

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

**Filière : Electrotechnique
Spécialité : Énergie et environnement**

Présenté par : MERAH Mouad & MESSAOUDI Abdenour

Thème

**Dimensionnement d'un système hybride à énergie
renouvelable pour l'alimentation d'un navire**

Soutenu publiquement, le 01 / 07 / 2024, devant le jury composé de :

Mme/ Nadia Benahmed	Professeur	ESSA Tlemcen	Présidente
Mme/ FARADJI Djamilia née kherbouche	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme/ Ghomri Amina	Professeur	ESSA Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M/ Mebrouki Mohamed	MCA	ESSA Tlemcen	Examineur 1
M/ Chemidi Abdelkrim	MCA	ESSA Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Nous exprimons notre reconnaissance à Dieu, Allah le Tout-Puissant, qui nous a donné le courage d'affronter ce nouveau domaine et la force de mener à bien ce mémoire. Nous remercions sincèrement Madame Djamila Feradji pour son rôle d'encadreur, sa disponibilité constante et son écoute attentive tout au long de ce travail. Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers Madame Amina Ghomri pour son soutien, ses conseils et ses encouragements tout au long de l'année universitaire en tant que co-encadrante.

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury pour leur présence et l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant ce travail, que nous espérons avoir répondu à leurs attentes. Nos remerciements vont également à tout le personnel de la société de gestion des ports de pêche pour leurs conseils, leur patience et leur intérêt constant pour notre travail.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire par leurs conseils et leurs compétences. Nous remercions également tout le corps professoral de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT) pour leur engagement inlassable à créer les meilleures conditions pour le déroulement de nos études.

Dédicace

A Allah

Tout puissant qui m'a inspiré

Qui m'a guidé dans le bon chemin

Je vous dois ce que je suis devenue

À mon père bien-aimé, source infinie de joie et de bonheur, aucun mot ne saurait exprimer toute l'étendue de mon respect, de mon amour éternel et de ma gratitude pour les sacrifices que vous avez faits pour mon éducation et mon bien-être.

À ma mère, pilier de mes efforts, merci pour ton soutien inconditionnel et ton amour depuis mon enfance. Que ta bénédiction m'accompagne toujours.

À mes chères frères, Souheil, Amazigh, et à ma sœur Hadile, ainsi qu'à mes amies précieux Mouad, Anis, Amine, Zaki je vous remercie pour votre amour, vos conseils, votre aide et vos encouragements constants.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé, qui ont toujours été à mes côtés, merci pour votre encouragement et votre soutien moral inestimable.

Messaoudi Abdenour

Dédicace

A Allah

Tout puissant, qui m'a inspiré. Qui m'a guidé dans le bon chemin. Je vous dois ce que je suis.

A mes chers parents

Aucune expression ne saurait exprimer toute l'affection et tout l'amour que je vous porte. Que ce travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés de vos prières et le fruit de vos innombrables sacrifices

A toute ma famille.

A mes honorables enseignants

A tous mes amis qu'ils m'ont soutenu l'expression de mon respect et de mon grand attachement. A vous tous, je dédie mon modeste travail, mon parcours et ma vie.

Merah Mouad

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons conçu un système hybride pour alimenter les équipements électriques d'un navire propulsé par un moteur diesel, en utilisant des panneaux photovoltaïques. Grâce aux simulations réalisées avec HOMER Pro et PVSyst, nous avons optimisé le système afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts. Les résultats montrent que l'intégration des panneaux solaires permet de diminuer les émissions polluantes et les dépenses énergétiques, tout en assurant une alimentation électrique fiable et durable pour le navire.

Les mots clés : Système hybride, panneaux photovoltaïques, simulations, efficacité énergétique, durabilité

Summary:

In this thesis, we designed a hybrid system to power the electrical equipment of a ship propelled by a diesel engine, using photovoltaic panels. Through simulations conducted with HOMER Pro and PVSyst, we optimized the system to improve energy efficiency and reduce costs. The results show that integrating solar panels helps reduce emissions from burning fuel and energy expenses, while ensuring reliable and sustainable electrical power for the ship.

Key words : Hybrid system, photovoltaic panels, simulations, energy efficiency, sustainability

ملخص

في هذه الرسالة، قمنا بتصميم نظام هجين لتغذية الأجهزة الكهربائية في سفينة تعمل بمحرك ديزل باستخدام الألواح الشمسية من خلال المحاكاة التي قمنا بها باستخدام برنامج هومر برو و بي في سيستام ، قمنا بتحسين النظام لتحسين كفاءة الطاقة وتقليل التكاليف. تشير النتائج إلى أن دمج الألواح الشمسية يساعد في تقليل انبعاثات الملوثات الناتجة عن الاحتراق والنفقات الطاقية، مع ضمان توفير تيار كهربائي موثوق

الكلمات المفتاحية : نظام هجين، ألواح شمسية، محاكاة، كفاءة الطاقة، الاستدامة

Table des matières :

Introduction générale	1
1 Généralités sur les navires.....	4
1.1 Introduction sur les navires	4
1.2 Définition d'un navire.....	4
1.3 Structure d'un navire.....	5
1.4 Flottabilité d'un navire	5
1.5 Propulsion d'un navire.....	6
1.6 Types des navires	7
1.6.1 Catégorisation fondée sur le système propulsif	7
1.6.2 Catégorisation selon la finalité d'utilisation.....	8
1.7 Types des moteurs utilisés dans la propulsion des navires.....	10
1.7.1 Moteur diesel	10
1.7.2 Moteur à combustion	11
1.7.3 Moteur électrique.....	12
1.7.4 Moteur hybride	12
1.8 Hybridation pour l'alimentation des équipements à bord.....	13
1.8.1 Concept de l'hybridation maritime	13
1.8.2 Utilisation des panneaux photovoltaïques	13
1.8.3 Gestion de l'énergie hybride à bord	13
1.8.4 Avantages de l'hybridation	13
1.9 Système auxiliaire.....	14
1.9.1 Équipements électriques courants	14
1.9.2 Importance des systèmes auxiliaires	14
1.10 Conclusion	15
2 Généralités sur les énergies renouvelables	17
2.1 Introduction.....	17

2.2	Les énergies renouvelables.....	17
2.2.1	Définition des énergies renouvelables.....	17
2.2.2	Types des énergies renouvelables	17
2.2.3	Défis et perspectives des énergies renouvelables	17
2.2.4	Impacts environnementaux des énergies renouvelables.....	18
2.3	L'énergie solaire photovoltaïque	19
2.3.1	Définition de l'énergie solaire photovoltaïque	19
2.3.2	Effet photovoltaïque.....	19
2.3.3	Cellule solaire	19
2.3.3.1	Définition.....	19
2.3.3.2	Caractéristiques cellule solaire	20
2.3.4	Composants d'un système solaire photovoltaïque	23
2.3.5	Les types des panneaux photovoltaïques	24
2.3.6	Les avantages de l'énergie photovoltaïque	25
2.3.7	Les défis et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	25
2.4	Problématique de l'humidité et de l'eau salée pour les panneaux photovoltaïques	26
2.5	Conclusion	28
3	Simulation du système hybride	29
3.1	Description du navire concerné.....	29
3.2	Simulation avec HOMER Pro.....	30
3.2.1	Introduction.....	30
3.2.2	Présentation du logiciel HOMER Pro	31
3.2.3	Définition du logiciel HOMER Pro	32
3.2.4	Fonctionnement du logiciel HOMER PRO	32
3.2.4.1	Méthode générale d'utilisation HOMER PRO	34
3.2.4.2	Méthodologies spécifiques aux simulations	37
3.2.4.3	Les sorties	37
3.2.4.4	Fonctionnement	38

3.2.5	Simulation de notre travail	38
3.2.5.1	Configuration du système.....	39
3.2.5.2	Schéma de conception du système.....	39
3.2.5.3	Configuration des composants de système	40
3.2.5.3.1	Choix du générateur	40
3.2.5.3.2	Choix des PV	42
3.2.5.3.3	Irradiation solaire	43
3.2.5.3.4	Choix des batteries	46
3.2.5.3.5	Choix des convertisseurs	47
3.2.5.3.6	La charge	47
3.3	Simulation avec PVsyst	48
3.3.1	Présentation du Logiciel PVsyst	48
3.3.2	Objectifs du logiciel PVsyst	48
3.3.3	Options du logiciel PVsyst.....	50
3.3.4	Prédimensionnement	50
3.3.5	Conception du projet.....	50
3.3.6	Bases de données	51
3.3.7	Outils	51
3.3.8	Présentation du projet.....	52
3.3.8.1	Donnée géographique du site Ghazaouet,TLEMCEN	52
3.3.8.2	Données météorologiques.....	53
3.3.8.3	Orientation des modules photovoltaïques	54
3.3.8.4	Hauteur du soleil	55
3.3.9	Simulation d'un système photovoltaïque alimentant les équipements d'un bateau ...	56
3.3.9.1	Dimensionnement du système	57
3.3.9.1.1	Consommation journalière de notre bateau en électricité.....	57
3.3.9.1.2	Configuration des panneaux photovoltaïques	58
3.3.9.1.3	Configuration des batteries	59

3.3.9.1.4	Configuration du convertisseur	60
3.4	Conclusion	61
4	Résultats et interprétation	63
4.1	Introduction.....	63
4.2	Résultats pour HOMER Pro.....	63
4.2.1	Energie solaire globale.....	63
4.2.2	Production du champ PV et la consommation.....	65
4.2.3	Détails des composants du système étudié.....	66
4.2.3.1	Détails de la température	66
4.2.3.2	Détails de la charge.....	68
4.2.3.3	Détails du convertisseur	69
4.2.3.4	Détails des batteries	71
4.3	Résultats pour PVSyst	72
4.3.1	Distribution de l'irradiation incidente.....	72
4.3.2	Distribution de la puissance du champ PV.....	73
4.3.3	Energie solaire disponible.....	74
4.3.4	Schéma Entrée/Sortie.....	75
4.3.5	Diagramme des pertes.....	76
4.3.6	Production normalisée	77
4.3.7	Bilans et résultats principaux.....	79
4.4	Emissions du CO2	80
4.5	Etude économique	80
4.6	Conclusion	81
	Conclusion générale.....	82

Liste des figures

Figure 1-1 Port.....	4
Figure 1-2 Structure d'un navire	5
Figure 1-3 Système de propulsion en bord.	6
Figure 1-4 Système de propulsion hors-bord	7
Figure 1-5 Voiliers	8
Figure 1-6 Navire de fret.....	9
Figure 1-7 Bâtiments de guerre.....	10
Figure 1-8 L'installation d'un moteur diesel dans un navire	11
Figure 1-9 Turbine à gaz utilisée dans la propulsion d'un navire	11
Figure 2-1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.	20
Figure 2-2 Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque	22
Figure 2-3 Les composants d'un système photovoltaïques.....	24
Figure 2-4 Les types des panneaux photovoltaïques.....	25
Figure 2-5 Composition d'un module photovoltaïque.	26
Figure 2-6 Support amortisseur.	27
Figure 2-7 Panneaux photovoltaïques flexibles.....	28
Figure 3-1 Image réelle du navire concerné au port de Ghazaouet.....	29
Figure 3-2 Modèle conceptuel du logiciel HOMER.	33
Figure 3-3 Interface de logiciel HOMER Pro.....	34
Figure 3-4 Les équipements.....	35
Figure 3-5 Schéma de système.....	35
Figure 3-6 Ressources.	36
Figure 3-7 Donnée géographique de TLEMEN.....	39
Figure 3-8 Propulsion par moteur diesel.	40
Figure 3-9 Alimentations des équipements d'un navire par énergie renouvelable.....	40
Figure 3-10 Cout du générateur diesel.....	40
Figure 3-11 Courbe de la consommation du carburant par générateur diesel.	41
Figure 3-12 Puissance journalière produite par générateur diesel.....	41
Figure 3-13 Les données du coût du PV.	43
Figure 3-14 Production journalière moyenne du PV.....	43
Figure 3-15 Variation de l'irradiation et clarté solaire mensuelle et journalière du site de Ghazaouet.	44
Figure 3-16 L'évolution des températures mensuelles moyennes de Ghazaouet.....	45

