence des dangers est la possibilité qu'un danger identifié résulte en un accident. Les indices pour exprimer la probabilité des dangers ou leur fréquence ont été conçus de façon pratique pour être facilement compris par les personnes ayant à évaluer les risques.

Les scénarios d'accidents retenus pour une évaluation quantitative de leurs conséquences ont également été soumis à une évaluation de leurs fréquences d'occurrence. Ces fréquences ont été estimées en se basant sur les fréquences observées dans des installations similaires.

La grille que nous proposons pour le niveau de fréquence est donnée dans le tableau III.5 :

Tableau III.5: estimation de la probabilité

Classe de probabilité	évènement	Définition	Probabilité
4	Fréquent	Plusieurs fois dans la durée d'exploitation de l'installation	$\geq 10^{-1}$ /an (plus d'une fois tous les 10 ans)
3	Possible	Une fois dans la durée d'exploitation de l'installation	de 10^{-2} inclus à 10^{-1} (une fois tous les 10 à 100 ans)
2	Rare	Est arrivé dans l'industrie	de 10^{-4} inclus à 10^{-2} (une fois tous les 100 à 10 000 ans)
1	Extrêmement rare	Concevable, est arrivé dans l'industrie, tous domaines confondus	$< 10^{-4}$ (moins d'une fois tous les 10 000 ans)

2. 4. Méthodologie d'estimation/d'évaluation des risques

La matrice pour l'évaluation des risques est utilisée pour déterminer et exprimer l'évaluation des risques et l'efficacité des contrôles pour les dangers identifiés. La matrice sert à hiérarchiser les dangers potentiels. La matrice de risques utilisée est illustrée au tableau III.6.

Tableau III.6: matrice des risques

Gravité	Fréquence				
		1	2	3	4
4		2	2	3	3
3		1	2	2	3
2		1	1	2	2
1		1	1	1	2

Le niveau de risque d'un événement est déterminé par la combinaison de sa classe de probabilité et de son niveau de gravité.

Les niveaux de risques sont (**Figure III.3**) :

- **Risques de niveau 1** : risques limités (jaune) ;
- **Risques de niveau 2** : risques à surveiller ou à réduire, d'autant plus qu'ils sont limitrophes de risques de niveau 3 (orange) ;
- **Risques de niveau 3** : risques élevés. Ce niveau de risques est inacceptable et ne doit pas être observé au sein de l'installation (rouge).

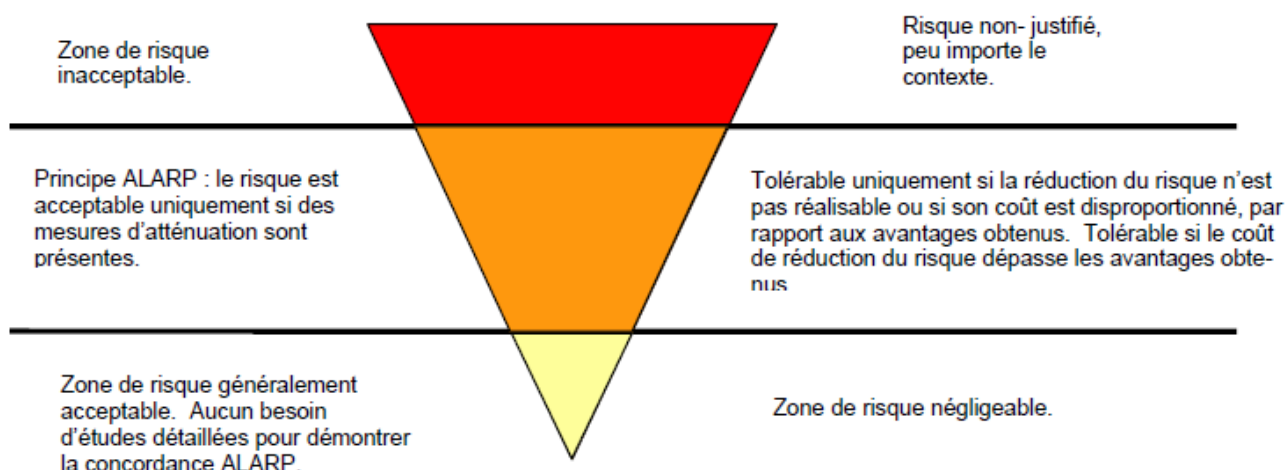


Figure III.3 : Modèle développé par le Health and Safety Directive, UK

Remarque :

- Les classes de probabilité sont inspirées de la réglementation française.

Les résultats auxquels nous avons aboutis suite à cette démarche d'analyse des risques sont représentés sur le tableau III.7.

Tableau III.7: Résultats de l'analyse des risques par la méthode HAZID

Numéro de scénario	Scénario	Fréquence	Gravité			Risque		
			H	E	S	H	E	S
1	Incendie suite à un mauvais serrage des vis et formation d'un arc électrique	3	2	2	1	2	2	1
2	Défaillance des isolants des modules et électrocution de l'ouvrier	2	3	2	2	2	2	2
3	Jaunage des modules	3	1	1	4	1	1	3
4	Incendie suite à un réchauffement des câbles	3	3	2	2	3	2	2

Nous remarquons que le phénomène du jaunage des panneaux PV a une criticité de 3, il faut donc prévoir une prévention pour ces panneaux qui sont exposés aux rayons solaires car ceci diminuerait leur efficacité.

