



Université Saâd Dahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par : MOKHTARI Nassira

Pour l'obtention du diplôme :

MASTER en Énergies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Etude technico-économique d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau

Soutenu devant le jury composé par :

Mr. DOUMAZ	Toufik	USDB	Président
Mr. BOUZAKI	Mustapha	USDB	Examineur
Dr Amrouche	Badia	USDB	Encadreur
Dr AIT SAHED	Oussama	USDB	Co-encadreur

Septembre 2018

Résumé

Le présent travail se porte sur l'étude technico-économique d'une centrale PV connectée au réseau. En appliquant la méthode cout du cycle de vie (LCC de l'anglais life cycle cost). Cette analyse est accompagnée par le développement d'une application software sous Matlab pour faciliter la tâche de l'étude technico-économique. Ainsi l'utilisateur pourrait avoir le résultat recherché en introduisant les caractéristiques de sa centrale PV telles que la capacité de la centrale PV, ses composants et leurs paramètres ...etc.

Mots clés : Etude technico-économique, centrale PV, coût du cycle de vie, application software.

ملخص

يرتكز عملي على الدراسة التقنية والاقتصادية لمحطة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة. من خلال تطبيق طريقة تكلفة دورة الحياة (LCC de l'anglais life cycle cost) لهذا الغرض، ووضع تطبيق تحت Matlab لتسهيل مهمة الدراسة التقنية والاقتصادية، وبالتالي يمكن للمستخدم الحصول على نتيجة البحث عن طريق إدخال خصائص المحطة الكهروضوئية مثل قدرتها الكهروضوئية، ومكوناتها، ومعلوماتها.

الكلمات المفتاحية: الدراسة التقنية والاقتصادية، لمحطة الكهروضوئية، تكلفة دورة الحياة، تطبيق.

Abstract

The present is about the technico-economic study of a PV plant connected to the network. By applying, the Life Cycle Cost (LCC) method for developing an application under Matlab to facilitate the task of the techno-economic study. Thus, the user could have the results of the study by introducing the characteristics of the PV plant such as its components and their parameters.

Keywords: Technico-economic study, PV plant, the Life Cycle Cost Analysis, Software application.

Dédicace

Je dédie ce travail

A Mes chères Parents qui m'ont soutenue durant toutes ces années d'études
et qui ont été toujours présents pour me pousser toujours vers plus d'effort ;

A tous ma famille.

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, sans exception à la
réalisation de ce travail.*

Remerciements

Après avoir rendu grâce à **Dieu** le tout puissant et le Miséricordieux nous tenons à remercier vivement tous ceux qui. De près ou de loin ont participé à la rédaction de ce document.

Je remercie ma promotrice **Mme AMROUCHE Badia**, Docteur en Energies Renouvelables à l'université de BLIDA (1)/département des EnR pour sa disponibilité, sa rigueur scientifique et son sens d'écoute et d'échange, sans oublier mon copromoteur **Mr Ait Sahed**, pour son aide, son assistance et sa disponibilité. ;

Tout le corps des enseignants du département des EnR/ université de BLIDA (1) qui nous ont fait bénéficier d'une formation pluridisciplinaire de haut niveau et adaptée aux réalités des Energies Renouvelables ;

Je tiens également à remercier Monsieur **Meguenni** chef de département des Energies Renouvelables, et tout le staff administratif, ainsi que mes chers enseignants

Je tiens à remercier mes chers **Parents**, pour leurs encouragements, leur sacrifice, et leur soutien permanent, aussi moral que financier, ainsi que toute la famille ;

Je tiens également à remercier tous mes **Amis** et tous les étudiants de mastère Energies Renouvelables, et tous ceux qui m'ont soutenue moralement pendant la réalisation de ce travail pour leurs patience et leurs encouragement.

Nomenclature - Symboles-Acronymes

PV : Photovoltaïque

LCC : Life Cycle Cost

V : Volt

MW : Méga Watt

DC : Courant continu

MΩ : méga Ohm

UV : ultraviolet

AC : Courant alternatif

KWc : Kilo watt crête

kWh/an : Kilo watt heure par an

€/an : Euro par an

RAEE : Auvergne Rhone –Alpes Energie Environnement

C.P.E.S : Centrale de production d'énergie solaire

ERDF : électricité réseau distribution France

SDIS : Service départemental d'incendie et de secours

DEEE : les déchets d'équipements électriques et électroniques

CE : caisse d'épargne

UE : Union européenne

CCV : coût du cycle de vie

C Dév : coût de développement

C pann : coût des panneaux PV

C Elect : coût électrique

C civil : coût civil

C o &M : coût d'opération et maintenance

Pc : puissance crête de la centrale photovoltaïque (Wc)

I_r : Irradiation moyenne mensuelle reçue par le capteur photovoltaïque correspondant au mois le plus défavorable

E_c : Energie consommée (Wh)

K : coefficient de correction

AM : masse d'air

V_{co} : tension à vide

I_{cc} : courant court-circuit

U_{mpp} : tension maximale power point

I_{mpp} : courat maximale power point

GUIDE : Graphical User interface Developpement Environnement

Table des matières

Résumé	I
ملخص	I
Abstract	I
Dédicace	II
Remerciements	III
Nomenclature - Symboles-Acronymes	IV
Listes des figure	VIII
Liste de tableaux	X
Introduction générale	
I. Introduction générale	2
Chapitre I : Le projet de centrale photovoltaïque	
I.1 Introduction.....	7
I.2 Les centrales PV connectées au réseau électrique	7
I.2.1 Définition	7
I.2.2 Principe de fonctionnement	7
I.2.3 Eléments d'une installation	8
I.2.3.1 Modules PV	8
I.2.3.2 câblage courant continu (des modules aux onduleurs)	9
I.2.3.3 Câblage de liaison	11
I.2.3.4 Contacteur côté courant continu (DC)	11
I.2.3.5 Onduleur.....	11
I.2.3.6 Contacteur côté courant continu (AC)	12
I.2.3.7 Injection-comptage	12
I.3 Cycle de vie d'une centrale PV connectée au réseau.....	12
I.3.1 Etude technicoéconomique	12
I.3.1.1 Faisabilité technique.....	12
I.3.1.2Economié de projet.....	14

I.3.2 Les étapes de la vie du parc photovoltaïque	15
I.3.2.1 Étapes préliminaires:défrichage et débroussaillage.....	15
I.3.2.2 La construction du parc–déroulement du chantier	15
I.3.2.2.1 Généralités	15
I.3.2.3 Préparation du chantier	16
I.3.2.4 Aménagement des voiries, des aires de grutage et de la plateforme pour la citerne d'eau	16
I.3.2.5 Pose des structures et des panneaux	17
I.3.2.6 Installation des réseaux de câbles	18
I.3.2.7 Installation des postes électriques.....	18
I.3.2.8 Réalisation des connexions	19
I.3.2.9 Essais.....	19
I.3.2.10 Mise en service et repli du chantier.....	19
I.3.3 Exploitation de la centrale photovoltaïque.....	19
I.3.3.1 Maintenance du site.....	19
I.3.3.2 Entretien de l'installation.....	20
I.3.3.3 Sécurité.....	20
I.3.4 Le démantèlement du parc en fin de vie	21
I.3.5 La phase étude technicoéconomique.....	23
I.4 Conclusion	24
Chapitre II : La méthode LCC pour le projet PV	
II.1 Introduction.....	26
II.2 Définition	26
II.3 Applplication de la méthode LCC pour le projet PV.....	26
II.3.1 Développement.....	28
II.3.1 .1 Coût du terrain	28
II.3.1 .2 Estimation de la puissance crête de la centrale photovoltaïque.....	28
II.3.2 Modules PV	29

II.3.2 .1 Les technologies.....	29
II.3.2.2 Les caractéristique d'un panneau PV	29
II.3.3 Coût de la centrale PV.....	30
II.3.3 .1 Coût des panneaux photovoltaïques.....	31
II.3.3.2 Coût d'investissement	31
II.4 Conclusion	32

Chapitre III: Développement des interface graphique sous matlab

III.1 Introduction	34
III.2 Descriptipn de l'outil développé	34
III.2.1 La barre d'outil	35
III.2.2 Le plan de disposition.....	36
III.2.3 Palette des composants	36
III.2.4 L'inspecteur de propriétés et le callback	36
III.3 Présentation des interfaces de l'application.....	38
III.4 Exemple d'application	41
III.5 Conclusion.....	43
Conclusion générale.....	45
Bibliographie et webographie.....	43

Listes des figure

Introduction générale

Figure 1 : Développement de la capacité photovoltaïque mondiale (MW) [1]...3

Chapitre I : Le projet de centrale photovoltaïque

Figure I. 1: Schéma de principe de fonctionnement d'un parc photovoltaïque.....8

Figure I. 2 : Réseau de modules en série-parallèle.....9

Figure I. 3 : Coffret de raccordement.....10

Figure I. 3 : Câblage PV modèle MC.....11

Figure I. 5 : Construction de la centrale photovoltaïque de Puits Castan – Aude A gauche : montage des structures – A droite : mise en place des panneaux sur lesstructures.....17

Figure I. 6 : Installation d'un poste électrique (Source EOLE-RES).....18

Figure I.7 : Centrale photovoltaïque de Puits Castan – Aude (Source EOLE-RES) A gauche : Câblage des panneaux – A droite : Boitier de raccordement..... 19

Figure I. 8: Vie d'une installation photovoltaïque (PV Cycle).....22

Chapitre II : La méthode LCC pour le projet PV

Figure II. 1 : Caractéristique Courant-tension30

Figure II. 2 : coût d'investissement moyens des composants de l'installation PV (100% du coût total de l'investissement 31

Chapitre III : Présentation de l'outil développé

Figure III. 1 : Interface GUIDE 35

Figure III. 2 :Inspecteur de propriété du Push Button Mapping 37

Figure III. 3: Interface d'accueil d'étude technicoéconomique 38

Figure III. 4 Plan de disposition du GUI pour la première interface..... 39

Figure III. 5: La premier interface développée 39

Figure III.6 : Présentation de la deuxième interface..... 40

Figure III.7 :Présentation de l'application software développée 41

Figure III.8 :les données et les résultats pour panneau solaire 150W mono cristallin de prix de 1666372.5 pour une centrale PV de 1MW 42

Figure III.9 :les données et les résultats pour panneau solaire 150W mono cristallin de prix de 1666372.5 pour une centrale PV de 5MW 42

Liste de tableaux

Chapitre II : Présentation de l'outil développé

Tableau II 1 : modèle de calcul du cycle de vie (LCC) pour le système PV.....	27
Tableau II 2 : Comparaison entre les technologies des modules photovoltaïque	29
Tableau II 3 :Prix des panneaux solaire des marques condor	31

Introduction générale

I. Introduction générale

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît depuis plus de **10 ans**, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à **40% par an**. Voir figure (1-1)

Cette croissance **exceptionnelle**, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance [1].