Figure 3-17 Les données de la batterie.....	46
Figure 3-18 Les données du coût du convertisseur.	47
Figure 3-19 Le profil de charge.....	48
Figure 3-20 Donnée géographique de Ghazaouet.	53
Figure 3-21 Angle d'orientation.	55
Figure 3-22 Horizon de Ghazaouet.	56
Figure 3-23 Schéma Simplifié.....	57
Figure 3-24 Consommation journalière de notre bateau.	58
Figure 3-25 Configuration des panneaux photovoltaïques.....	59
Figure 3-26 Configuration des batteries.	60
Figure 3-27 Détails du convertisseur.....	61
Figure 4-1 L'énergie solaire global.....	64
Figure 4-2 L'énergie solaire incidente des champs PV.	65
Figure 4-3 Production électrique totale mensuelle.....	66
Figure 4-4 Température ambiante annuelle.....	67
Figure 4-5 Température ambiante journalière.	67
Figure 4-6 Profil de charge annuel.....	68
Figure 4-7 Profil de charge journalier suivant les saisons.....	69
Figure 4-8 Indications puissance de l'onduleur.	70
Figure 4-9 La puissance d'entrée du convertisseur.	70
Figure 4-10 La puissance de sortie du convertisseur.	71
Figure 4-11 Indication des paramètres de la batterie.	71
Figure 4-12 Distribution de l'irradiation incidente.....	73
Figure 4-13 Distribution de la puissance du champ PV.	74
Figure 4-14 Energie solaire disponible.....	75
Figure 4-15 Schéma d'entrée / sortie journalier.....	76
Figure 4-16 Diagramme des pertes.	77
Figure 4-17 Diagramme de la production normalisée.	78
Figure 4-18 Les émissions.	80

Liste des tableaux

Tableau 1 Paramètres pour le choix de logiciel HOMER Pro.	31
Tableau 2 Caractéristiques du générateur diesel.	42
Tableau 3 Radiation solaire moyenne.	44
Tableau 4 Les températures mensuelles.	46
Tableau 5 Caractéristiques de la batterie Discover 12VRE-3000T.	47
Tableau 6 Conditions climatiques de Ghazaouet.	54
Tableau 7 Résultat optimal pour HOMER Pro.	63
Tableau 8 Bilan énergétique.	79
Tableau 9 Prix unitaire et total des principaux composants du système.	81

Introduction générale

Introduction générale

La propulsion maritime est un pilier essentiel du commerce mondial et du transport de passagers, assurant la mobilité des marchandises et des personnes à travers les océans du monde. Cependant, cette activité n'est pas exempte de défis majeurs, notamment en ce qui concerne l'alimentation des équipements électriques à bord des navires. Ces défis sont divers et complexes, allant de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le changement climatique à la recherche de solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Dans ce contexte, l'intégration de sources d'énergie renouvelables émerge comme une réponse prometteuse pour relever les défis liés à l'alimentation électrique des navires. Parmi ces sources, les panneaux photovoltaïques se distinguent par leur capacité à convertir directement la lumière du soleil en électricité, offrant ainsi une solution propre et renouvelable pour répondre aux besoins énergétiques des navires. Cette technologie présente de nombreux avantages, notamment sa disponibilité abondante et gratuite, sa fiabilité, sa durabilité et son impact environnemental réduit par rapport aux sources d'énergie conventionnelles telles que les combustibles fossiles.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des panneaux photovoltaïques pour alimenter les équipements électriques des navires. Cette évaluation comprendra une analyse approfondie de la faisabilité technique, économique et environnementale de cette approche innovante, ainsi que son potentiel à contribuer à une navigation maritime plus durable et respectueuse de l'environnement. En se concentrant sur l'intégration de cette technologie dans les systèmes de propulsion des navires, cette recherche vise à explorer de nouvelles possibilités pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir une navigation maritime plus écologique.

Pour atteindre cet objectif ambitieux, cette mémoire sera structurée en trois parties principales. Dans un premier temps, nous explorerons le contexte de la propulsion maritime et les défis spécifiques liés à l'alimentation des équipements électriques des navires. Ensuite, nous détaillerons les objectifs de la recherche, qui visent à évaluer l'efficacité des panneaux photovoltaïques dans ce contexte maritime en constante évolution. Enfin, nous présenterons le plan détaillé de la mémoire, exposant les différentes sections et les aspects clés qui seront abordés dans chacune d'elles.

Dans l'ensemble, cette recherche s'inscrit dans une démarche visant à fournir des solutions concrètes aux défis de l'alimentation des équipements électriques des navires, en mettant en

Introduction générale

lumière le potentiel des panneaux photovoltaïques comme source d'énergie renouvelable dans le domaine maritime. En développant une compréhension approfondie de cette technologie émergente et de ses applications pratiques, nous espérons contribuer de manière significative à la promotion d'une navigation maritime plus durable et respectueuse de l'environnement.

Chapitre 1 : Généralités sur les navires

1 Généralités sur les navires

1.1 Introduction sur les navires

Les navires jouent un rôle crucial dans l'économie mondiale en transportant plus de 80 % des marchandises échangées à travers le monde. Ils sont essentiels pour le commerce international, le transport de passagers, et les opérations spécialisées telles que la recherche scientifique et les services offshore. Le secteur maritime génère des millions d'emplois et contribue de manière significative au PIB de nombreux pays.

L'objectif de cette étude est d'examiner l'hybridation pour l'alimentation des équipements électriques à bord des navires, en utilisant des panneaux photovoltaïques (PV) pour les systèmes auxiliaires, tout en maintenant un moteur diesel pour la propulsion principale. Cette approche vise à réduire la consommation de carburant, diminuer les émissions polluantes et améliorer l'efficacité énergétique globale.



Figure 1-1 Port [1].

1.2 Définition d'un navire

Les navires, symboles intemporels de l'ingéniosité humaine, sont des constructions conçues pour flotter et naviguer sur les étendues d'eau, guidées par la volonté de leurs occupants ou par des systèmes de navigation automatisés. Ils servent une multitude de desseins, du transport maritime ou fluvial au divertissement en passant par la pêche et même la guerre en mer. Qu'ils voguent pour transporter des cargaisons précieuses, pour offrir des moments de détente lors de

croisières de plaisance, ou encore pour défendre les frontières maritimes, leur forme et leur fonction s'adaptent à un éventail diversifié d'usages.

1.3 Structure d'un navire

Tout bateau, quelle que soit sa taille ou sa finalité, possède des éléments fondamentaux. À sa base se trouve le flotteur, une structure solide garantissant l'étanchéité, principalement constituée de la coque et éventuellement recouverte par un pont. Les parties essentielles d'un bateau sont identifiées comme suit [2] :

- La coque, qui constitue le corps principal du bateau assurant sa flottabilité et son imperméabilité
- La proue, qui désigne la partie avant de la coque.
- La poupe, située à l'arrière de la coque.
- L'hélice, un dispositif crucial pour la propulsion.

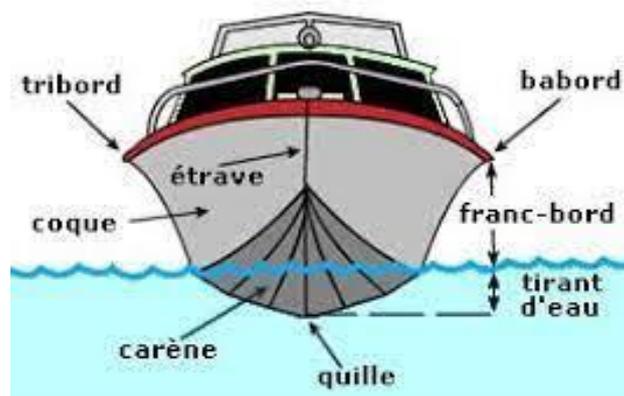


Figure 1-2 Structure d'un navire [3].

1.4 Flottabilité d'un navire

La coque, élément central de tout bateau, assure sa flottabilité et son imperméabilité. Les bateaux peuvent être dotés d'une seule coque, appelés monocoques, ou de plusieurs, formant des multicoques comme les catamarans à deux coques, les trimarans à trois coques, et même les quadri marans et penta marans. Leur rigidité découle en grande partie de leur forme courbe, une caractéristique mécanique essentielle des coques [2].

1.5 Propulsion d'un navire

La propulsion maritime englobe tous les systèmes permettant aux bateaux de se mouvoir dans l'eau. Elle est généralement assurée par un propulseur entraîné par un moteur. L'efficacité d'un système de propulsion se mesure à sa capacité à fournir une poussée maximale avec une consommation minimale de carburant à une vitesse donnée. Cette efficacité dépend du rendement énergétique du moteur, de la transmission mécanique et de l'efficacité hydrodynamique du propulseur [4].

- **Les systèmes de propulsion en bord**

Il est crucial de sélectionner le système de propulsion approprié pour une embarcation. Parmi les options disponibles, le moteur en bord se démarque comme une solution de propulsion marine. Contrairement au moteur hors-bord, qui est fixé à l'extérieur de la coque du bateau, le moteur inbord est encapsulé à l'intérieur de la coque. Il est relié à une hélice de propulsion par un arbre de transmission, offrant ainsi une configuration plus intégrée et protégée (voir Figure 1-3) [5].

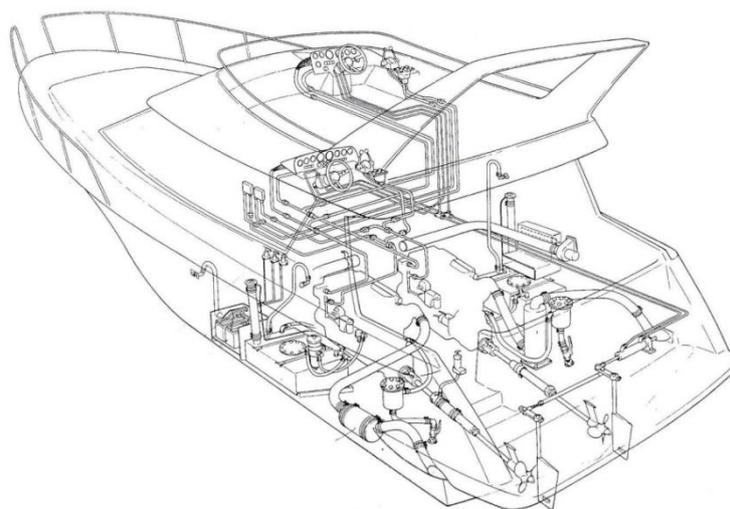


Figure 1-3 Système de propulsion en bord [5].