Le réchauffement des câbles également représente un évènement très critique qui devrait être évité. Généralement, un mauvais dimensionnement provoque ce réchauffement qui peut se terminer par un incendie.

3. Recommandations

Notre étude nous a permis de constater la nécessité de prendre certaines dispositions dans différents domaines :

- Prévention contre les chocs électriques

En raison des spécificités d'un générateur photovoltaïque, et des dispositions de l'installation électrique, il est demandé d'utiliser des connecteurs PV en amont du premier coffret de regroupement et des câbles unipolaires avec une isolation renforcée équivalente à la classe II.

Les surintensités doivent être maîtrisées afin d'éviter la destruction des câbles et autres composants.

- Protection de découplage

Toutes les installations photovoltaïques raccordées au réseau doivent comporter une protection de découplage. Ce type de protection est destiné à séparer le réseau public de distribution en cas de défaut sur ce réseau. Cette protection a pour objet, en cas de défaut sur le réseau, de :

- éviter d'alimenter un défaut ou de laisser sous tension un ouvrage en défaut,
- ne pas alimenter les autres installations raccordées à une tension ou à une fréquence anormale,
- permettre les ré-enclenchements automatiques des ouvrages du réseau.

La protection de découplage doit en outre arrêter l'injection d'électricité dans le réseau lors des travaux de maintenance du réseau.

- Sectionnement et coupure d'urgence :

L'onduleur doit pouvoir être mis hors tension en cas de danger (défaut, échauffement, etc.) à l'aide d'une coupure d'urgence. De même, la maintenance de l'onduleur doit pouvoir être assurée en toute sécurité après sectionnement. Des dispositifs de coupure

et de sectionnement sont placés en amont coté courant continu et en aval coté courant alternatif et au plus près de celui-ci.

- Vérification des installations

La vérification est une opération destinée à contrôler la conformité d'une installation électrique aux exigences réglementaires et normatives en vigueur. Elle doit avoir lieu :

- au moment de la mise en service,
- périodiquement,

Ces vérifications sont réalisées par des organismes accrédités. Pour certaines, l'employeur peut faire appel à une personne compétente de l'entreprise remplissant certains critères.

Les résultats des vérifications sont consignés dans un registre, avec en annexe les rapports des organismes accrédités.

- Equipements de protection individuelle (EPI)

La protection individuelle n'est envisageable que lorsque toutes les autres mesures d'élimination ou de réduction du risque électrique ne permettent pas d'assurer la sécurité des personnes. Les principaux équipements de protection individuelle contre le risque électrique sont :

- Casque isolant
- Casque de protection contre les projections de particules en fusion
- Protection oculaire et faciale
- Gants en matériaux isolants
- Chaussures isolantes
- Vêtements de protection isolants.

Conclusion générale

1. Les résultats de l'évaluation du risque sont exprimés sous forme d'une matrice d'évaluation des scénarios d'accidents. Les indices de gravité ont été conçus pour distinguer diverses conséquences telles que :

- 1) Population : intégrité physique (santé et sécurité) des personnes dans le secteur affecté au moment de l'incident ;
- 2) Environnement : impacts environnementaux ;
- 3) Propriétés : dommages à la propriété et aux infrastructures.

2. Les installations PVCR demande un investissement très important, l'erreur donc n'est pas tolérable ;

3. 50% des risques auxquels sont exposés les salariés ont une criticité moyenne, et ça nécessite des moyens de prévention/protection pour réduire le risque ;

4. 25% des risques sur les Hommes et les Biens ont une criticité très élevée, et doivent être éliminés.

5. Des barrières de sécurité doivent être mises en place pour maîtriser les risques dans ce type d'installation.

Références bibliographiques

- [1] Programme National des Energies Nouvelles et Renouvelables.
- [2] INRS, Accidents d'origines électriques. [En ligne]. [Consulté le 10/12/2016]. Disponible sur <<<http://www.inrs.fr/risques/electriques/accidents-origine-electrique.html>>>
- [3] <<La division d'évaluation du potentiel énergétique>>, bulletin énergétique n° 1, 2002.
- [4] Centre de Développement des Energies Renouvelables, EPST. [En ligne]. [Consulté le 18/12/2016]. Disponible sur << www.CDER.dz >>.
- [5] T.MORNAY, <<Les cellules photovoltaïques>>, institution des chartreux, 2005
- [6] S. BOUCHAKOUR, <<contribution à l'étude et commande d'un couplage des systèmes hybrides (réseau et photovoltaïque) pour la production d'énergie électrique>>, page 45.
- [7] Office fédérale des questions conjoncturelles, <<centrales PV guide pour le dimensionnement>>, 2015.
- [8] J-P MENIN, <<Maîtriser le risque lié à une installation PV>>, 2013
- [9] S. DUPLANTIER, <<Prévention des Risques associés à l'implantation de cellules photovoltaïques sur des bâtiments industriels ou destinés à des particuliers>>, INERIS, 2010
- [10] B. BOUKEZATA, A. CHAOUI, J.P GAUBERT, M. HACHEMI. <<Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle>>. Symposium de Génie Électrique, 2014
- [11] F.NORGEUX, <<risque électrique et habilitation électrique>>, retraite et santé au travail, 2015.
- [12] I. DJAOUT, <<Méthode d'analyse de risques dans les entreprises générant des produits à risques>>, thèse soutenue 2009.