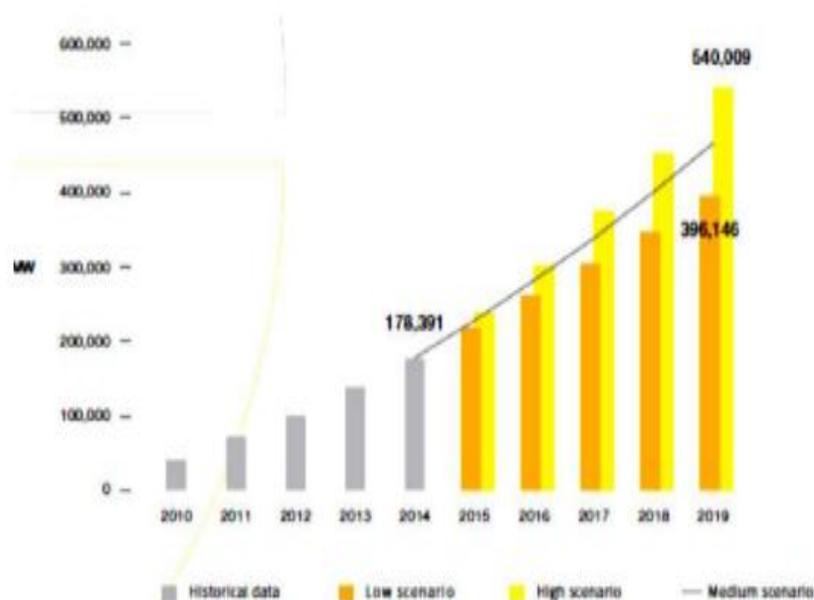


Figure 1.1 Développement de la capacité photovoltaïque mondiale (MW)

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau..... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV [1].

Une installation photovoltaïque ne génère pas de gaz à effet de serre durant son fonctionnement. Elle ne produit aucun déchet dangereux et n'émet pas de polluants locaux.

L'Agence internationale de l'énergie calcule qu'une installation photovoltaïque raccordée au réseau fournit l'équivalent de l'énergie nécessaire à sa fabrication dans un délai de un à trois ans, selon l'ensoleillement du site. Du point de vue des émissions évitées, elle estime que 1Kw photovoltaïque permet d'économiser entre 1,4 t et 3,4 t de CO₂ sur sa durée de vie. En 2030, selon les chiffres avancés par l'Association européenne du photovoltaïque, le solaire photovoltaïque permettra de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 1,6 milliard de tonnes par an, soit l'équivalent de la production de 450 centrales au charbon d'une puissance moyenne de 750 MW [2].

Mais la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un certain impact sur l'environnement qui justifie la mise en place progressive d'obligations d'intégrer le démantèlement et le recyclage des installations en fin de vie [3].

Le choix technique et économique de l'une des formes des énergies renouvelables sur des sites enclavés et éloignés, principalement en zones semi-arides et arides, est tributaire de la connaissance de plusieurs paramètres, à savoir : la puissance électrique requise, le coût d'investissement, et les contraintes d'accès au site d'implantation [4].

Cependant, pour établir un réel équilibre entre les contraintes techniques et les critères de viabilité économique, la conception technique et économique doit se faire en un seul processus : l'analyse technico-économique. Cette approche est de plus en plus suivie pour la conception de nouveaux systèmes d'énergie notamment les systèmes hybrides de production d'électricité, mais dans ces études, seul le Life Cycle Cost (LCC) ou le Levelized Cost Of Energy sont généralement utilisés comme critères économiques [5].

Dans ce travail de recherche, consiste à développer une application software permettant de faire l'étude technico-économique d'une centrale PV connectée au réseau, réalisé en trois chapitres et une conclusion générale.

Le chapitre 1 : présente d'une centrale PV connectée au réseau, avec ses composantes. Nous décrivons ensuite Analyse Cycle de vie, ainsi que en détaillant la phase étude technico-économique de cette centrale photovoltaïque.

Le chapitre 2 : présente la méthode LCC pour le projet de centrale PV, Ensuite Description de l'application de la méthode LCC pour faire l'étude technico-économique.

Le chapitre 3 : permet l'exploitation de données techniques et économique des chapitres précédents pour développer une application permettant de faire l'étude technico-économique d'une centrale PV connectée au réseau. Nous présentons la simulation d'une cette centrale sous l'environnement Matlab Simulink

Chapitre I

Le projet de centrale photovoltaïque

I.1 Introduction

Le photovoltaïque raccordé au réseau est constitué de systèmes de production d'électricité photovoltaïque ; qui peuvent être *centralisés* (*centrale solaire photovoltaïque*) ou *décentralisés* (toits de maisons individuelles, de mairies, de garages, etc.) [6].

Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment de l'électricité produite en courant alternatif de 220V ou 380V, ainsi que le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où [7].

Dans ce chapitre, nous commençons par la présentation d'une centrale PV connectée au réseau. On commence par leurs fonctionnements ; et ses composantes et la conception de système. Nous présentons aussi le cycle de vie d'une centrale PV connectée au réseau.

I.2 Les centrales PV connectées au réseau

I.2.1 Définition

L'expression « *centrale photovoltaïque* » un terme générique. On utilisera les notions de « *parcs photovoltaïques* » pour les installations en forêt et de « *fermes photovoltaïques* » pour les installations sur des terres agricoles [8].

Une centrale solaire photovoltaïque est composée de plusieurs champs de panneaux solaires comportant un grand nombre de cellules photovoltaïques convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité. Elle permet de produire de **l'électricité à grande échelle** [9]. Elles rassemblent plusieurs modules solaires photovoltaïques reliés en série ou en parallèle, qui sont des générateurs de courant continu. La centrale peut aussi une quelques MW à plusieurs dizaines de MW [10].

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le rayonnement du soleil sur les modules photovoltaïques est transformé en courant électrique continu acheminé vers un **onduleur**. L'onduleur convertit cette électricité en **courant alternatif** compatible avec le réseau [11].

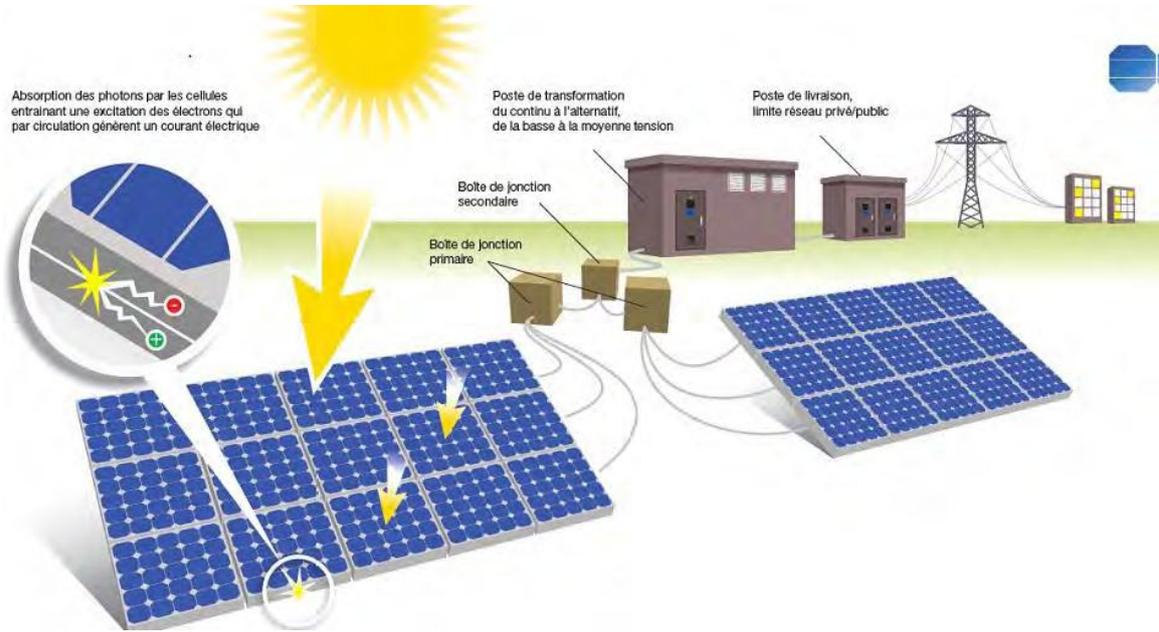


Figure I.1 : Schéma de principe d'un parc photovoltaïque [11].

En pratique, la puissance délivrée par un module varie en fonction de l'énergie solaire reçue qui dépend du jour, de l'heure, de la météo, de l'orientation du système et de sa température. La puissance-crête n'est que rarement atteinte par le module au cours de sa vie en fonctionnement [11].

L'implantation des panneaux solaires doit éviter les effets de l'ombrage qui peuvent limiter le rayonnement solaire [11].

La production photovoltaïque dépendra de l'irradiation reçue, de la puissance crête des modules et du rendement du système (prise en compte notamment des pertes câbles entre les modules et le point d'injection du courant alternatif) [11].

I.2.3 Éléments d'installation

I.2.3.1 Modules PV

Les modules sont un assemblage de photopile (ou cellules) montées en série, afin d'obtenir la tension désirée (12V, 24V ...). La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement solaire [. Plusieurs cellules sont associées dans un

module qui est la plus petite surface de captation transformable, montable et démontable sur un site.

Les modules sont regroupés en panneaux, qui sont à leur tour associés un série ou parallèle pour obtenir des champs photovoltaïques selon les besoins. Les cellules photovoltaïques sont réalisées principalement par le silicium cristallin, qui est utilisé sous forme monocristalline ou multi-cristalline en plaquette ou en ruban ou encore en couches semi-minces sur substrat selon les technologies récentes. Les modules sont associés en série et en parallèle pour avoir le courant /tension dérivée. Les cellules PV sont protégées contre l'échauffement en insérant une diode dite « diode by-pass » en parallèle de diode dite la court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti-retour », qui a une chute de tension négligeable.

Les associations série-parallèle des modules et des diodes sont présentées sur la figure ci-dessous [12].