- **Les systèmes de propulsion hors-bord**

Un moteur hors-bord est un type de propulsion utilisé principalement sur les petits navires tels que les bateaux de plaisance, les bateaux de pêche et les embarcations légères. Il se compose

d'un moteur monté à l'extérieur de la coque du navire, généralement fixé à la poupe (arrière) de l'embarcation. Ce moteur est généralement constitué d'un moteur à combustion interne, d'une hélice pour propulser le navire et d'un système de direction permettant de contrôler la direction du mouvement [4].

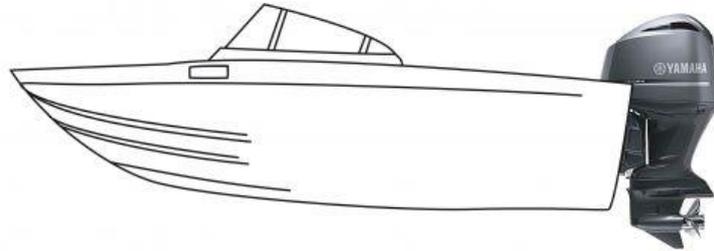


Figure 1-4 Système de propulsion hors-bord [6].

1.6 Types des navires

Les embarcations maritimes se distinguent par les systèmes qui les propulsent et par les fonctions pour lesquelles elles ont été créées. Cette division en catégories se base tant sur la technologie propulsive utilisée que sur l'objectif visé par chaque type de navire.

1.6.1 Catégorisation fondée sur le système propulsif

Voiliers : Ces bateaux exploitent la force du vent comme principale source d'énergie pour naviguer. Autrefois prépondérants pour tous les types de voyages maritimes, leur usage se limite désormais essentiellement à des fins éducatives, sportives ou de loisirs [7].

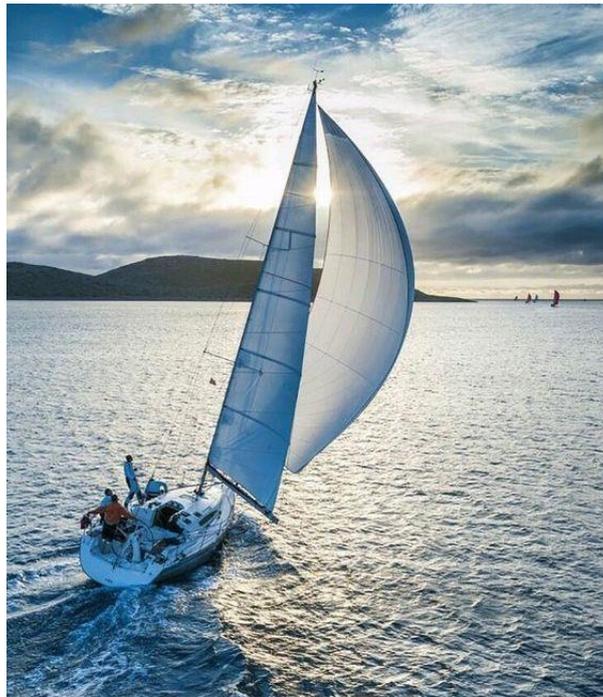


Figure 1-5 Voiliers [8].

Bateaux motorisés

- **Moteurs Diesel** : Constituent le choix préféré pour l'équipement des bateaux commerciaux actuels, grâce à leur capacité à transformer le fioul en puissance mécanique.
- **Turbines à gaz** : Sélectionnées surtout pour équiper des navires de l'armée et quelques bateaux à haute vitesse, elles opèrent d'une manière semblable aux turbines utilisées dans l'aviation.

Propulsion nucléaire : Génère de la vapeur par fission nucléaire pour activer les turbines. Elle est surtout employée sur des bateaux militaires, y compris des sous-marins et des porte-avions.

Systèmes hybrides : Ils marient différentes technologies propulsives, telles qu'une combinaison entre un moteur diesel pour le large et une motorisation électrique pour les zones nécessitant une grande attention écologique ou pour améliorer la manœuvrabilité dans les ports.

Propulsion électrique : Regroupe les navires fonctionnant exclusivement à l'électricité ou en mode hybride. L'électricité peut être produite directement à bord par des générateurs ou stockée dans des batteries.

1.6.2 Catégorisation selon la finalité d'utilisation

Navires de fret

Destinés au transport de diverses cargaisons, incluant les conteneurs, les marchandises en vrac sec (comme les céréales et le charbon) ou en vrac liquide (tels que le pétrole et les produits chimiques) [7].



Figure 1-6 Navire de fret [9].

Navires à passagers

Comprend les bateaux de croisière, les ferries (assurant le transport de passagers et de véhicules sur des distances courtes) et les bateaux-taxis.

Navires de pêche

Tels que les chalutiers, les senneurs et les palangriers, sont exploités pour la capture de poisson à des fins commerciales.

Bâtiments de guerre

Incluent les porte-avions, les destroyers, les frégates et les sous-marins, utilisés pour les missions de défense et d'intervention militaire.



Figure 1-7 Bâtiments de guerre [10].

Navires spécialisés

Englobent les bateaux de recherche scientifique, les brise-glaces, les remorqueurs, les navires de sauvetage, les unités de forage en mer et les navires poseurs de câbles.

Embarcations de plaisance

Yachts, voiliers et bateaux à moteur conçus pour des activités de détente privées ou en location.

Navires verts à énergies renouvelables

Explorent l'utilisation d'énergies alternatives, incluant l'énergie éolienne (comme les navires dotés de rotors Flettner ou équipés de voiles modernes), l'énergie solaire, ou l'hydrogène.

1.7 Types des moteurs utilisés dans la propulsion des navires

1.7.1 Moteur diesel

Les moteurs Diesel pour les navires représentent une part significative de la propulsion maritime moderne, grâce à leur efficacité énergétique, leur fiabilité et leur capacité à utiliser un carburant moins cher comparé aux autres options de carburant maritime. Ces moteurs fonctionnent sur le principe du cycle Diesel, où l'air est comprimé à une pression élevée, ce qui augmente sa température. Lorsque le carburant est injecté dans la chambre de combustion, il s'enflamme en raison de la température élevée de l'air.



Figure 1-8 L'installation d'un moteur diesel dans un navire [11].

1.7.2 Moteur à combustion

- **Turbine à gaz**

Les turbines à gaz dans le contexte naval sont des moteurs à combustion qui utilisent l'air comprimé et le carburant pour créer une forte poussée, propulsant ainsi le navire. Elles sont particulièrement appréciées pour leur rapport puissance-poids élevé, leur capacité à atteindre rapidement leur pleine puissance et leur efficacité à grande vitesse, ce qui les rend idéales pour les navires à grande vitesse et certains navires militaires, tels que les destroyers et les frégates.



Figure 1-9 Turbine à gaz utilisée dans la propulsion d'un navire [12].

- **Turbine à vapeur**

Les moteurs à vapeur ont joué un rôle crucial dans l'histoire de la propulsion navale, permettant aux navires de se libérer de la dépendance au vent et aux courants marins. Bien que largement remplacés aujourd'hui par des moteurs Diesel et des turbines à gaz plus efficaces, les moteurs à vapeur restent un sujet d'étude important pour comprendre l'évolution de la technologie maritime [13].

1.7.3 Moteur électrique

La propulsion électrique des navires repose sur l'utilisation de moteurs électriques pour assurer leur déplacement en mer. Généralement, la production de l'énergie électrique nécessaire est assurée par des systèmes combinant des moteurs thermiques et des alternateurs. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, cette forme de propulsion est désormais contrôlée par des variateurs de vitesse. Contrairement à la propulsion directe, où les hélices sont entraînées directement par des moteurs thermiques tels que les moteurs à vapeur ou à combustion interne, cette méthode présente des similitudes avec celle des voitures hybrides, mais elle est plus évoluée. Des exemples concrets incluent l'utilisation de ferries électriques dans les fjords norvégiens et l'introduction, en 2018, d'un premier cargo électrique autonome capable de parcourir plus de 120 km. Les moteurs électriques se déclinent en trois types, bien que leur principe de fonctionnement reste fondamentalement le même : les moteurs à courant continu, les moteurs à courant alternatif synchrones (où le rotor tourne à la même vitesse que le courant dans les bobines) et les moteurs à courant alternatif asynchrones (où le rotor tourne légèrement moins vite que le courant envoyé). Il est également pertinent de distinguer entre les moteurs avec balais et ceux sans balais (brushless). De manière générale, un moteur électrique est composé d'un rotor tournant à l'intérieur d'un stator. Le rotor génère une force électromagnétique lorsqu'un courant lui est appliqué, ce qui entraîne le mouvement du stator. En l'absence d'injection de courant, la force magnétique cesse et le mouvement s'arrête [14].

1.7.4 Moteur hybride

Les moteurs hybrides pour les navires représentent une technologie de propulsion innovante qui combine l'utilisation de moteurs à combustion (généralement diesel) avec des moteurs électriques et des systèmes de stockage d'énergie, comme des batteries. Cette approche offre plusieurs avantages, dont une réduction des émissions de polluants, une efficacité énergétique accrue, et une amélioration de la performance opérationnelle [15].

1.8 Hybridation pour l'alimentation des équipements à bord

1.8.1 Concept de l'hybridation maritime

L'hybridation dans le contexte maritime consiste à combiner différentes sources d'énergie pour répondre aux besoins énergétiques des navires. Cela implique généralement l'intégration de sources d'énergie conventionnelles, telles que les moteurs diesel, avec des sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux photovoltaïques. L'objectif est d'optimiser l'efficacité énergétique, de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie maritime [16].

1.8.2 Utilisation des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont utilisés pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité à bord des navires. Ces panneaux peuvent être installés sur le pont ou d'autres surfaces exposées au soleil, et l'électricité produite peut être utilisée pour alimenter les équipements électriques à bord, tels que l'éclairage, les systèmes de navigation, les communications, etc. L'utilisation de panneaux photovoltaïques permet de réduire la consommation de carburant des générateurs diesel conventionnels et contribue ainsi à une plus grande autonomie et à une réduction des émissions de CO₂ [17].

1.8.3 Gestion de l'énergie hybride à bord

La gestion de l'énergie hybride à bord des navires est essentielle pour garantir un fonctionnement efficace et fiable du système. Cela implique la mise en place de systèmes de contrôle et de gestion de l'énergie qui surveillent et optimisent la production, le stockage et la distribution de l'électricité à bord. Des algorithmes avancés sont souvent utilisés pour optimiser la charge des batteries, le fonctionnement des générateurs diesel et l'utilisation de l'énergie solaire en fonction des besoins de charge et des conditions météorologiques [18].

1.8.4 Avantages de l'hybridation

Les avantages de l'hybridation pour l'alimentation des équipements à bord des navires sont nombreux. En plus de réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes, l'hybridation permet également de diminuer les coûts opérationnels à long terme en prolongeant la durée de vie des moteurs diesel, en réduisant les besoins en maintenance et en offrant une plus grande flexibilité opérationnelle. De plus, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable

contribue à la durabilité environnementale de l'industrie maritime et à sa conformité aux réglementations environnementales de plus en plus strictes [19].

1.9 Système auxiliaire

1.9.1 Équipements électriques courants

Les systèmes auxiliaires à bord des navires sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité des opérations quotidiennes. Voici les principaux équipements électriques courants :

- **Éclairage** : Les systèmes d'éclairage à bord fournissent la visibilité nécessaire pour les opérations de nuit et dans des zones faiblement éclairées, assurant la sécurité et l'efficacité [20].
- **Systèmes de navigation** : Ces systèmes incluent les radars, les GPS et les compas électroniques qui sont cruciaux pour la navigation précise et sûre du navire [21].
- **Systèmes de communication** : Ils permettent la communication interne et externe, y compris les systèmes de radio VHF, les téléphones satellites et les interphones, essentiels pour la coordination des opérations et la sécurité [22].
- **Systèmes de sécurité** : Comprennent les alarmes incendie, les détecteurs de gaz et les systèmes de surveillance, garantissant la sécurité à bord et la protection contre les incidents [23].
- **Équipements de divertissement (TV)** : Les téléviseurs et autres équipements de divertissement fournissent des loisirs aux passagers et à l'équipage, contribuant à leur bien-être pendant les longs voyages [20].
- **Pompes et systèmes de traitement de l'eau** : Ils assurent la fourniture d'eau potable, le traitement des eaux usées et le pompage de l'eau de ballast, essentiels pour la santé à bord et le respect des réglementations environnementales [21].

1.9.2 Importance des systèmes auxiliaires

Les systèmes auxiliaires jouent un rôle crucial dans le fonctionnement quotidien et la sécurité des navires. Ils assurent non seulement la sécurité et le confort de l'équipage et des passagers, mais aussi l'efficacité opérationnelle du navire. De plus, ces systèmes représentent une part significative de la consommation énergétique totale à bord, ce qui souligne l'importance de l'optimisation de leur gestion énergétique [23].

1.10 Conclusion

Les navires sont des éléments essentiels du commerce mondial, du transport de passagers et des opérations spécialisées en mer. Ils se déclinent en différentes catégories, allant des navires de commerce aux navires de passagers et aux navires spécialisés tels que les navires de recherche et les navires de service offshore. Les moteurs diesel restent les moteurs de propulsion les plus couramment utilisés à bord des navires en raison de leur fiabilité, de leur efficacité et de leur disponibilité de carburant.

L'hybridation pour l'alimentation des équipements électriques à bord des navires offre de nombreux avantages, même en l'absence de propulsion hybride. En utilisant des sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires pour alimenter les systèmes auxiliaires, les navires peuvent réduire leur consommation de carburant, leurs émissions polluantes et leurs coûts opérationnels, tout en améliorant leur efficacité énergétique globale.

L'hybridation offre un potentiel considérable pour l'avenir du transport maritime en permettant une transition vers des solutions énergétiques plus durables et respectueuses de l'environnement. Avec l'évolution des technologies, y compris le développement de batteries plus efficaces et de systèmes de gestion de l'énergie avancés, l'hybridation devrait jouer un rôle de plus en plus important dans la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie maritime.

***Chapitre 2 : Généralités sur les énergies
renouvelables***

2 Généralités sur les énergies renouvelables

2.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelable se positionnent en première ligne dans le mouvement vers une transition énergétique durable. Ces alternatives, tirées de ressources naturelles incluant le soleil, le vent, l'eau, et la géothermie, constituent une option fondamentale en remplacement des combustibles fossiles, dont les réserves sont limitées. Leur intégration est centrale aux enjeux économiques et environnementaux à l'échelle mondiale.

2.2 Les énergies renouvelables

2.2.1 Définition des énergies renouvelables

Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables proviennent de ressources naturelles capables de se renouveler plus rapidement qu'elles ne sont consommées. Cette catégorie englobe un large éventail de sources, y compris l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, de la biomasse, et géothermique, fournissant ainsi une multitude d'options pour des solutions énergétiques pérennes.

2.2.2 Types des énergies renouvelables

Les sources d'énergie renouvelable se présentent sous plusieurs formes, chacune possédant ses spécificités et domaines d'application particuliers [24] :

L'énergie solaire, qui capte la lumière et la chaleur solaires pour générer de l'électricité et du chauffage.

L'énergie éolienne, qui convertit la puissance du vent en électricité à l'aide d'éoliennes.

L'énergie hydroélectrique, qui exploite l'énergie de l'eau en mouvement, y compris les cours d'eau et les marées, pour produire de l'électricité.

La biomasse, qui transforme les matières organiques, comme les résidus agricoles et forestiers, en énergie, que ce soit sous forme de biogaz, de biocarburants, ou de chaleur.

La géothermie, qui utilise la chaleur interne de la Terre pour fournir de l'électricité et du chauffage.

2.2.3 Défis et perspectives des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables rencontrent plusieurs défis dans leur déploiements :

Intermittence : La production varie selon le climat et l'heure, ce qui peut rendre difficile l'assurance d'une alimentation constante.

Coûts initiaux : Les installations comme les panneaux solaires et les éoliennes nécessitent des investissements importants au départ.

Usage de l'espace : Les grandes installations nécessaires pour la production d'énergie solaire ou éolienne peuvent entraîner des conflits d'utilisation des terres.

Stockage de l'énergie : La technologie actuelle de stockage d'énergie est coûteuse et doit encore être améliorée pour gérer efficacement l'énergie produite

2.2.4 Impacts environnementaux des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont un impact environnemental globalement positif, surtout lorsqu'elles sont comparées aux sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Voici les principaux impacts environnementaux positifs des énergies renouvelables [25] :

Réduction des émissions de gaz à effet de serre : L'utilisation d'énergies renouvelables permet de diminuer considérablement les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Moindre pollution de l'air : En remplaçant les combustibles fossiles, les énergies renouvelables réduisent la pollution de l'air, ce qui peut améliorer la santé publique en diminuant les maladies respiratoires et cardiovasculaires liées à la pollution.

Utilisation durable des ressources : Les énergies renouvelables, comme le soleil, le vent et l'eau, sont pratiquement inépuisables à l'échelle humaine, contrairement aux combustibles fossiles, ce qui assure une source d'énergie plus durable à long terme.

Réduction de l'utilisation et de la pollution de l'eau : Les technologies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne, utilisent peu ou pas d'eau pour leur fonctionnement, contrairement à certaines centrales à combustibles fossiles et nucléaires qui nécessitent d'importantes quantités d'eau pour le refroidissement.

Cependant, elles peuvent avoir des impacts négatifs mineurs, tels que l'effet sur les écosystèmes locaux et l'utilisation des terres, mais ces impacts sont généralement moins sévères que ceux liés aux énergies fossiles

2.3 L'énergie solaire photovoltaïque

Dans notre travail on s'intéresse à l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque.

2.3.1 Définition de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est l'énergie obtenue à partir du soleil. Elle est captée par des panneaux solaires qui convertissent la lumière du soleil en électricité ou en chaleur. L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et durable qui ne produit aucune émission de gaz à effet de serre [14].

2.3.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Ce phénomène repose sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec des semi-conducteurs, et il est expliqué en détail dans la section suivante. Le terme "photovoltaïque" combine "photo", signifiant lumière, et "volta", signifiant électricité, indiquant ainsi la génération d'électricité à partir de la lumière. L'effet photovoltaïque décrit le processus de conversion de l'énergie solaire, sous forme de photons, en énergie électrique grâce à des cellules solaires. L'effet photoélectrique se manifeste par l'émission d'électrons d'un matériau (métal ou semi-conducteur) lorsqu'il est exposé à la lumière. Cette émission d'électrons n'a lieu que si la fréquence de la lumière dépasse un certain seuil, qui dépend du matériau. Le nombre d'électrons émis, influençant l'intensité du courant produit, est proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. Il est important de distinguer deux phénomènes : l'émission des électrons proprement dite et la modification de la conductivité du matériau, qui aboutit à l'effet photovoltaïque [26].

2.3.3 Cellule solaire

2.3.3.1 Définition

Une cellule solaire, également connue sous les noms de photopile ou cellule photovoltaïque, est un dispositif électronique destiné à convertir directement la lumière du soleil en électricité exploitable. Elle est constituée de fines couches de matériaux semi-conducteurs, principalement du silicium, dotées de propriétés électriques spécifiques.

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur le principe de l'effet photovoltaïque. Lorsque la lumière solaire atteint la surface de la cellule, elle excite les électrons présents dans le

matériau semi-conducteur. Ces électrons sont alors libérés et mis en mouvement, générant ainsi un courant électrique. Ce courant peut être récupéré via des contacts métalliques situés sur la cellule solaire, puis utilisé pour alimenter divers appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation future.

2.3.3.2 Caractéristiques cellule solaire

➤ Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque

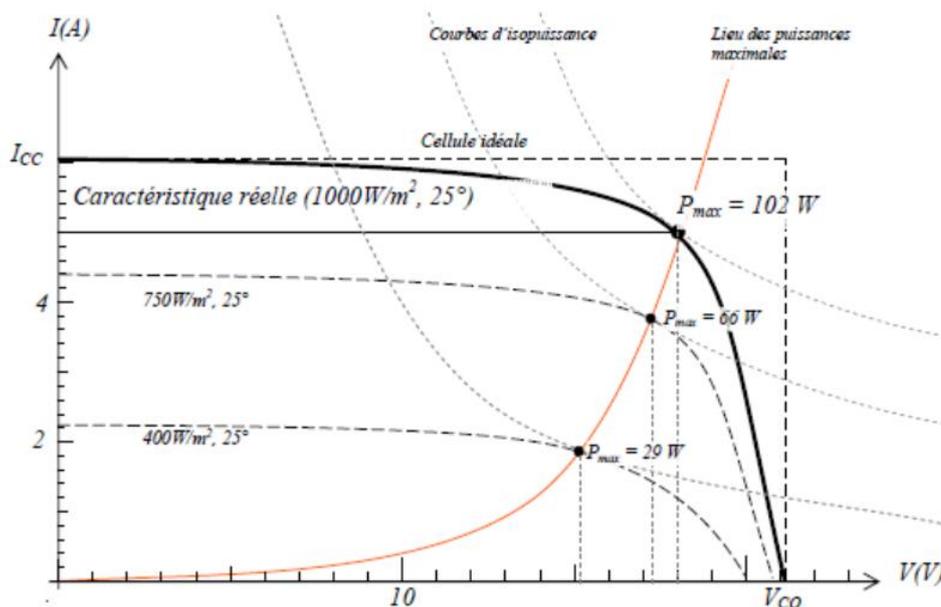


Figure 2-1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [27].

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque (PV) montre la relation entre le courant (I) produit et la tension (V) aux bornes de la cellule. Cette courbe, appelée courbe I-V, est spécifique aux conditions ambiantes de fonctionnement, notamment l'ensoleillement et la température de surface de la cellule [28].

Points Clés de la Courbe I-V :

1. Conditions Ambiantes :

- La courbe I-V varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. À un ensoleillement donné, la courbe montre comment le courant change avec la tension appliquée aux bornes de la cellule.

2. Variation avec l'ensoleillement :

- Avec une augmentation de l'irradiation solaire, le courant produit par la cellule augmente, ce qui déplace la courbe I-V vers le haut. Cependant, la tension en circuit ouvert (VOC) augmente légèrement avec l'ensoleillement.