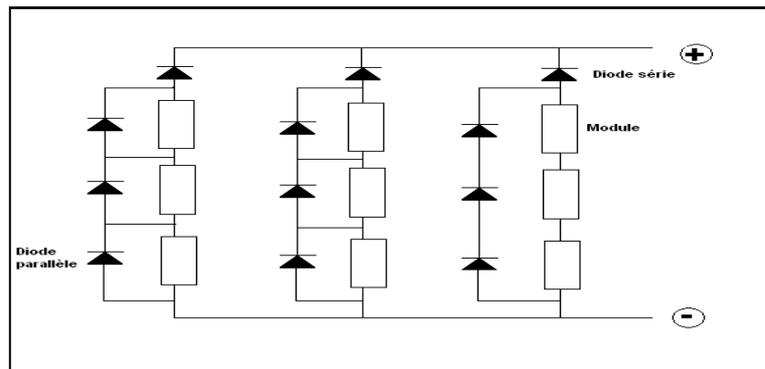


Figure I.2 : Réseau de modules en série-parallèle [12]

I.2.3.2 Câblage courant continu (des modules aux onduleurs)

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. 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. La plupart des modules courants ont des borniers avec serrage à vis qui devraient

être contrôlés régulièrement, mais la tendance à utiliser des connecteurs embrochables

apparaît, surtout pour les modèles destinés à l'intégration. On commence à trouver également des boîtiers avec borniers avec contacts à ressort. Le câblage du champ proprement dit est déterminé d'une part par les critères de mise en série et en parallèle des modules et d'autre part par la disposition géométrique des éléments, lesquels sont souvent préassemblés et pré-câblés par groupes. La perte d'énergie est proportionnelle au carré du courant, ce qui justifie dans les installations importantes de travailler avec des tensions importantes. Les diodes de chaînes en série entraînent des chutes de tension de l'ordre de 0.5 V pour les diodes Schottky et 1.1 V pour les autres, ce qui engendre des pertes de puissance proportionnelles au courant des chaînes. Les résistances de contact dans les borniers et dans les contacteurs entraînent également des pertes qui ne sont pas négligeables. Les résistances de passage peuvent atteindre 30 à 100 mΩ dans les borniers et 15 à 50 mΩ dans les disjoncteurs. Ces pertes se traduisent par l'échauffement des contacts. Les protections contre les surtensions avec des varis tors ne conduisent normalement que peu de courant, mais avec le vieillissement les courants de fuite qui sont peuvent augmenter difficilement mesurables. Le câble du champ n'est normalement pas réalisés sous tube (sauf pour la protection mécanique des passages sur sol) et les câbles doivent être résistants aux UV et comportent une double isolation. Il existe sur le marché des câbles spécialement fabriqués pour les installations photovoltaïques. Les coffrets de raccordement (Figure I.3) contiennent normalement les borniers séparés, positifs et négatifs, des arrivées de tous les câbles provenant des chaînes de modules en série. Ils contiennent également les diodes anti-retour et les dispositifs de protections. Un champ photovoltaïque peut comporter plusieurs coffrets disposés de façons à diminuer les longueurs de câbles et à optimiser les sections. Les coffrets doivent répondre aux exigences d'étanchéité, ils doivent être largement dimensionnés pour permettre un câblage propre et bien accessible, et construits en matière ininflammable, si possible en métal [13].

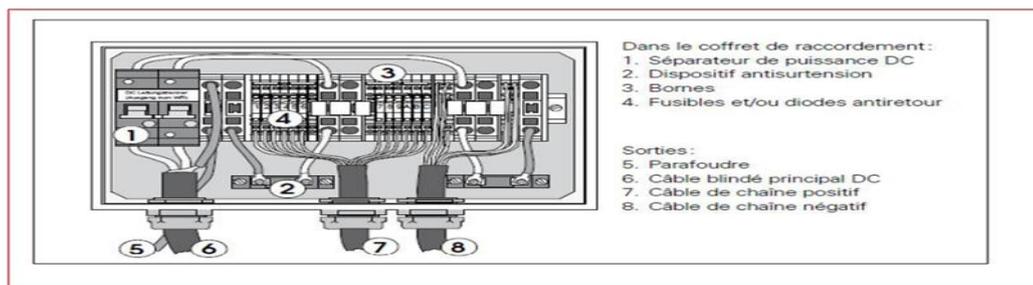


Figure I.3 coffret de raccordement [13]

I.2.3.3 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. Ici encore, le choix des sections de câble devra garantir une perte maximale de puissance de l'ordre de 1% [13].

I.2.3.4 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 grouper dans 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 nominalement pour arrêter le fonctionnement de l'onduleur [13].



Figure I.4 Câble PV modèle MC[13]

I.2.3.5 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 [13].

I.2.3.6 Contacteur côté courant alternatif (AC)

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 [13].

I.2.3.7 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 pertes par les consommateurs présents au point d'injection ne comportant 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 [13].

I.3 Cycle de vie d'une centrale PV connectée au réseau

I.3.1 Etude technico-économique

I.3.1.1 Faisabilité technique

A) Solutions techniques pour le projet photovoltaïque

À partir de la définition des besoins, des informations collectées sur les bâtiments, des données climatiques associées au site (dont la source sera clairement précisée), et du travail architectural commencé, le prestataire devra proposer plusieurs solutions techniques, en les décrivant le plus précisément possible :

- ✓ Type de modules utilisés (cristallin / amorphe / etc.) ;
- ✓ Type d'intégration au bâti envisagé (tuiles solaires, membrane étanche, etc.) ;

- ✓ Orientation et inclinaison ;
- ✓ Surface totale de panneaux prévue et puissance (en kW) correspondante ;
- ✓ Nombre, caractéristiques et emplacement des onduleurs (la solution des micro-onduleurs sera notamment analysée) ;
- ✓ Points de raccordement des bâtiments ;
- ✓ Schéma électrique de l'installation ;
- ✓ Un avis sur les travaux (toiture, renforcement de structure, étanchéité, etc.) associés à l'installation PV ;
- ✓ Plan décrivant l'implantation prévue, réalisé en collaboration avec le responsable de l'étude architecturale.

Ces éléments devront tenir compte le plus possible des contraintes locales liées aux éventuels projets des propriétaires sur la toiture de leur bâtiment.

Ces solutions prendront en compte les options suivantes :

- ✓ 50% des bâtiments se réalisent (ces bâtiments seront déterminés par le maître d'ouvrage au démarrage de l'étude) ;
- ✓ 100% des bâtiments se réalisent.

B) Production d'électricité

Le prestataire devra également :

- ✓ Etablir la quantité prévisionnelle d'électricité produite par mois sur une durée d'un an, en mentionnant le logiciel utilisé pour la simulation du productible. Le productible sera donné pour chaque bâtiment et pour la somme de tous les bâtiments, suivant les différents scénarios;
- ✓ Editer les courbes de charge cumulées des puissances injectées sur le réseau pour les installations raccordées à un même poste (lien avec l'étude de raccordement) ;
- ✓ Justifier le tarif d'achat auquel serait éligible chacun des bâtiments de l'installation, sachant que lorsque les bâtiments sont mitoyens des groupements de points d'injection peuvent être envisagés ;
- ✓ Comparer ce productible aux consommations d'électricité du village.

C) Compléments techniques

Pour les bâtiments sur lesquels un besoin de chauffe-eau solaire thermique est identifié, le prestataire proposera

- ✓ Le lieu d'implantation des panneaux ;
- ✓ La taille et le type de capteurs nécessaire ;
- ✓ La façon dont ils seront intégrés au système photovoltaïque ;
- ✓ Un pré-chiffrage du coût de l'installation solaire thermique.

Pour les bâtiments sur lesquels d'autres travaux en toiture sont identifiés (réfection étanchéité, isolation, implantation d'un velux, etc.), le prestataire proposera :

- ✓ La façon dont ils seront intégrés au système photovoltaïque ;
- ✓ S'il s'agit de travaux améliorant la performance énergétique du bâtiment, une estimation approximative des économies d'énergie réalisables (en kWh/an et €/an selon l'énergie substituée).

I.3.1.2 Economie du projet

Pour chaque solution technique envisagée et pour chaque scenario, proposer une évaluation des coûts suivants :

- ✓ L'investissement lié à l'équipement PV (détaillant panneaux / connectique et onduleurs / pose) ;
- ✓ les recettes annuelles issues de la vente d'électricité ;
- ✓ les coûts annuels de maintenance (dont le changement des onduleurs sur 20 ans) ;
- ✓ le coût annuel des assurances (détail par type d'assurance) ;
- ✓ les coûts nécessaires aux travaux annexes identifiés.

Si le cumul de surfaces équipées avec une technologie identique se révèle important, l'effet d'échelle sera évalué sur le coût du matériel. Pour information, la pose sera réalisée par une seule et même structure pour l'ensemble des toits du projet Des Haies.

Le prestataire ne réalisera pas de plan d'exploitation de l'installation photovoltaïque, qui est pris en charge par RAEE [14].

I.3.2 Les étapes de vie du parc photovoltaïque

I.3.2.1 Étapes préliminaires : défrichage et débroussaillage

En préliminaire de la construction de la C.P.E.S. « les Broules », le défrichage au sein des parcelles vouées à accueillir le parc solaire sera réalisé.

Celui-ci consistera à couper les arbres et arbustes en place ainsi qu'à dessoucher dans l'emprise délimitée par la clôture du futur parc, au niveau de la zone tampon pour la circulation des engins de secours et des secteurs prévus pour la création de milieux ouverts.

Ce défrichage durera environ 2 mois et sa réalisation se fera selon des modalités particulières afin de préserver un maximum les sols en place et ainsi favoriser la reprise spontanée de la végétation. En charge de la réponse à la consultation dans le cadre du projet, et dans le cadre de la prévention contre le risque incendie, un débroussaillage sélectif à partir des installations sur 50 m autour du futur parc photovoltaïque sera effectué. Il concernera les Espaces Boisés Classés et les milieux déjà ouverts qui seront entretenus pour respecter cette mesure de lutte contre le risque incendie tout en favorisant la biodiversité. Le but du débroussaillage qui sera réalisé est d'éviter la propagation du feu au sol en diminuant la biomasse, ainsi que sa transmission d'une cépée à une autre en éliminant les branches susceptibles de transmettre le feu aux cépées voisines, et donc respectant un espacement entre les cépées de 3-4 m [15].

Sur le terrain, cela consistera à :

- Retirer toute la strate arbustive,
- Un élagage et une coupe sélective des branches tordues, rampantes au niveau de chaque cépée [15].

I.3.2.2 La construction du parc – déroulement du chantier

I.3.2.2.1 Généralités

Le chantier de construction de la centrale solaire se déroulera en plusieurs étapes réparties sur **environ 4 mois**.

Le **nombre d'ouvriers** prévu sur la durée du chantier est d'environ **10 personnes par jour en moyenne avec une quarantaine de personnes en période de pointe**. L'ensemble du matériel est acheminé par camions. La construction du parc solaire générera ainsi une **circulation de deux camions par jour en moyenne** sur toute la durée du chantier.

Des règles de sécurité et de protection de l'environnement seront fixées aux différents prestataires intervenant sur site.

Tout au long du chantier, il est accordé une attention particulière à la gestion des déchets. Ceux-ci sont triés (matériaux recyclables ou non) et regroupés dans des conteneurs adaptés [15].

I.3.2.3 Préparation du chantier

Le site sera défriché préalablement au démarrage des travaux de construction, puis un surfaçage sera réalisé si nécessaire.

La clôture et la base vie seront mises en place dès le début du chantier, l'accès sera strictement réservé aux seules personnes habilitées.

La base vie, d'une superficie de 1500 m² environ, permet d'accueillir les entrepreneurs pour la période de construction de la centrale solaire et constitue une zone de stockage.

La base vie se compose, entre autres, des éléments suivants :

Un (des) bureau(x) de chantier ;

Un vestiaire – réfectoire ;

Un bloc sanitaire équipé d'une fosse septique double paroi ;

Un (des) conteneur(s) pour le matériel et l'outillage ;

La création d'une zone de parcage des véhicules et des engins de chantier ;

La création d'une zone déchets. Des bennes à déchets permettront d'effectuer un tri sélectif

Des différentes catégories de déchets produits. Elles seront régulièrement vidées et les déchets orientés vers des centres de traitement agréés ; La mise en place d'un zonage destiné à recevoir les différentes catégories de matériaux en transit. Ainsi, des aires d'attente spécifiques seront créées, qu'il s'agisse de terre ou d'autres matériaux [15].