3. Variation avec la température :

- La température affecte principalement la tension en circuit ouvert. Une augmentation de la température réduit la VCO et augmente le courant de court-circuit, ce qui déplace la courbe I-V vers la gauche.

Explication Graphique :

- **Courant de Court-Circuit (ICC)** : Le point où la courbe I-V coupe l'axe du courant (I), représentant le courant maximal produit lorsque la tension est nulle.
- **Tension de Circuit Ouvert (VCO)** : Le point où la courbe I-V coupe l'axe de la tension (V), représentant la tension maximale lorsque le courant est nul.
- **Point de Puissance Maximale (MPP)** : Le point sur la courbe où le produit de la tension et du courant ($V * I$) est maximal, représentant l'efficacité optimale de la cellule.

Impact des Conditions sur la Courbe I-V :

- **Ensoleillement :**
 - **Haute Irradiation** : Augmente ICC et déplace la courbe vers le haut.
 - **Faible Irradiation** : Diminue ICC et déplace la courbe vers le bas.
 - **Température :**
 - **Haute Température** : Réduit VCO et déplace la courbe vers la gauche.
 - **Basse Température** : Augmente VCO et déplace la courbe vers la droite.
- **Caractéristique puissance – tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque**

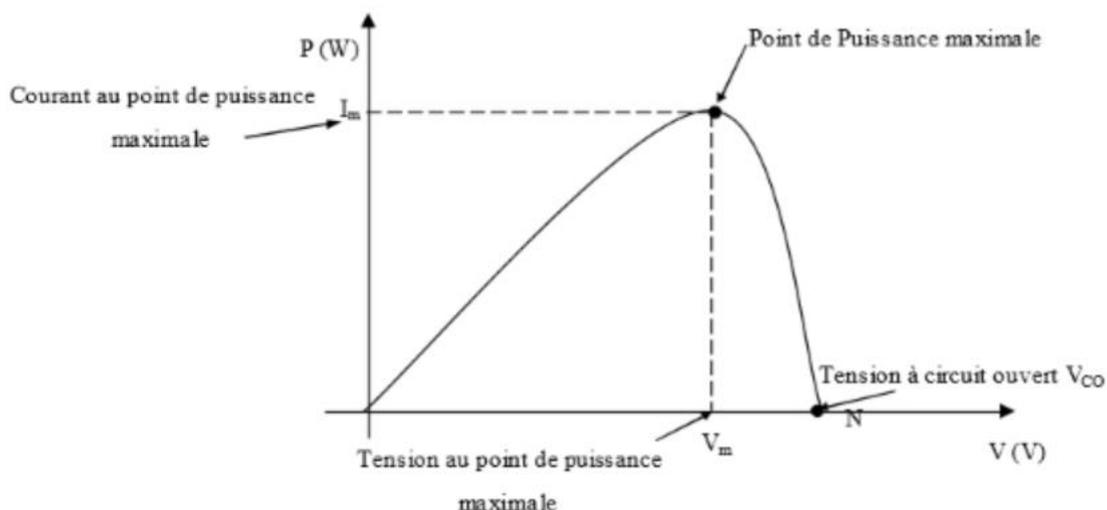


Figure 2-2 Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque [29].

La courbe caractéristique puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque (PV) décrit la relation entre la puissance de sortie de la cellule et la tension aux bornes de la cellule. Cette courbe est cruciale pour comprendre et optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, car elle permet de déterminer le point de puissance maximale (MPP) où la cellule fonctionne de manière la plus efficace [28].

Points Clés de la Courbe P-V :

1. Point de Puissance Maximale (MPP) :

- Le MPP est le point sur la courbe P-V où le produit de la tension (V) et du courant (I) est maximal. À ce point, la cellule PV produit la puissance maximale possible.
- La puissance au MPP est souvent notée PMPP

2. Forme de la Courbe P-V :

- La courbe P-V commence à zéro lorsque la tension est nulle (circuit court-circuit) et augmente jusqu'au MPP, puis redescend vers zéro lorsque la tension atteint la tension de circuit ouvert (VCO).
- La courbe a généralement une forme de cloche asymétrique.

3. Variation avec l'ensoleillement :

- Une augmentation de l'ensoleillement augmente le courant de court-circuit (ISC) et, par conséquent, la puissance maximale PMPP . La forme générale de la courbe reste la même, mais elle est décalée vers le haut.

4. Variation avec la température :

- Une augmentation de la température réduit la tension de circuit ouvert (VCO), ce qui déplace le MPP vers des tensions plus basses. La puissance maximale PMPP diminue avec l'augmentation de la température en raison de la diminution de VCO.

2.3.4 Composants d'un système solaire photovoltaïque

Un système PV (photovoltaïque) est un système qui utilise des panneaux solaires pour convertir l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Ses composants principaux sont les suivants [30] :

Panneaux solaires

Les panneaux solaires, également appelés modules photovoltaïques, sont constitués de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Les panneaux solaires sont généralement installés sur le toit ou dans un endroit exposé au soleil pour capturer l'énergie solaire.

Batterie

Une batterie peut être utilisée pour stocker l'excédent d'électricité produite par les panneaux solaires. Cela permet d'utiliser cette énergie plus tard lorsque les panneaux solaires ne produisent pas suffisamment d'électricité, comme la nuit ou lors des journées nuageuses. Les batteries sont particulièrement utiles dans les systèmes autonomes (hors réseau) qui ne sont pas connectés au réseau électrique.

Convertisseur

Les panneaux solaires produisent de l'électricité en courant continu (CC), tandis que la plupart des appareils domestiques et du réseau électrique fonctionnent avec du courant alternatif (CA). Le convertisseur, également appelé onduleur, convertit le courant continu en courant alternatif pour alimenter les appareils électriques. Il existe différents types d'onduleurs, tels que les onduleurs à onde sinusoïdale pure, les onduleurs à onde modifiée, et les micro-onduleurs (qui sont intégrés à chaque panneau solaire).

Régulateur de charge

Un régulateur de charge est utilisé pour contrôler le flux d'électricité entre les panneaux solaires et la batterie. Il protège la batterie contre la surcharge ou la décharge excessive et prolonge sa durée de vie en maintenant une charge optimale.

Charges (ou consommateurs)

Les charges dans un système PV sont les appareils électriques qui utilisent l'électricité produite par les panneaux solaires ou stockée dans la batterie. Cela peut inclure l'éclairage, les appareils électroménagers, les systèmes de chauffage ou de refroidissement, les pompes à eau, les systèmes de communication, etc. Les charges peuvent être alimentées directement par les panneaux solaires ou par le biais de la batterie et du convertisseur.

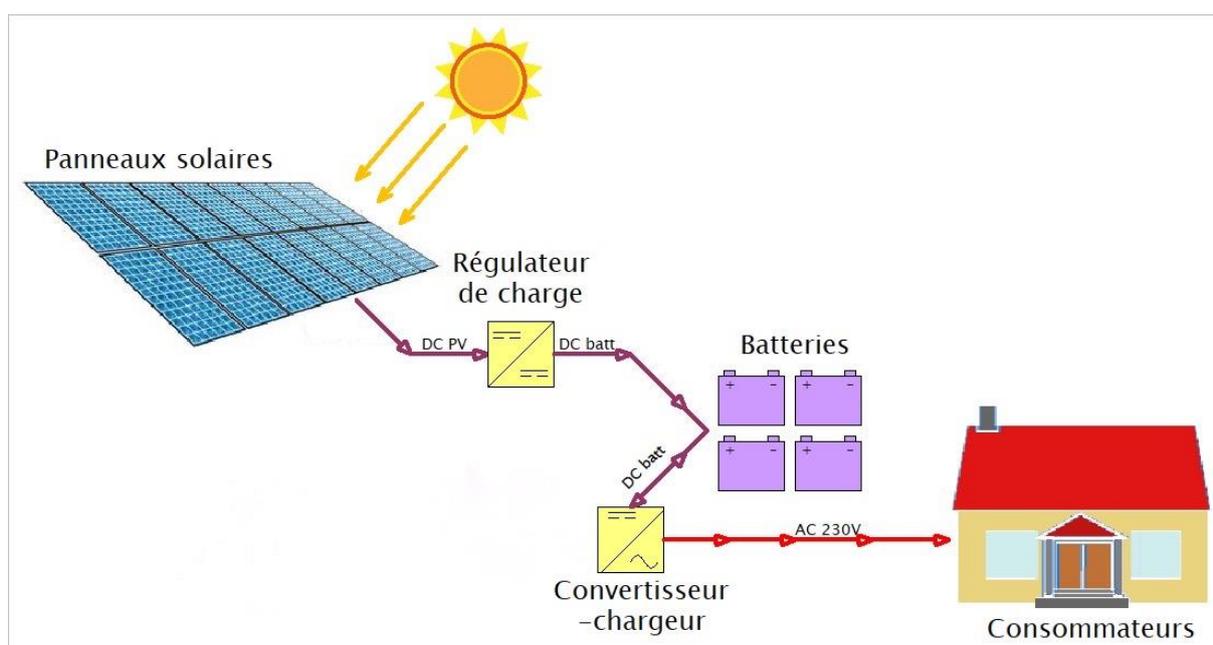


Figure 2-3 Les composants d'un système photovoltaïques [31].

2.3.5 Les types des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques (PV) se déclinent principalement en trois types [32] :

Monocristallin : Fabriqués à partir de silicium pur sous forme cristalline, ils offrent une efficacité élevée mais sont généralement plus coûteux.

Polycristallin : Constitués de fragments de silicium cristallisé, ils ont une efficacité légèrement inférieure et un coût moindre par rapport aux monocristallins.

Film mince (amorphe) : Fabriqués en déposant une ou plusieurs couches fines de matériaux photovoltaïques sur un support, ils sont moins chers et plus flexibles, mais aussi moins efficaces que les deux premiers types.

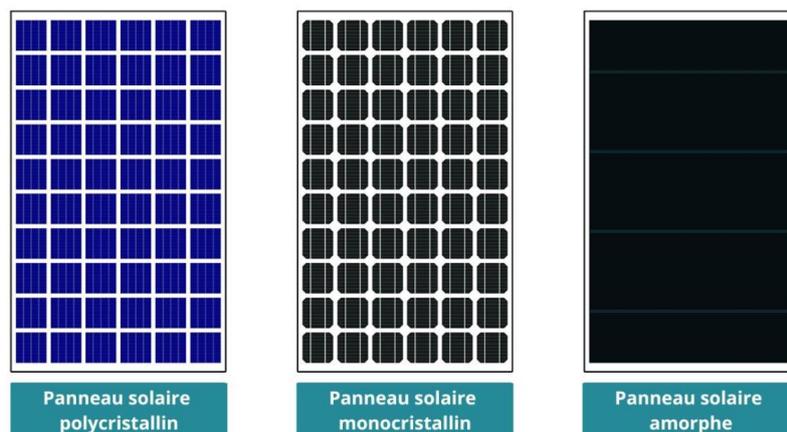


Figure 2-4 Les types des panneaux photovoltaïques [33].

2.3.6 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre une pléthore d'avantages qui la rendent de plus en plus attrayante pour les consommateurs et les entreprises [34] :

Réduction des dépenses d'énergie : En produisant de l'électricité à partir de la lumière du soleil, les propriétaires peuvent réduire leurs factures d'électricité, voire les éliminer complètement dans certains cas.