I.3.2.4 Aménagement des voiries, des aires de grutage et de la plateforme pour la citerne d'eau

L'ensemble des éléments constitutifs du projet sont de taille modeste. Leur acheminement jusqu'au site d'implantation se fera par camions en empruntant le réseau local, départemental ou national. Les voies existantes sont adaptées au passage des engins de chantier nécessaires à la construction de la centrale.

L'accès au site se fera préférentiellement par le Nord, depuis la route D4096.

Les pistes internes à la centrale (**8604 m²**) ainsi que les aires de grutages des postes électriques (**750 m²**) et la plateforme de mise en aspiration des engins de secours (**environ 160 m²**) seront empierrées par ajout de matériaux naturels, de type Grave Non Traitée, compactés par couches pour supporter le poids des engins. **Ces surfaces ne seront donc pas imperméabilisées.**

Une citerne d'eau de 120 m³ sera posée sur une plateforme d'environ 135 m², protégée par un lit de sable et/ou un géotextile anti-poinçonnant.

L'accès aux équipements de la centrale sera assuré par une piste périphérique. Elle aura une emprise **d'environ 6 m de large dont 5 m de bande de roulement**. Les pistes pourront être élargies au besoin dans les virages pour faciliter le passage des véhicules plus encombrants [15].

I.3.2.5 Pose des structures et des panneaux

Les fondations des structures porteuses seront installées selon la technique la plus adaptée à la typologie de fondation choisie pour le site.

Pour implanter les fondations type vis, les machines et les outils spécialement conçus permettent un vissage simple et rapide.

Les structures préfabriquées, composées d'aluminium ou d'acier traité contre la corrosion, seront pré-assemblées sur site, placées sur les fondations à l'aide d'un «fork lift» et, enfin, fixées aux ancrages.

Les modules seront glissés un à un, manuellement, dans les rails des structures métalliques.

Cette technique permet d'installer rapidement des grosses quantités de modules et de raccourcir sensiblement la durée totale du chantier.



Figure I.5 : Construction de la centrale photovoltaïque de Puits Castan – Aude (Source EOLE-RES) A gauche : montage des structures – A droite : mise en place des panneaux sur les structures

I.3.2.6 Installation des réseaux de câbles

Les lignes électriques nécessaires au transport de l'énergie vers le point de livraison au réseau seront installées le long des structures métalliques ou en souterrain. **Les réseaux de communication par fibre optique et de mise à la terre seront enterrés.**

Les tranchées seront réalisées à l'aide d'une pelle mécanique ou d'une trancheuse, elles seront creusées préférentiellement en bordure de piste afin de minimiser l'emprise des travaux. Une fois le câble déroulé dans la tranchée celle-ci sera rebouchée et compactée. Du sable pourra être ajouté dans la tranchée afin de protéger les câbles enterrés.

Les matériaux excavés seront réutilisés pour les remblaiements si leurs propriétés mécaniques le permettent. Sinon, ils seront régalés sur place afin d'éviter leur évacuation. Le dimensionnement et la modalité de pose des câbles seront vérifiés par un organisme de contrôle indépendant avant la mise en service du parc [15].

I.3.2.7 Installation des postes électriques

Une excavation sera réalisée sur environ 80 cm de profondeur. Un lit de sable sera posé en fond de fouille. **Les postes électriques seront déposés sur le lit de sable à l'aide d'une grue de façon à en enterrer 60 cm environ.** Cette partie enterrée sera utilisée pour le passage des câbles des réseaux sur site à l'intérieur des postes. Les matériaux excavés seront réutilisés pour les remblaiements si leurs propriétés mécaniques le permettent. Sinon, ils seront régalés sur place afin d'éviter leur évacuation.

À la sortie de la centrale solaire, au niveau de la structure de livraison, une liaison avec le réseau public d'électricité sera réalisée par ERDF [15].



Figure I.6 : Installation d'un poste électrique (Source EOLE-RES)

I.3.2.8 Réalisation des connexions

Les modules seront connectés en série entre eux afin de former une branche (ou «string»). Puis les strings, groupés en parallèle dans les boîtiers de raccordement, seront raccordés aux postes électriques [15].



*Figure I.7 : Centrale photovoltaïque de Puits Castan – Aude (Source EOLE-RES)
A gauche : Câblage des panneaux – A droite : Boîtier de raccordement*

I.3.2.9 Essais

Préalablement à la mise en service, des tests de fonctionnement seront réalisés. Ils visent à s’assurer du bon fonctionnement de l’ensemble des composantes de la centrale d’un point de vue électrique et de contrôle à distance (supervision)[15].

I.3.2.10 Mise en service et repli du chantier

Si les tests sont favorables, la centrale sera mise en service. La base vie sera alors démontée :

Les bâtiments seront réacheminés vers un autre chantier ;

La plateforme logistique sera démontée ;

Le site d’installation de la base vie sera remis en état[15].

I.3.3 Exploitation de la centrale photovoltaïque

I.3.3.1 Maintenance du site

Aucun poste de gardiennage ne sera présent sur le site. En revanche, la centrale sera équipée d’un dispositif permanent de vidéosurveillance et d’un système de télégestion de l’installation depuis le siège de notre société à Avignon. Ce système permet d’être averti en cas de défaillance et de réagir rapidement pour des opérations de maintenance corrective.

Les principales activités pendant la phase d’exploitation seront notamment :

- L'analyse des données enregistrées par la centrale d'acquisition (énergie solaire incidente, température des modules, énergie produite, énergie injectée dans le réseau, ...);
- Le contrôle visuel des modules et des structures, la détection éventuelle d'objets masquant les cellules (cartons, plastiques);
- La vérification de l'état des câbles et des connecteurs;
- La vérification de l'état des boîtes de connexion;
- La vérification de la tenue de la structure et des modules;
- Les tests électriques des branches;
- La vérification des onduleurs, éventuellement, thermographie infrarouge des armoires de protection;
- La vérification des cellules et des connexions électriques;
- La vérification des protections électriques, des protections anti foudre, de la continuité des masses et des liaisons à terre.

I.3.3.2 Entretien de l'installation

Une reprise naturelle de la végétation au droit des panneaux permettra le maintien d'une couverture en herbacée basse, une stabilisation des poussières et ainsi la prévention de tout éventuel envol de particules.

Cette couverture fera l'objet d'une fauche régulière, planifiée en fonction de la repousse de la végétation. Le passage d'un engin léger entre les allées est à prévoir ainsi que d'une débroussailleuse sous les modules. **Aucun produit phytosanitaire ne sera employé dans la centrale. Aucun nettoyage des panneaux n'est envisagé.** En effet, l'action naturelle de la pluie assure a priori un lessivage suffisant des panneaux.

Les aspects pratiques de l'entretien se conformeront aux mesures prises en faveur de l'environnement de la centrale [15].

I.3.3.3 Sécurité

Le site ne sera pas ouvert au public pour des raisons de sécurité. **Ainsi, la totalité du site sera grillagée.** Des portails permettront l'accès au site pour les équipes de maintenance, ainsi que pour les services du SDIS.

Afin d'assurer la sécurité du site différents équipements seront prévus :

Vidéo surveillance, Clôture sur l'ensemble du projet [15].

Recyclage des panneaux PV en fin de vie

Le recyclage en fin de vie des panneaux photovoltaïques est devenu obligatoire en France depuis Août 2014.

La refonte de la directive DEEE – 2002/96/CE a abouti à la publication d'une nouvelle version où les panneaux photovoltaïques en fin de vie sont désormais considérés comme des déchets d'équipements électriques et électroniques et entrent dans le processus de valorisation des DEEE. LES PRINCIPES :

- Responsabilité du producteur (fabricant/importateur) : les opérations de collecte et de recyclage ainsi que leur financement, incombent aux fabricants ou à leurs importateurs établis sur le territoire français, soit individuellement soit par le biais de systèmes collectifs.
- Gratuité de la collecte et du recyclage pour l'utilisateur final ou le détenteur d'équipements en fin de vie
- Enregistrement des fabricants et importateurs opérant en UE
- Mise en place d'une garantie financière pour les opérations futures de collecte et de recyclage lors de la mise sur le marché d'un produit [15].

I.3.4. Le démantèlement du parc en fin de vie

A l'issue de la durée de vie du parc solaire (40 ans au maximum), **la centrale de production d'énergie solaire sera démantelée intégralement et tous les éléments seront traités et recyclés** dans les conditions réglementaires en vigueur où à venir.

Le démantèlement durera 4 mois environ et les techniques de démantèlement seront adaptées à chaque sous-ensemble.

Les étapes du démantèlement seront les suivantes :

- Démantèlement de la structure de livraison et des sous-stations de distribution. Chaque bâtiment sera déconnecté des câbles, levé par une grue et transporté hors site pour traitement et recyclage ;
- Déconnexion et enlèvement des câbles posés le long des structures, puis évacuation vers le centre de traitement et recyclage. Dans la mesure où la réouverture des tranchées apparaît plus pénalisante pour l'environnement que l'abandon en terre du réseau de câbles enfoui, celui-ci sera laissé enterré ;
- Démontage des modules et des structures métalliques. Les modules seront évacués par camions et recyclés selon une procédure spécifique (recyclage du silicium, du verre, des conducteurs et des autres composants électriques). Les métaux des structures seront acheminés vers les centres de traitement et de revalorisation ;

- Selon le type de fondation retenu, leur démontage sera différent. Dans le cas de fondation type vis ou pieu, il sera procédé à leur enlèvement du sol puis leur évacuation du site par camions. L'ensemble des fondations sera enlevé en quelques jours ;
- Enfin, le site sera remis en état par nivellement de la terre végétale. Les emprises concernées seront remodelées avec le terrain naturel et pourront se revitaliser naturellement. Les modules photovoltaïques seront acheminés vers des centres adaptés au retraitement du silicium pour être recyclés : séparation des cadres aluminium et valorisation, récupération des verres, récupération des cellules silicium, fonte et réemploi pour la création de nouvelle cellules, valorisation des fondations et structures métalliques (acier galvanisé). Selon l'usage futur auquel sera destiné le site, EOLE-RES prendra les dispositions pour favoriser la reprise de la dynamique végétale locale et la recolonisation du site par des plantes et arbustes indigènes. Il sera veillé à ne pas créer les conditions favorisant le développement d'espèces invasives. Dans ces objectifs, EOLE-RES s'appuiera sur la réflexion d'un expert environnementaliste. Pour permettre de recycler ces premiers produits, l'industrie photovoltaïque a mis en place un dispositif de collecte à l'échelle européenne.

Pour cela, une association, PV Cycle, a été créée en juillet 2007. Elle compte déjà 90% des acteurs du marché photovoltaïque européens parmi ses membres. L'objectif de l'association est de mettre sur pied un dispositif volontaire de collecte et de recyclage des modules pour l'ensemble de l'Europe et d'être en mesure d'en collecter 90% dès 2013 et de recycler plus de 85% des matériaux à l'horizon 2020 [15].