Rentabilité financière : Bien que l'investissement initial puisse être significatif, l'installation de panneaux solaires peut générer des économies à long terme et même produire un retour sur investissement positif grâce aux économies réalisées sur les factures d'électricité.

2.3.7 Les défis et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Cependant, l'énergie photovoltaïque n'est pas sans ses défis et inconvénients [34] :

Investissement initial élevé : Bien que rentable à long terme, l'installation de panneaux solaires nécessite un investissement financier initial important, ce qui peut dissuader certains propriétaires.

Dépendance aux conditions météorologiques : L'efficacité de la production d'électricité solaire dépend directement de la quantité de lumière solaire disponible, ce qui peut entraîner des fluctuations dans la production d'énergie.

2.4 Problématique de l'humidité et de l'eau salée pour les panneaux photovoltaïques

L'installation de panneaux solaires sur des bateaux présente des défis spécifiques, notamment en raison de l'exposition à l'eau salée et à l'humidité. Ces facteurs peuvent affecter les performances et la durabilité des panneaux solaires de plusieurs manières. Voici une analyse détaillée des problèmes rencontrés et des solutions possibles [35] :

- **Défis**

1. Corrosion

Problème : L'eau salée peut causer la corrosion des composants métalliques des panneaux solaires et de leurs systèmes de montage.

Solution : Utiliser des matériaux résistants à la corrosion, comme l'aluminium anodisé pour les cadres et l'acier inoxydable pour les fixations. Des traitements de surface spécifiques peuvent également être appliqués pour augmenter la résistance à la corrosion.

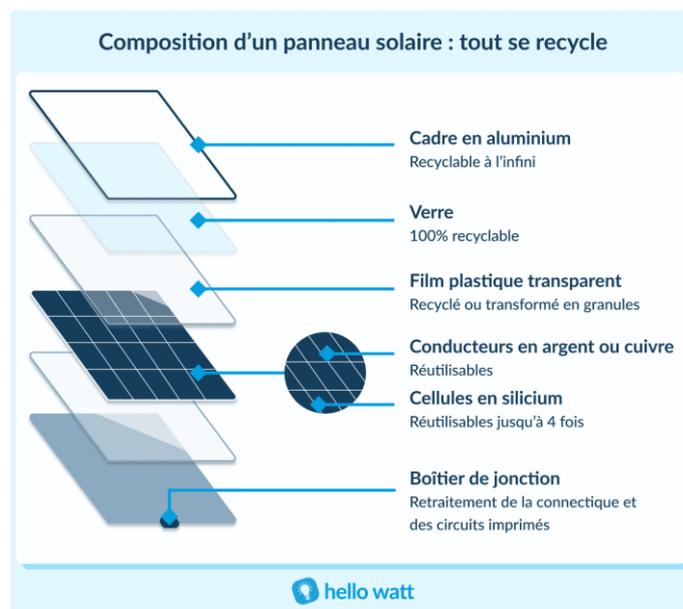


Figure 2-5 Composition d'un module photovoltaïque [36].

2. Revêtements protecteurs

Problème : Les conditions marines peuvent endommager les surfaces des panneaux via l'abrasion par le sable et l'érosion par le sel.

Solution : Appliquer des revêtements protecteurs anti-abrasion et anti-UV pour protéger les surfaces des panneaux.

3. Humidité

Problème : L'humidité peut s'infiltrer dans les panneaux, réduisant leur efficacité et endommageant les composants internes.

Solution : Assurer une bonne étanchéité des panneaux et utiliser des matériaux qui repoussent l'eau pour minimiser l'accumulation d'humidité. L'emploi de boîtes de jonction et de connecteurs étanches est également crucial.

4. Maintenance

Problème : L'accumulation de sel et d'autres résidus sur les panneaux peut réduire leur efficacité.

Solution : Mettre en place un programme de maintenance régulière pour nettoyer les panneaux et inspecter les composants à la recherche de signes de dégâts ou de corrosion.

- **Conception et Installation**

1. Systèmes de montage

Problème : Les mouvements et vibrations du bateau nécessitent des systèmes de montage flexibles mais robustes.

Solution : Concevoir des systèmes de montage qui peuvent accommoder les mouvements sans compromettre la stabilité des panneaux. L'utilisation de supports amortisseurs peut réduire l'impact des vibrations.



Figure 2-6 Support amortisseur [37].

2. Optimisation de l'espace

Problème : L'espace disponible pour l'installation des panneaux solaires sur un bateau est souvent limité.

Solution : Utiliser des panneaux solaires flexibles qui peuvent s'adapter aux contours du bateau et optimiser l'espace disponible. L'intégration des panneaux dans la conception du bateau peut également être envisagée pour minimiser l'impact sur l'aérodynamisme.



Figure 2-7 Panneaux photovoltaïques flexibles [38].

2.5 Conclusion

L'énergie solaire possède un potentiel significatif pour contribuer de manière importante à la transition vers un futur énergétique durable. Investir dans la recherche et le développement de cette forme d'énergie est crucial afin de maximiser son potentiel et de favoriser un futur plus propre et durable.

*Chapitre 3 : Simulation du système
hybride*

3 Simulation du système hybride

Nous nous sommes rendus au port de Ghazaouet et avons rencontré le directeur du port. Nous avons convenu de réaliser le dimensionnement d'un navire et d'alimenter ses équipements électriques à l'aide de panneaux photovoltaïques.

3.1 Description du navire concerné

A. Caractéristiques générales

- **Image réelle du navire**



Figure 3-1 Image réelle du navire concerné au port de Ghazaouet.

- **Dimensions et capacité**
 - **Longueur** : 24 mètres
 - **Largeur** : 4 mètres
 - **Tirant d'eau** : 0.730 mètres

- **Déplacement** : 70 tonnes
- **Usage du navire**
 - Type de navire : Navire de pêche (Chalutier)
 - Capacité de passagers : 8 passagers
 - Capacité de cargaison : 15 tonnes

B. Charges des appareils électriques

- **Liste des équipements électriques alimentés par les panneaux PV**
 - **Éclairage** : 630 Wh par jour
 - **Équipements de loisirs (TV)** : 480 Wh par jour
 - **Équipements de cuisine (réfrigérateur)** : 350 Wh par jour
 - **Treuil** : 11000 Wh par jour
- **Consommation électrique totale**
 - Total : 12.5 kWh par jour

C. Puissance du moteur diesel

- **Caractéristiques du moteur diesel**
 - **Type et modèle** : Caterpillar C18
 - **Puissance nominale** : 600 kW
 - **Consommation de carburant** : 1500 litres par jour
 - **Émissions** : 9.3 g/kWh de NOx

3.2 Simulation avec HOMER Pro

3.2.1 Introduction

Les systèmes hybrides tirent parti de différentes sources d'énergie, telles que l'éolien et les générateurs diesel, ce qui en fait une solution viable pour les régions éloignées des grands réseaux électriques interconnectés. Cependant, concevoir et mettre en place le dimensionnement et l'architecture d'un système de génération d'énergie est une étape cruciale. De nombreuses études prennent en compte la variabilité inhérente à la plupart des énergies renouvelables pour élaborer des systèmes de contrôle complexes, notamment pour la gestion

de la tension et de la fréquence dans le cas d'un système éolien-diesel. La modélisation joue également un rôle essentiel pour simuler le bon fonctionnement de ces systèmes, et plusieurs logiciels, tels que HOMER, permettent de le faire efficacement.

Dans ce projet, nous allons dimensionner un bateau propulsé par un système hybride en tenant compte les dimensions et la consommation de ce bateau avec l'utilisation des différents systèmes hybrides en situation hors réseau comprenant le panneau solaire (PV), le générateur diesel (GD) ainsi que les batteries et le convertisseur.

3.2.2 Présentation du logiciel HOMER Pro

HOMER est un logiciel conçu spécifiquement pour les systèmes de production d'énergie de faible puissance. Il offre la possibilité de réaliser des simulations de systèmes intégrant à la fois des sources d'énergie renouvelables et des sources fossiles. Son principal avantage réside dans sa capacité à modéliser des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie, qu'elles soient renouvelables ou fossiles. Initialement développé en 1992 pour le compte du NREL (National Renewable Energy Laboratory) des États-Unis par le Dr. Peter Lilienthal, le logiciel HOMER Pro a depuis subi de nombreuses améliorations à travers plus de 40 versions successives [39].

Les paramètres pour le choix de logiciel HOMER Pro.

Tableau 1 Paramètres pour le choix de logiciel HOMER Pro.

Paramètre	Oui / non / en Partie	Explication
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Oui	Gratuit, téléchargement disponible en ligne, aide et tutoriel, fichiers d'exemple disponibles en ligne.
Plusieurs technologies disponibles	Oui	Éolien, diesel et photovoltaïque
Systèmes hors réseau	Oui	----

Simulation de systèmes dans plusieurs pays	Oui	Partout à travers le monde selon des lieux prédéterminés
Évaluation des coûts	Oui	----
Optimisation des systèmes	Oui	----

3.2.3 Définition du logiciel HOMER Pro

HOMER est un modèle d'optimisation des systèmes hybrides qui fonctionnent avec les énergies renouvelables. Son nom, qui signifie Hybrid Optimisation Model For Electric Renewables en anglais, reflète sa fonction principale. Cet outil logiciel est particulièrement puissant pour la conception et l'analyse de systèmes de production d'électricité hybrides. Ces systèmes peuvent être composés de divers éléments tels que des groupes électrogènes, des systèmes de cogénération, des éoliennes, des systèmes photovoltaïques, des systèmes hydrauliques, des batteries, des piles à combustible, de la biomasse, et bien d'autres encore.

Que l'installation soit connectée au réseau électrique ou isolée, HOMER offre la possibilité de déterminer de manière précise comment les sources d'énergie intermittentes telles que l'éolien et le solaire peuvent être intégrées de manière optimale au sein des systèmes hybrides. Ce logiciel est donc un outil essentiel pour les professionnels travaillant dans le domaine de l'énergie renouvelable et de la conception de systèmes énergétiques durables [40].

3.2.4 Fonctionnement du logiciel HOMER PRO

Ce logiciel offre la possibilité de réaliser des simulations, d'optimiser les systèmes, et enfin d'effectuer des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution fournie par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides composés de deux sources d'énergie ou plus. La Figure "3-2" illustre le modèle conceptuel du logiciel HOMER PRO.

HOMER Pro permet de simuler, d'optimiser et de réaliser des analyses de sensibilité pour les Systèmes Énergétiques Renouvelables (SERS). Il est utile aussi bien pour les centrales électriques villageoises, les camps, les chalets, les bases militaires que pour les habitations individuelles, qu'elles soient reliées ou non au réseau électrique [41].