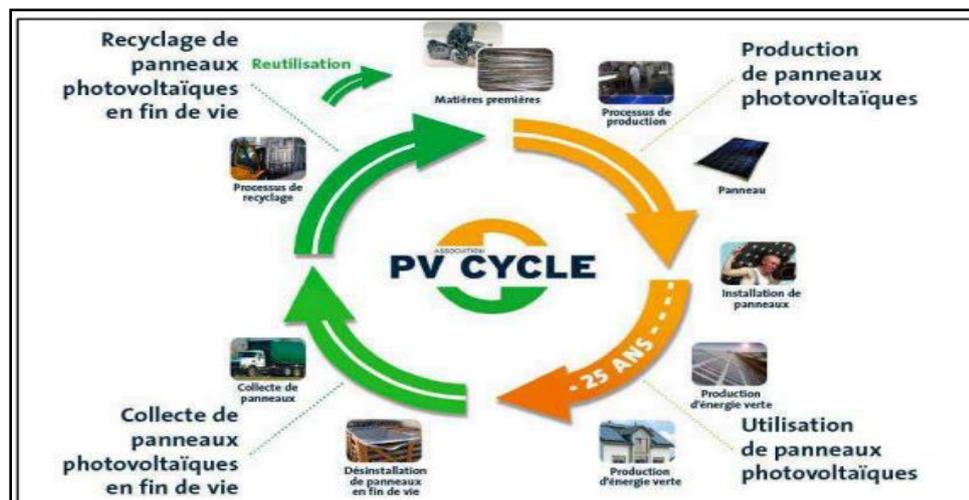


Figure I.8 : Vie d'une installation photovoltaïque (PV Cycle)

I.3.5 La phase étude technico-économique

Le calcul de la rentabilité économique d'une installation photovoltaïque (PV) est la clé pour estimer si un investissement est à la fois faisable et pertinent. Mise à part une étude visant à déterminer si l'installation d'un système photovoltaïque est réalisable et réaliste, Une analyse économique est nécessaire pour déterminer si l'investissement financier sur ce système est également économiquement solide. Généralement, les systèmes photovoltaïques sont caractérisés par d'importants investissements initiaux de capital qui nécessitent une analyse économique et une planification rigoureuse. Le coût d'investissement d'un système photovoltaïque diminue chaque année, non seulement parce que le coût de l'équipement baisse, mais aussi parce que les coûts d'installation et les coûts de maintenance sont moins élevés. Par exemple, même si le prix des modules photovoltaïques sont demeurés stables de 2004 à 2008, le coût d'investissement dans les installations photovoltaïques a diminué en raison de systèmes PV mieux conçus et de coûts de financement plus faibles. Cependant, même si le coût d'investissement des systèmes photovoltaïques a été considérablement réduit au cours de la dernière décennie, il reste important et constitue le principal frein. D'autre part, le coût d'exploitation et d'entretien est généralement faible et souvent négligeable par rapport au coût d'achat de l'énergie d'un fournisseur d'énergie électrique. Étant donné que le coût d'investissement initial des installations photovoltaïques est élevé, une analyse économique correcte est d'une importance capitale. Les applications autonomes doivent être dimensionnées avec précision et le rendement des systèmes connectés au réseau doit être correctement estimé, sinon il y aurait des conséquences économiques importantes pour l'exploitant. Des évaluations économiques simplistes basées sur les seules données économiques actuelles sont insuffisantes, et les approches empiriques sont inexactes et financièrement dangereuses. Les applications autonomes doivent être dimensionnées avec précision et le rendement des systèmes connectés au réseau doit être correctement estimé, sinon il y aurait des conséquences économiques importantes pour l'exploitant. Des évaluations économiques simplistes basées sur les seules données économiques actuelles sont insuffisantes, et les approches empiriques sont inexactes et financièrement dangereuses. Cependant, une évaluation économique sérieuse d'un système photovoltaïque n'est pas complexe. Les sections suivantes décrivent les paramètres économiques essentiels pour l'optimisation économique des installations photovoltaïques, une méthode d'optimisation économique et des exemples d'évaluation des systèmes [16]. *Pour cela, la méthode LCC est utilisée.*

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un aperçu sur les différentes notions de l'énergie photovoltaïque et de la constitution d'un système photovoltaïque connecté au réseau, ainsi que les principes de fonctionnement de ce système. Et l'étude technico-économique d'un parc PV.

Chapitre II

La méthode LCC pour le projet PV

II.1 Introduction

Au cours de l'étude préliminaire de la conception d'un système photovoltaïque connecté au réseau, la préoccupation du coût économique doit être toujours présentée pour nous permettre de choisir le système PV le plus économique et qui permet de répondre le mieux possible au cahier des charges. De plus, le calcul du coût sur la durée de vie '*Life-cycle cost*' est une forme de calcul économique qui permet une comparaison directe des coûts induits par les diverses solutions envisagées. Dans ce type de calcul, les coûts initiaux ne sont pas les seuls à être pris en compte, tous Les coûts futurs sur la durée de vie de l'installation sont également envisagés, ceux-ci comprennent le remplacement de certaines parties du système, la maintenance et la réparation du système, et l'indisponibilité du système. La période d'analyse sera la durée de vie du sous-système qui bénéficie de la plus longue durée de vie [17].

II.2 Définition

Le coût du cycle de vie (CCV) est une méthodologie utilisée pour la première fois par Défense des Etats unis, c'est un calcul économique de tous les coûts propagés pendant la durée de vie de tout système technique. Pour les systèmes d'énergie renouvelable (RE), le LCC est une bonne méthodologie, qui montre la rentabilité de l'utilisation des énergies renouvelables comme alternatif source par rapport aux générations conventionnelles. Un modèle LCC a été introduit pour système de génération PV. La collecte de données a été effectuée à l'aide de 4 données de coûts différentes sources [18].

Le coût du cycle de vie (CCV) (en anglais **life cycle cost** ou **LCC**) est le « coût cumulé d'un produit tout au long de son cycle de vie », depuis sa *conception* jusqu'à son *démantèlement* [19].

II.3 Application de la méthode LCC pour le projet de centrale PV connectée au réseau

Le modèle de système de production solaire photovoltaïque développé par LCC est réparti en cinq catégories de coûts :

Développement /planification (C Dév) , panneaux PV (C Panne) , appareils électrique

(C Elec), structure de montage et travaux civils (C Civil) ,en plus de l'exploitation et de la maintenance (C O&M),comme indiqué dans l'équation 1 [18].

$$LCC = (C \text{ Dév}) + (C \text{ panneau}) + (C \text{ Elec}) + (C \text{ Civil}) + (C \text{ O\&M}) \dots \dots \dots 1$$

Développement	Modules PV	Montage et travaux civil	Appareil électrique	Opération et Maintenance
<ul style="list-style-type: none"> ▪Développement ▪Coût de financement ▪Coût légal ▪Etude impact de la grille ▪Etudes environnementales Coût du terrain 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Sable de quartz [20.48kg] ▪Métallurgique fusion du silicium [6.08kg] ▪Grade solaire multi-Si purification [5.52 kg] ▪Coulée en lingot (lingot multi –Si) [5.47 kg] ▪Tranchage [3.34 kg] ▪Traitement des cellules (multi –Si cellule solaire [1.09kw] ▪Modules assemblée (panneau solaire) [1kw] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Chantier de construction installé ▪Montage de structure ▪Module installation ▪Travail électrique DC, AC jusqu'à 1000V ▪Moyenne tension et interconnexion réseau AC ▪Construction la gestion ▪Mise en service Le travail civil : salle de contrôle , routes, eau, ▪Drainage, clôture, grue....etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Station onduleur comprenant transformateur ▪Fils et auxiliaires équipement ▪Foudre et surtension protection ▪Moyenne tension et interconnexion réseau AC ▪Système SCADA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Opération (la main d'œuvre) ▪Entretien (nettoyage, composantes remplaçants)

Tableau II.1 modèle de calcul du cycle de vie (LCC) pour le système PV[18]

II.3.1 Développement

II.3.1.1 Coût du terrain

Un site recherché dispose une **surface importante, dans un lieu bien ensoleillé [10]**, d'un raccordement au réseau accessible ou d'un engagement réglementaire exécutoire pour raccorder le site au réseau de distribution, et l'absence de préoccupations environnementales ou sociales sérieuses associées au développement d'un projet PV [19].

Le terrain du projet doit être acheté ou loué pour une durée supérieure à la durée de la couverture du service de la dette ; une durée minimum de **15 à 20** ans est souhaitable, bien qu'un bail de **40 à 50** ans soit souvent signé [19].

II.3.2.2 Estimation de la puissance crête de la centrale photovoltaïque

La puissance crête de la centrale photovoltaïque installée dépend de l'irradiation du lieu. On la calcule de façon à satisfaire les besoins pendant la période la plus défavorable en appliquant la formule suivante [13].

$$P_c = \frac{E_c}{K \cdot I_r}$$

P_c : puissance crête de la centrale photovoltaïque (Wc).

I_r : Irradiation moyenne mensuelle reçue par le capteur photovoltaïque correspondant au mois le plus défavorable (Wh.m⁻².jour⁻¹).

E_c : Energie consommée (Wh).

K : Coefficient correcteur. Ce coefficient tient compte :

- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison ;
- Du point de fonctionnement des modules ;
- Du rendement moyen de la batterie (90%) ;
- Du rendement de régulateur (95%) ;
- Des pertes dans les câbles de connexion pour les systèmes avec batterie.

K est en général compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans des calculs du Système avec batterie est $k=0,65$ [13].

II.3.2 Modules PV

II.3.2.1 Les technologies

Le tableau suivant présentera une comparaison entre les trois technologies [20].

Technologie	Monocristallin	Poly cristallin	Amorphe
Modules PV			
Rendement dans les condition standard	Très bon rendement 14 à 20 %	Bon rendement 14 à 20 %	Faible rendement 14 à 20 %
Surface de panneau pour 1 kWc	7 m ²	8 m ²	16 m ²
Energie produite en un an par m ²	90-95 kWh/ m ²	90-95 kWh/ m ²	55-60 kWh/ m ²
Emission de CO2 économisée par kWc et par an	325 kg/kWc	325 kg/kWc	325 kg/kWc
Emission de CO2 économisée par m ² et par an	45kg/ m ²	40 kg/ m ²	25 kg/ m ²

Tableau II.2 Comparaison entre les technologies des modules photovoltaïque [20]

II.3.2.2 Les caractéristiques d'un panneaux PV

Puissance crête : la puissance électrique produite par un module varie en fonction du rayonnement solaire, la puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairage de 1000 W/m² et pour une température de jonction de la cellule de 25°C ,AM

1.5

[21]

Rendement : le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (Intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum que l'on appelle le point de puissance maximale [21].

Caractéristique courant - tension d'un module : le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant / tension et puissance / tension, *figure II.1*. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des **cellules** [21].

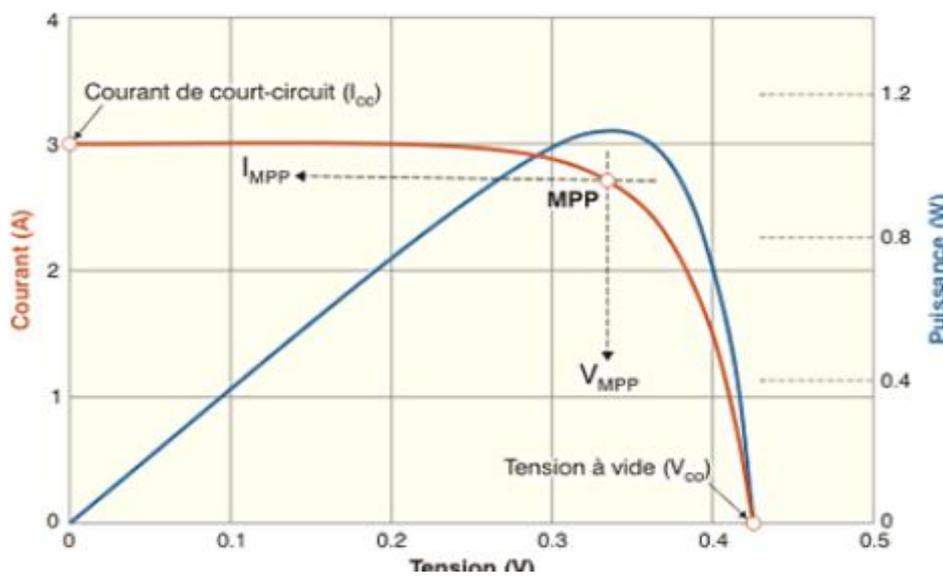


Figure II.1 Caractéristique Courant-Tension [20].

Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représentait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court –circuit : I_{cc} . Cette valeur représentait la tension générée par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximale : MPP (en anglais ; maximal power point) Obtenu pour une tension et un courant optimaux : U_{mpp} , I_{mpp}) [20].

II.3.2.1 Coût de la centrale PV

II.3.2.1.1 Coût des panneaux photovoltaïque

$$\text{Nombre des panneaux PV} = \frac{\text{capacité de la centrale PV (MW)}}{\text{puissance maximale de modules (Wc)}} \dots (2)$$

Le tableau suivant présentera les prix des différents panneaux PV [22].

Type de panneau PV	Prix unitaire
Panneau solaire 90W Mono	10 003.50 DA
Panneau solaire 150W Mono	166 672.5 DA
Panneau solaire 90W Poly	8 190 DA
Panneau solaire 150W Poly	15 795 DA

Tableau II.3 prix des panneaux solaires des marques condor [22]

$$\text{Prix des panneaux PV} = \text{prix d'un module} * \text{nombre des panneaux}$$

II.3.2.1.2 coût d'investissement

En ce qui concerne le coût d'investissement total hors C O&M, la figure II.2 montre le graphique circulaire du coût principal composant. De la figure II.2, nous pouvons voir que la manière dont les panneaux PV représentent le coût d'investissement majeur (~ 47 %), de C civil (25% de l'acier rack 7% , installation rack 6%, et civil et installation 13%). C Elec se compose de pièces électriques 12% et Inverter 11%. C Eec représente le troisième plus gros coût composant avec 23%. A terme, le C Dév représente la plus petite partie du coût d'investissement avec 5% de part [18].

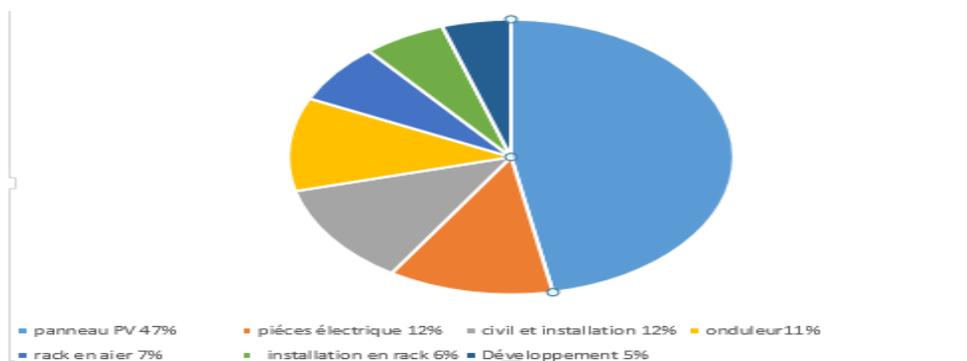


Figure II.2 coût d'investissement moyen des composants de l'installation PV (100% du coût total de l'investissement [18]).

Prix des panneaux → 47%
xx (coût de la centrale PV) → 100%

$$xx = \frac{\text{prix des panneaux PV} * 100}{47}$$

I.4 Conclusion

Le cycle de vie (CCV) est une bonne méthodologie, en particulier pour les systèmes d'énergie renouvelable (ER), ce qui montre les avantages de l'utilisation des énergies renouvelables en tant que source alternative par rapport aux coûts liés au carburant. Un modèle pour LCC pour le système de génération PV a été introduit, et une méthodologie pour l'acquisition de données de coût a été suivie en fonction de quatre sources de données de coûts différentes [18].

Chapitre III

Présentation de l'outil développé

III.1 Introduction

Il existe plusieurs langages permettant de réaliser des interfaces graphiques interactives avec l'utilisateur. J'ai envisagé d'utiliser le langage **Matlab** [23].

Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. MATLAB peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (« boîte à outils »). Les interfaces graphiques (ou interfaces homme-machine) sont appelées GUI (Graphical User Interface) sous MATLAB. Elles permettent à l'utilisateur d'interagir avec un programme informatique, grâce à différents objets graphiques (boutons, menus, cases à cocher...). Ces objets sont généralement actionnés à l'aide de la souris ou du clavier [24].

III.2 Description de l'application software

Une interface graphique permet de contrôler une application interactivement avec la souris, plutôt que par lancement des commandes au clavier. Elle comprend des menus, des boutons, des "ascenseurs", des cases à cocher, des listes de choix, des zones de texte [25].

Elle permet de "cliquer" directement sur des images, des graphiques ou des objets pour modifier la valeur d'une variable, déclencher des fonctions ou simplement faire apparaître des informations lors d'un survol à la souris [25].

Matlab permet d'écrire assez simplement une interface graphique pour faire une application interactive utilisable par des utilisateurs non formés à Matlab[25].

Les notions principales d'une interface graphique sont :

- les divers objets graphiques, auxquels sont attribués des noms symboliques ; ces "poignées de main" ou "**handles**" permettent de les repérer dans l'interface ; pour envisager par exemple une modification dynamique (grisé d'un bouton provisoirement non utilisable, changement du texte d'un bouton, modification d'une liste de choix...)
- **les propriétés** des objets (couleur, disposition, taille, variable associée)
- les fonctions exécutées par les clics souris sur les éléments ou "**callbacks**" (décrites en ligne de commande Matlab) [25].

Le programme guide s'ouvre, en tapant la commande "guide " dans la fenêtre de commande Matlab. L'interface qui s'ouvre alors est présentée *figure III.1* .Elle est divisée en 3 parties : [23]

- ❖ Une barre d'outils ;
- ❖ Une palette de composantes ;
- ❖ Un plan de disposition.

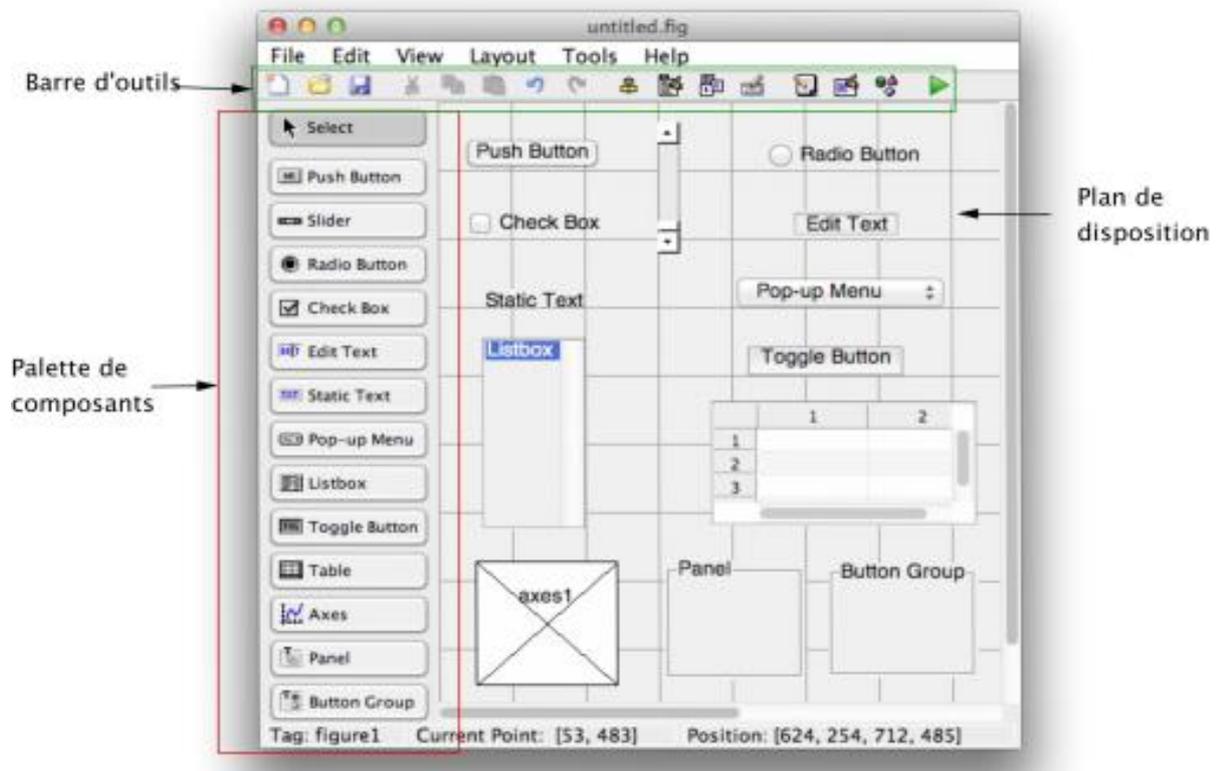


Figure III.1 Interface GUIDE [23]

III.2.1 La barre d'outils

La barre d'outils permet entre autre :

- ✓ d'aligner les composantes dans le plan de disposition,
- ✓ d'ouvrir un explorateur contenant les composants présents dans le plan de disposition, d'ouvrir un *inspecteur de propriété* qui permet de modifier les paramètres d'un composant
- ✓ de sauver le GUI réalisé.

Lors du premier enregistrement, le GUIDE crée :

- ✓ un fichier *.fig* qui contient la définition des objets (position, propriétés),
- ✓ un fichier *.m* qui contient les lignes de code qui assurent le fonctionnement de l'interface graphique,
- ✓ une structure *handles* où sont stockés les identifications des composants et du plan de disposition du GUI. Cette structure est aussi utilisée par le programmeur pour stocker, récupérer ou modifier des variables nécessaires à la réalisation du programme. Cette structure est envoyée comme argument d'entrée dans chaque *callback*

III. 2.2 Le plan de disposition

C'est le plan sur lequel seront disposés les différents composants .Il constitue l'interface graphique GUI qui sera présentée à l'utilisateur. Le plan de disposition en lui-même possède un inspecteur de propriétés au même titre que les composants.

III.2.3 Palette des composants

L'interface du GUIDE permet de manipuler facilement les composants dans le plan.