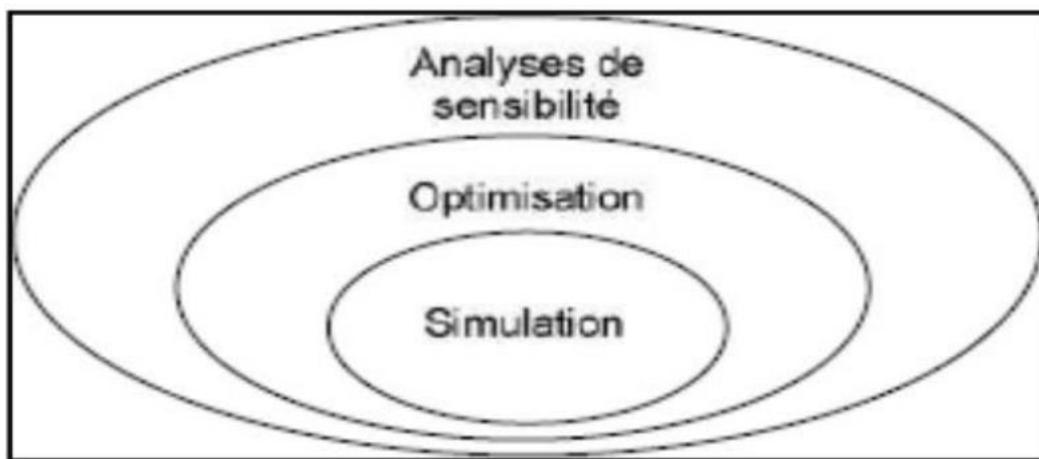


Figure 3-2 Modèle conceptuel du logiciel HOMER [42].

Dans une première étape, HOMER Pro peut simuler le fonctionnement d'un ou plusieurs systèmes simultanément. Pour chaque configuration, il établit un bilan énergétique sur une période d'un an, avec un pas de temps pouvant varier d'une minute à une heure. Ainsi, à chaque intervalle de temps, HOMER Pro compare la demande d'électricité et de chaleur avec l'énergie que le système peut fournir, évaluant ainsi la faisabilité technique du système. En se basant sur les données techniques et de coût de chaque composant du système, HOMER Pro calcule le rendement énergétique, le coût du système et le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre pour chaque configuration.

Dans un deuxième temps, HOMER optimise les systèmes déjà simulés. En fonction des critères définis, il trie et filtre les systèmes déjà simulés afin de présenter les meilleures configurations possibles. Par défaut, il classe les systèmes en fonction du coût actuel net du système (CPN).

Enfin, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour un même système afin d'obtenir une solution optimisée en termes de coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et propose la meilleure solution, la moins coûteuse, parmi celles-ci.

Ensuite, il est possible de réaliser des analyses de sensibilité pour évaluer la robustesse de la solution trouvée face à des variations dans les paramètres entrés, tels que les coûts des technologies ou les données de gisement. Ces analyses permettent d'explorer de nombreuses configurations en quelques minutes de simulation seulement.

HOMER Pro permet de simuler divers systèmes de production d'énergie, tels que les panneaux solaires photovoltaïques, les éoliennes, les barrages hydroélectriques au fil de l'eau, la biomasse, les générateurs (diesel, essence, biogaz, combustibles alternatifs), les réseaux électriques, les micro-turbines et les piles à combustible. De plus, il offre une gamme étendue

de dispositifs de stockage ou de récupération d'énergie, notamment les banques de batteries, les volants d'inertie, les batteries à flux et l'hydrogène. Les besoins énergétiques peuvent également être variés, incluant des profils de consommation journaliers avec des variations saisonnières, des charges différées pour le pompage d'eau ou la réfrigération, des charges thermiques et des mesures d'efficacité énergétique. Ainsi, HOMER peut simuler un large éventail de systèmes différents ainsi que toutes les combinaisons possibles de systèmes hybrides.

3.2.4.1 Méthode générale d'utilisation HOMER PRO

HOMER Pro est réputé pour sa facilité d'utilisation, avec une interface utilisateur similaire à celle des logiciels habituels. L'interface d'HOMER peut être divisée en trois parties principales : la première concerne la définition du système, la deuxième concerne les ressources, et la troisième concerne les résultats. De plus, le logiciel fournit des indications sur les étapes à suivre et offre des conseils pertinents lors de la définition du système.



Figure 3-3 Interface de logiciel HOMER Pro.

Les premières étapes dans l'utilisation de ce logiciel incluent la définition du site, où l'on peut choisir le nom du projet et la localisation du site dans la fenêtre de conception (DESIGN) comme illustré dans la Figure "3-3".

La partie de définition du système permet de sélectionner les équipements à inclure dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments souhaités parmi plusieurs choix, comme illustré dans la Figure "3-4". De plus, à cette étape, il est possible de choisir de modéliser le réseau électrique, de le comparer à un système hors réseau, ou simplement de ne pas modéliser le réseau.

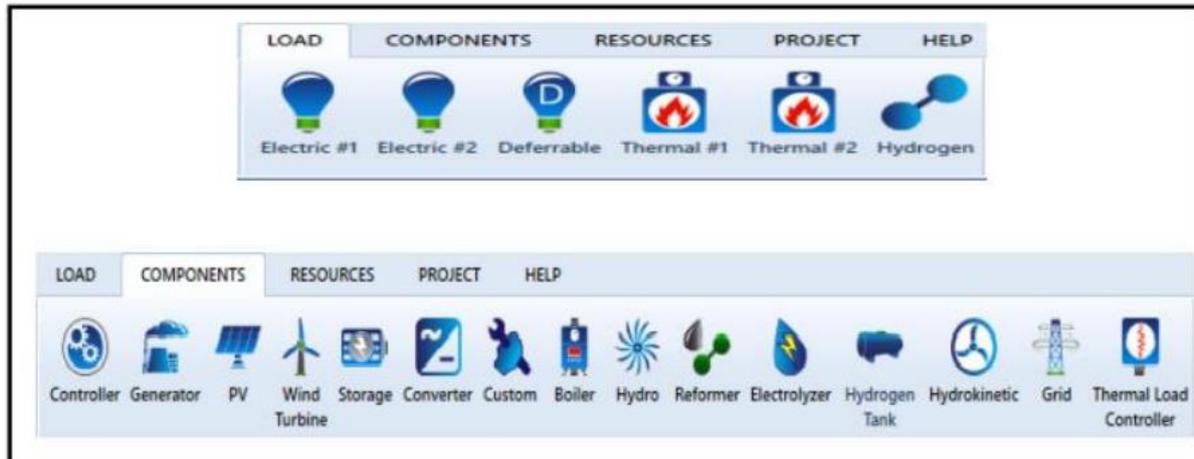


Figure 3-4 Les équipements.

Une fois sélectionnés, les différents équipements apparaissent dans la première partie de la définition du système (schéma de système), comme illustré dans la Figure "3-5". Les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés sont quant à elles affichées dans la deuxième partie de la définition des ressources, comme présenté dans la Figure "3-6".



Figure 3-5 Schéma de système.

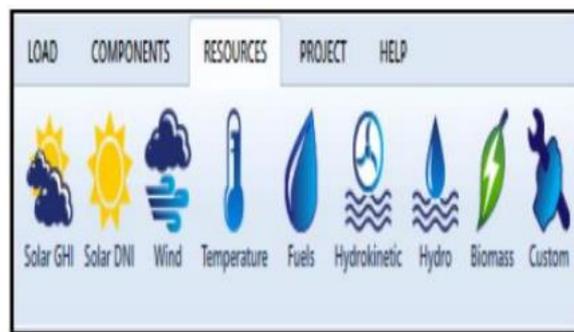


Figure 3-6 Ressources.

Dans ces deux parties, chaque icône correspond à une fenêtre à remplir, contenant les données nécessaires pour effectuer une simulation. Ces données concernent la consommation énergétique, les équipements (tels que les panneaux solaires photovoltaïques, les éoliennes, les générateurs, les onduleurs, les batteries, ou autres équipements), ainsi que les ressources nécessaires telles que les données de gisement solaire ou éolien, et les données relatives au combustible utilisé par les générateurs.

Une fois ces données sont choisis, HOMER peut être lancé en cliquant sur l'icône de calcul. Une fois le calcul terminé, de nombreux résultats sont obtenus. Étant donné qu'il est possible d'entrer de nombreuses configurations différentes pour un même type de système, il est possible de visualiser la liste des résultats de deux manières : par "catégorie" et "globalement". Dans l'option "catégorie", la liste présente l'option la plus économique pour chaque catégorie de système, c'est-à-dire par type de système. Par exemple, HOMER affichera uniquement la meilleure option pour un système de type photovoltaïque avec batteries, même si plusieurs configurations différentes ont été simulées (avec différents nombres de panneaux solaires, de batteries, etc.). Dans l'option "globalement", HOMER affiche tous les systèmes sur la même liste, le premier résultat étant le plus économique parmi tous les types de systèmes simulés. Il est donc essentiel d'optimiser chaque type de système pour éliminer les options non viables, en effectuant plusieurs simulations pour converger vers un système optimal pour chaque type.

Il est important de noter que le premier résultat donné par HOMER dans la liste des résultats est toujours le système le plus économique trouvé selon le "Net Present Cost" (coût à valeur actuelle) parmi tous les systèmes et toutes les configurations simulées. Les résumés des systèmes et des coûts sont affichés dans la zone des résultats. De plus, HOMER permet d'accéder à des détails tels que le résumé des coûts, le flux monétaire, des informations sur l'électricité (production, consommation, excès d'énergie, etc.), des détails sur l'énergie et la puissance offertes par les équipements (panneaux solaires, batteries, convertisseurs), le détail

des émissions, et enfin, les données simulées heure par heure peuvent également être visualisées [41].

3.2.4.2 Méthodologies spécifiques aux simulations

Une démarche complète est définie pour le dimensionnement des systèmes, en parallèle avec les simulations sur HOMER. Voici les étapes principales de cette démarche :

1. Évaluation de la demande énergétique, c'est-à-dire la consommation d'énergie requise.
2. Prédimensionnement manuel des équipements nécessaires en fonction de cette évaluation.
3. Identification des équipements requis pour le système (panneaux solaires, convertisseurs, batteries, etc.) dans le logiciel HOMER.
4. Saisie des données requises dans le logiciel HOMER, notamment :
 - a. Données de consommation énergétique.
 - b. Données sur le gisement solaire pour l'emplacement spécifique souhaité.
 - c. Entrer les données relatives aux équipements, telles que les prix des équipements et les coûts d'opération et d'entretien.
5. Lancer le calcul dans HOMER pour obtenir les résultats basés sur les données fournies.
6. Optimiser les résultats obtenus par le logiciel HOMER de manière itérative afin d'arriver à la solution optimale pour le système étudié.
7. Effectuer des analyses de sensibilité si nécessaire, pour évaluer la robustesse de la solution trouvée face à des variations dans les paramètres d'entrée.
8. Valider le système, en vérifiant que les résultats obtenus correspondent aux besoins et aux contraintes du projet.

3.2.4.3 Les sorties

Grâce aux simulations, HOMER offre la possibilité d'examiner le fonctionnement de chaque équipement de l'installation, heure par heure, pour toutes les configurations envisagées. Ces données alimentent une analyse financière du projet sur sa durée. Ainsi, pour chaque architecture et configuration, les résultats comprennent :

- Le coût global actualisé par kilowatt-heure (kWh).

- La répartition des dépenses, englobant l'investissement initial, les coûts de maintenance et d'entretien, ainsi que les coûts de combustible.
- Les détails spécifiques à chaque source d'énergie, tels que les flux d'énergies, le nombre de remplacements requis, les coûts fixes et marginaux, et la proportion de la production électrique provenant de chaque source.
- Des graphiques journaliers couvrant toute la durée de vie du système, illustrant heure par heure les consommations énergétiques, les puissances générées par chaque source, et la quantité d'énergie stockée.
- Des graphiques d'analyse de sensibilité permettant d'examiner les variations de certaines sorties en fonction des paramètres de sensibilité sélectionnés.
- Une analyse économique comparative par rapport à une installation de référence.
- Une présentation graphique de l'analyse de sensibilité [43].