J'ai donc utilisé pour le GUI POESIE les composants suivants :

- Push Button : bouton poussoir permettant à l'utilisateur de déclencher une action ;
- Static Text : texte ne pourrait être modifié par l'utilisateur ;
- Pop-up Menu : liste déroulante permettant à l'utilisateur de choisir une option dans la liste ;
- Axes : permet de l'affichage graphique des résultats ;
- Panel : permet de grouper plusieurs composants [23].

III.2.4 L'inspecteur de propriétés et le callback

Chacun de ces composants ainsi que le plan de disposition possèdent un inspecteur de propriétés obtenu par clic droit " Property Inspector " ou par double clic sur le composant ou plan de disposition. C'est au travers de cet inspecteur que sont définies les propriétés, les données et les actions relatifs au composant sélectionné. Un exemple d'inspecteur de propriétés du Push Button est présenté *Figure III.2*

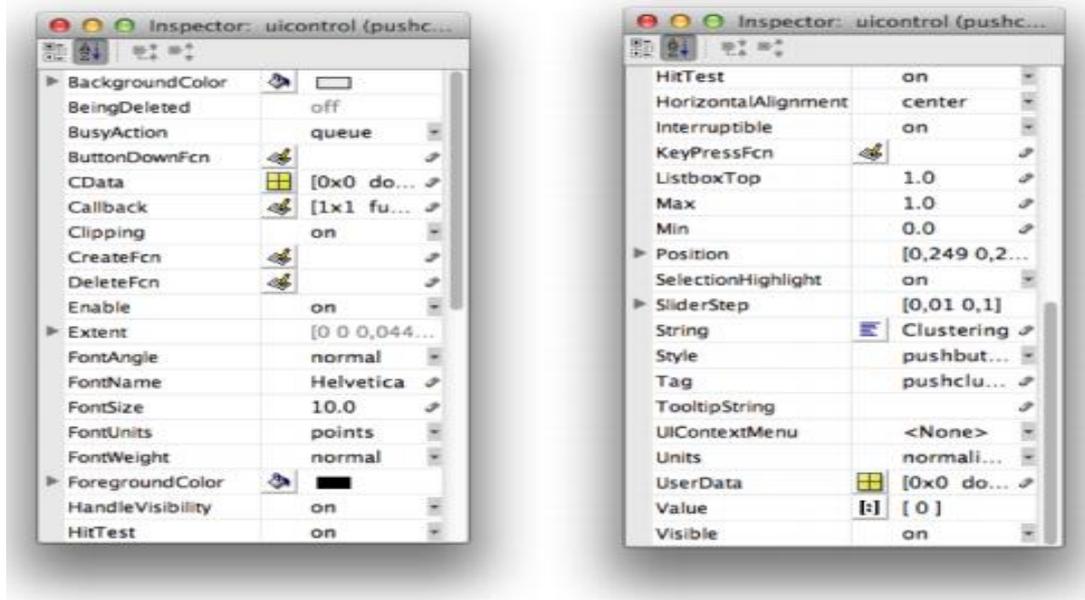


Figure III.2 d'inspecteur de propriétés du *Push Button Mapping*

Parmi ces propriétés, les plus importantes concernant l'interaction avec l'utilisateur sont les callbacks. Quand un évènement est généré par l'utilisateur (click sur la sou activation d'une touche...), le logiciel Matlab fait appel au callback lié à cet évènement et exécute le code défini par le programmeur qui y est associé

Il en contient cinq types de callback qui sont :

- ButtonDownFcn : s'exécute lors de l'appui sur un bouton de la souris alors que le pointeur de la souris est sur un composant ou une figure ;
- Callback : s'exécute, par exemple, lorsque l'utilisateur clique sur un Push Button sélectionne un Radio Button, choisit une option d'un Pop-up Menu... ;
- CreateFunction : s'exécute entre la création du composant et son affichage ;
- DeleteFunction : s'exécute juste avant la destruction du composant ;
- KeyPressFunction : s'exécute lorsque l'utilisateur appuie sur une touche du clavier tout en ayant le focus sur ce composant.

III.4 Présentation des interfaces de l'application

— un " Edit Text " dans lequel l'utilisateur définit :

La puissance d'une centrale PV connecté au réseau (MW)

La puissance maximale d'un module PV (W)

Prix d'un module PV (DA)

— Les fenêtres d'information comprennent des "Static Text " dans lequel s'affichent :

Le comptage du nombre des panneaux PV

Le comptage Prix du champ photovoltaïque (DA)

Le calcul coût estimé de la centrale PV (DA)

La figure ci-dessus représente la première interface



Figure III.3 Interface d'accueil d'étude technicoéconomique

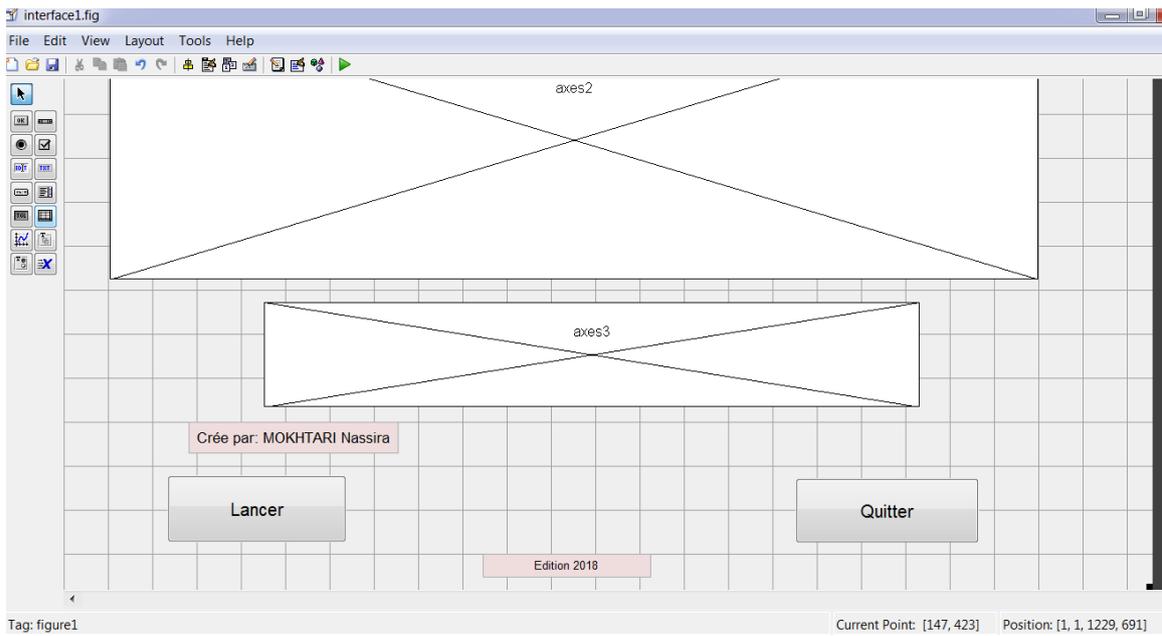


Figure III.4 Plan de disposition du GUI pour la première interface

Je clique sur le bouton "Run figure". La figure III.5 affichera comme montre ci-dessus



Figure III.5 La première interface développée

La figure ci –dessus représente la deuxième interface.

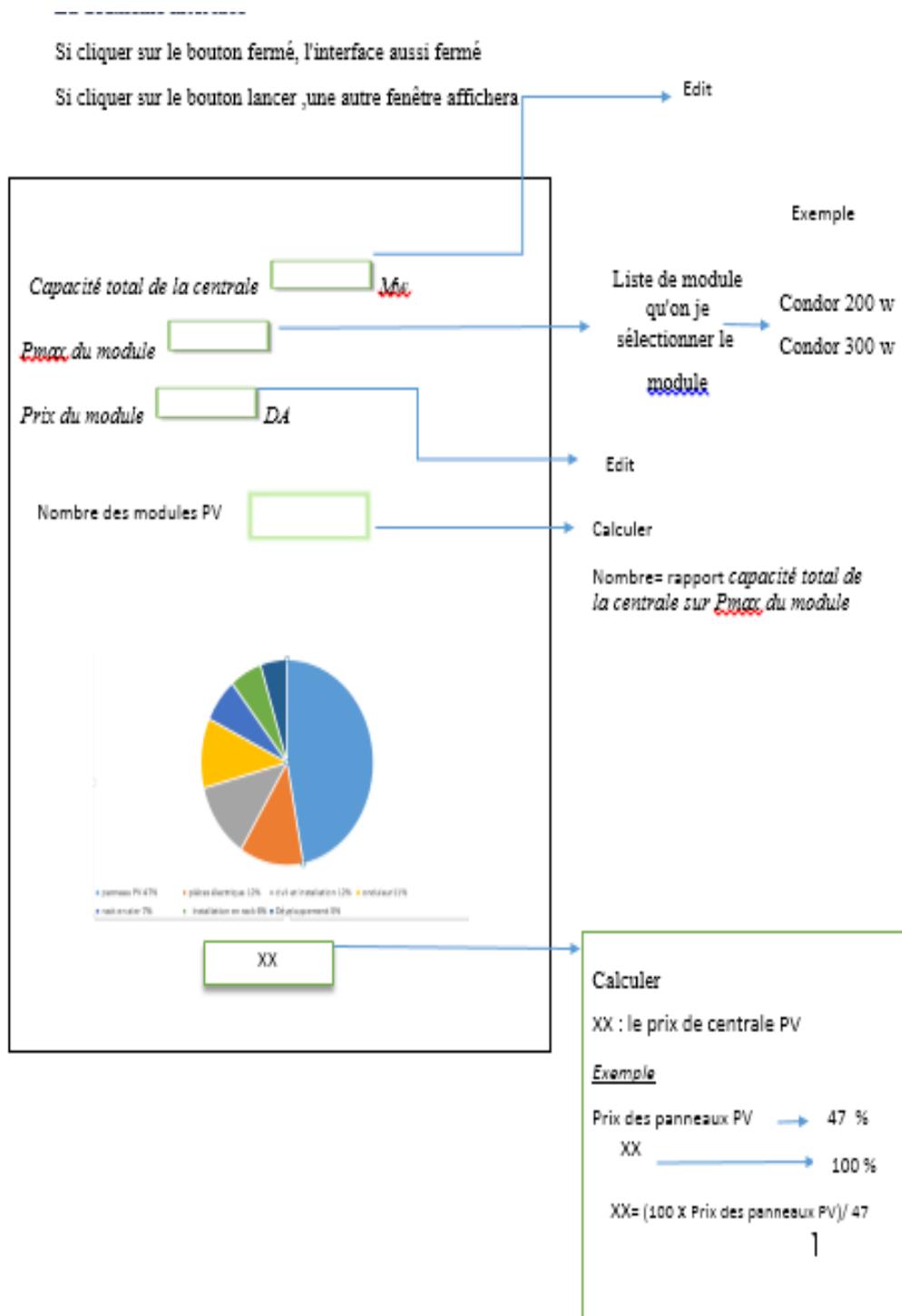


Figure III.6 Présentation de la deuxième interface

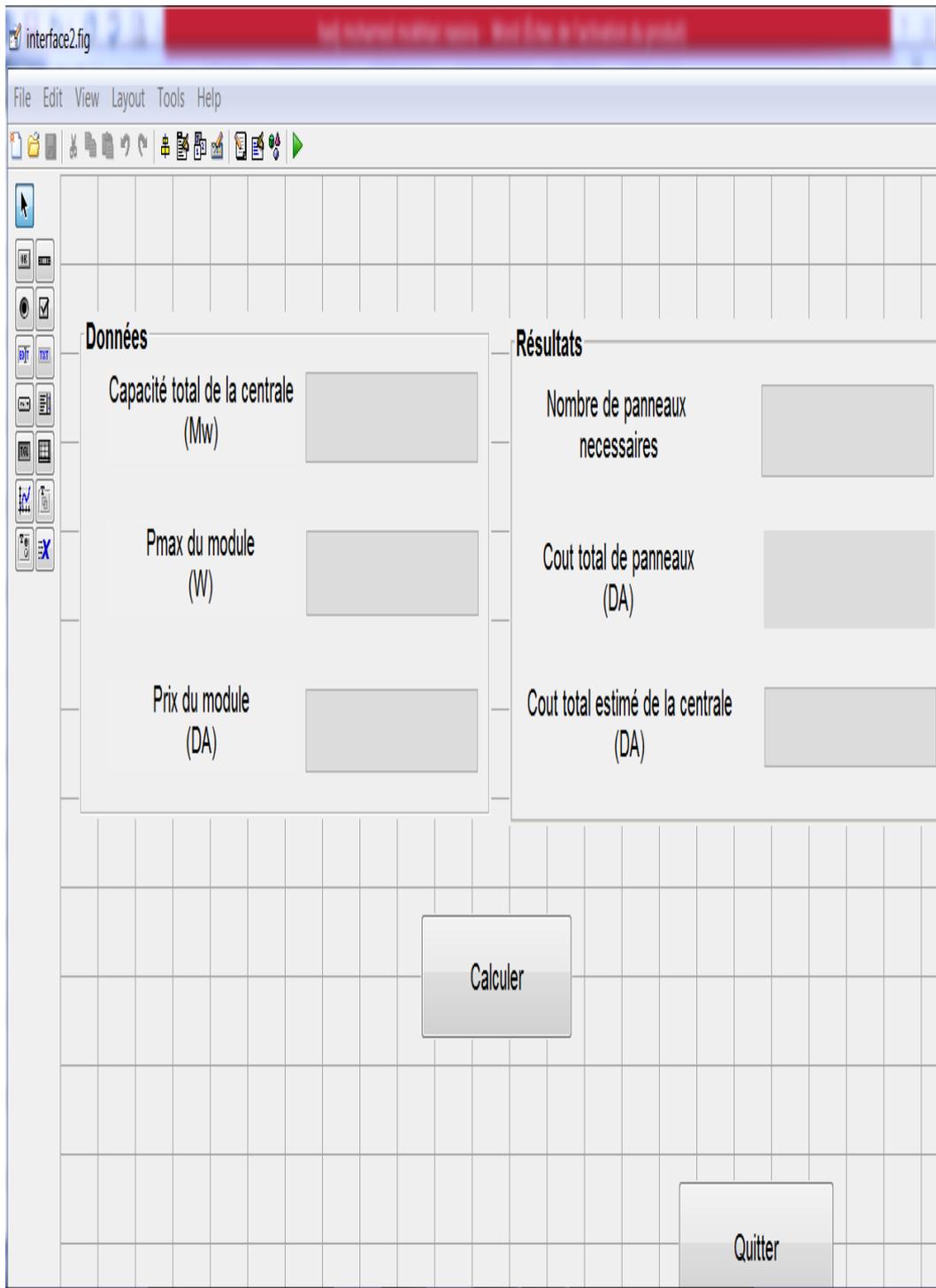


Figure III .7 Présentation de l'application software développée

II.5 Exemple d'application

Exemple Pour une centrale de 1 MW

✚ Panneau solaire 150W Mono de prix 166 672.5 DA

Données		Résultats	
Capacité total de la centrale (Mw)	1	Nombre de panneaux nécessaires	6667
Pmax du module (W)	150	Cout total de panneaux (DA)	1.11121e+09
Prix du module (DA)	166672.5	Cout total estimé de la centrale (DA)	2.36427e+09

Figure III.8 les données et les résultats pour Panneau solaire 150W Mono cristallin de prix 1 666372.5DA

Exemple Pour une centrale de 5 MW

✚ Panneau solaire 150W Mono de prix 166 672.5 DA

Données		Résultats	
Capacité total de la centrale (Mw)	5	Nombre de panneaux nécessaires	33334
Pmax du module (W)	150	Cout total de panneaux (DA)	5.55586e+09
Prix du module (DA)	166672.5	Cout total estimé de la centrale (DA)	1.1821e+10

Figure III.9 les données et les résultats pour Panneau solaire 150W Mono de prix 166672.5DA

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'application software développée pour l'étude technico-économique d'une centrale PV connectée au réseau. Cette application a été conçue sous Matlab. Elle facilite le travail des utilisateurs. Ils n'auront qu'à introduire quelques données pour avoir les résultats recherchés. Deux exemples d'application ont été présentés. Celui de deux centrales de capacités égales à 1MW et 5 MW. Une centrale photovoltaïque connecté au réseau de 1MW représente *6667 des panneaux PV suivant la technologie des modules de 150W Mono cristallin, le coût de cette centrale est 2.3642700000000000 DA*. Mais pour une centrale PV de 5 MW représente de captage de *33334 des panneaux PV suivant la technologie des modules de 150W Mono cristallin, le coût de cette centrale est 1.1821000000000000DA*.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but du présent travail a été de présenter les aspects et les étapes d'une étude et analyse technico-économique d'une centrale PV connectée au réseau. L'analyse suit les besoins de la centrale depuis l'étude jusqu'à sa fin de vie. Plusieurs équations mêlant le côté technique et économique du sujets ont été introduites. Leur utilisation par des non initiés peut être une tâche difficile. C'est dans cette optique que nous avons développé une application software pour faciliter cette tâche. Cette application software est testée sur un cas d'étude et les résultats présentés et commentés.

L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend in opérationnel le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [29].

Le prix d'une installation photovoltaïque doit prendre en compte les éléments réels. Il est décomposé entre l'ensemble des matériels de conversion, la main d'oeuvre et la mise en service de l'installation. Le matériel comprend ici : les panneaux photovoltaïques, les supports de montage, les convertisseurs et le câble nécessaire aux connexions. Le coût total de l'installation photovoltaïque varie selon les sources, d'autant que le marché en forte expansion s'accompagne d'une diminution rapide du prix des panneaux et que la part de l'installation peut subir de grandes dispersions selon les difficultés associées[29].

Bibliographie et webographie

- [1] Y. Meddour, Z. Yazi "Étude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique" mémoire de master académique, université de Ouargla. 2015.
- [2] Pierre-Franck Chevet, directeur général de l'Énergie et du Climat, Guide_EI_Installations-photovolt-au-sol_DEF819-04-11.p 16.
- [3] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/%C3%89nergie%20solaire%20photovolta%C3%AFque/fr-fr/>
- [4] B. Bouzidi, A. Malek et M. Haddadi " Rentabilité économique des systèmes de pompage photovoltaïques ", Vol. 9 N°3 (2006) 187 – 197, p 187.
- [5] David Blaise TSUANYO "Les critères économiques pour les projets d'énergie", "Approches technico-économiques d'optimisation des systèmes énergétiques décentralisés : cas des systèmes hybrides PV/Diesel", Thèse de doctorat, université de Perpignan via domitia, 2015, p 42.
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Photovolta%C3%AFque_raccord%C3%A9_au_r%C3%A9seau
- [7] N.TKOUTI "Chapitre II : systèmes photovoltaïques connectés au réseau", "Optimisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau par la logique floue", Mémoire de magister. Université de Biskra. 2004.
- [8] " faut-il développer les installations photovoltaïques au sol ", synthèse de la réunion du 29 Juin 2010. P 4.
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque .
- [10] "Centrales photovoltaïques", j'apprends-l'énergie, © GDF SUEZ 2013, p 2/4
- [11] "Étude d'impact du parc photovoltaïque de Villebois (01)", Tauw France – R/6086029-V01, Décembre 2014, p 19.
- [12] H. Boukhelifa, "Conception et dimensionnement de l'installation PV" ,"Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw", mémoire de master, université de Boumerdes, 2017, p14
- [13] K. Amara " Dimensionnement d'une centrale PV raccordé au réseau", "Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension", mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2014/2015, p 56-59
- [14] "Étude de faisabilité centrale villageoise photovoltaïque de la région Condrieu", commune des

Haies (69), 2012, p5-p6.

[15] “ Etude d'impact sur l'environnement de la C.P.E.S”,13-32-PV-04, p36-40.

[16] cha p_14“Économie et marché du photovoltaïque”.

[17]C.SEMASSOU, “Definition des critères d'evaluation des performances et optimisation du système photovoltaïque autonome”, “Aide a la decision pour le choix de sites et systemes énergétiques adaptes aux besoin du benin”,Thèse de doctorat,université Bordeaux1 ,2011,p135.

[18] Ala 'K. Abu-Rumman, Iyad Muslih, Mahmoud. A.Barghash, “Life Cycle Costing of PV Generation system”, Vol. 4, no 4(2017) 252—158

[19] “Développement d'un projet photovoltaïque (PV)”, “les centrales solaires phototovoltaïques commerciales”, guide de l'intention des promoteurs de projets, p 4

[20]R.EL IDRISSEI“Généralité sur la production d'électricité photovoltaïque”, “ Démensionnement d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau” photovoltaïque” ,Teree "EST Fés", Rapport du stage de fin d'études , licence professionnelle ,2015-2016 .

[21] M. HATTI “Modélisation des composants du systéms hybridePV-PAC”, “Contribution à l'étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible ,Université d'Oran ,2010 ,p 58

[22]Condor électroniques

[23] Frédéric MAURY, “Développement d'interfaces utilisateur ”, “Réalisation d'une interface graphique de reconstruction d'un signal TNT pour le radar passif ”, mémoire de diplôme d'ingénieur CNAM , Paris , 2014

[24] Y.ACHOU ET A.RACHEDI, “Description de la carte de mesure et d'acquisition développée ”, “et d'affichage à base alisation d'une carte de mesure Réd'Arduino Mega2560 : application aux systèmes photovoltaïque ”, mémoire de master ,université de ouargla ,2016 ;p 43

[25] Matlab - Compléments GUI pdf

[27] COUR Mme CHEKIRED. « Chapitre 4 » ; « *INSTALLATION SOLAIRE PHOTVOLTAÏQUE: Mise en place d'une installation PV* » ppt .

[28]H.S. Yotto . “ conclusion générale»; «étude et conception d'une mini centrale photovoltaïque pour l'alimentation d'une partie de l'installation électrique de la présidence de la république du Bénin » ; mémoire pour l'obtention du master spécialise en génie électrique, énergétique et énergies renouvelables.

[29] Olivier GERGAUD « Chapitre 4 », «problématique économique », «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de cachan spécialité électronique ,2009.