3.2.4.4 Fonctionnement

Pour chaque configuration, ce qui signifie chaque ensemble de valeurs parmi toutes celles disponibles pour chaque paramètre, HOMER effectue une analyse temporelle de l'installation. À chaque intervalle de temps, le logiciel surveille la consommation énergétique et la compare à la production calculée en fonction du gisement pris en compte.

En cas de déficit d'énergie, HOMER doit décider entre utiliser les générateurs diesel ou différer une partie de la charge. Il convient de noter que ces décisions sont idéalisées par rapport aux systèmes de contrôle-commande réels. La simulation vise à optimiser le coût total de fonctionnement de la centrale hybride, ce qui peut différer des décisions prises dans des situations réelles. Les différences entre les deux seront expliquées dans la section "Résultats".

Pour comparer les coûts par kilowatt-heure (kWh) produits par les différentes sources, le logiciel utilise des règles et des modèles qui peuvent être influencés par les paramètres sélectionnés par l'utilisateur. Ainsi, HOMER considère que les sources auxiliaires ont un coût fixe et un coût marginal [44].

3.2.5 Simulation de notre travail

Dans l'interface du logiciel, comme illustré dans la figure "3-7", nous avons la capacité de positionner le site de travail sur une carte géographique pour vérifier les coordonnées relatives au site dans la région de TLEMEN. En outre, nous pouvons choisir les composants de

l'installation ainsi que leurs spécifications techniques. Le système est configuré en renseignant le nom du projet, l'auteur et la localisation du système, incluant les données géographiques suivantes :

- Latitude 34 degrés 53.0 minute Nord.
- Longitude 1 degrés 19.0 minutes West.

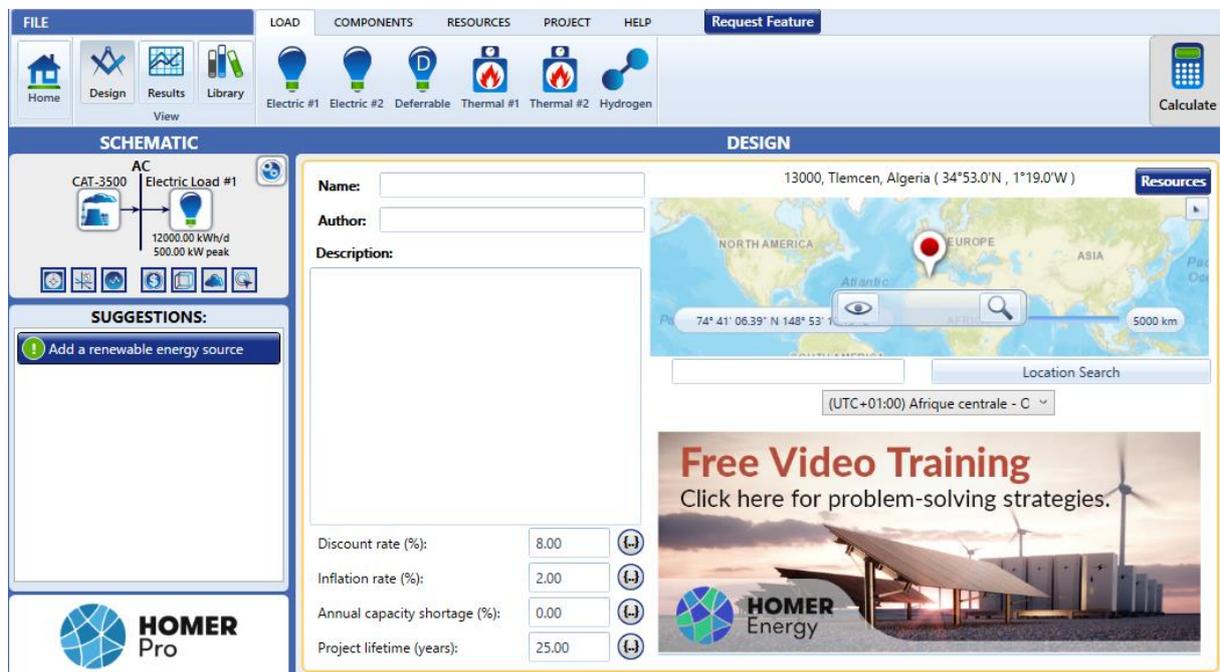


Figure 3-7 Donnée géographique de TLEMCCEN.

3.2.5.1 Configuration du système

HOMER Pro utilise des simulations horaires pour perfectionner la conception des systèmes d'alimentation, incluant diverses sources telles que l'éolien, le photovoltaïque, les groupes diesel et les batteries d'accumulateurs. La configuration du système photovoltaïque couplé au réseau est influencée par la disponibilité de la ressource énergétique solaire.

3.2.5.2 Schéma de conception du système

Les figures "3-8" et "3-9" représentent le système global examiné à l'aide du logiciel HOMER, incluant les panneaux solaires, le groupe diesel, les convertisseurs et les batteries.

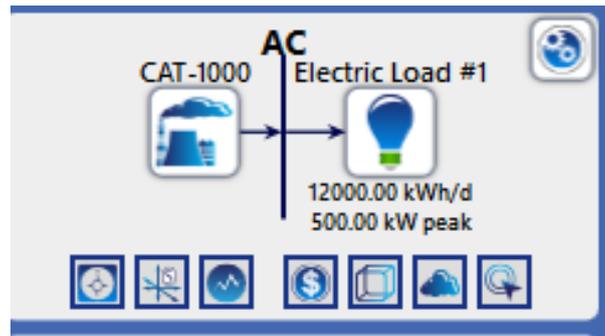


Figure 3-8 Propulsion par moteur diesel.

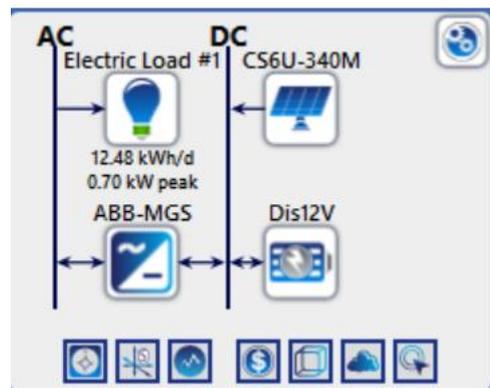


Figure 3-9 Alimentations des équipements d'un navire par énergie renouvelable.

3.2.5.3 Configuration des composants de système

3.2.5.3.1 Choix du générateur

Le générateur pris en compte dans cette étude est un générateur diesel qui se dimensionne automatiquement pour répondre à toute la charge requise, sans disposer d'une capacité de stockage excédentaire. De plus, il ajuste sa courbe de carburant en fonction de sa taille. La figure "3-10" présente les spécifications techniques de ce générateur considéré dans notre étude.

GENERATOR Name: CAT-1000kVA-50Hz-PF Abbreviation: CAT-11 Remove
Copy To Library

<p>Properties</p> <p>Name: CAT-1000kVA-50Hz-PP</p> <p>Capacity: 800 kW</p> <p>Fuel: Diesel</p> <p>Fuel curve intercept: 16.1 L/hr</p> <p>Fuel curve slope: 0.236 L/hr/kW</p> <p>Emissions</p> <p>CO (g/L fuel): 1.79</p> <p>Unburned HC (g/L fuel): 0.06</p> <p>Particulates (g/L fuel): 0.12</p> <p>Fuel Sulfur to PM (%): 0</p>	<p>Generator Cost</p> <p>Initial Capital (DA): 5,000,000.00</p> <p>Replacement (DA): 5,000,000.00</p> <p>O&M (DA/op. hor): 0.000</p> <p>Fuel Price (DA/L): 1.00</p>	<p>Optimization</p> <p><input checked="" type="radio"/> Simulate systems with and without this generator</p> <p><input type="radio"/> Include in all systems</p>
---	--	---

Electrical Bus
 AC DC

Site Specific

Minimum Load Ratio (%): 25.00 CHP Heat Recovery Ratio: 0.00 Lifetime (Hours): 90,000.00

Minimum Runtime (Minu): 0.00 Initial Hours: 0.00

Figure 3-10 Cout du générateur diesel.

La carte de données de la puissance du générateur diesel produite est fournie par HOMER et indique que la courbe de consommation de carburant du générateur diesel évolue linéairement avec la puissance nominale, comme illustré dans la figure "3-11".

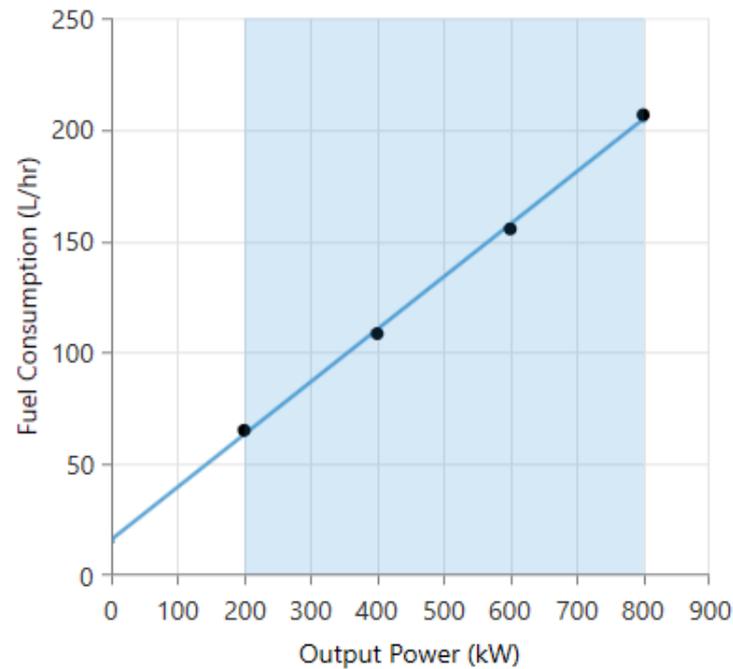


Figure 3-11 Courbe de la consommation du carburant par générateur diesel.

La figure "3-12" représente la production quotidienne de diesel sur l'ensemble de l'année représenté par la couleur verte.

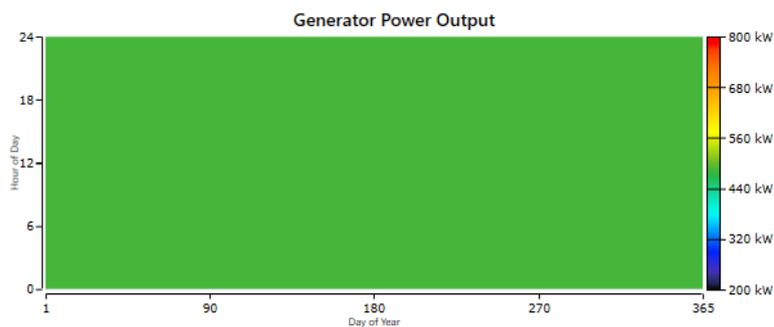


Figure 3-12 Puissance journalière produite par générateur diesel.

- **Caractéristiques du générateur diesel**

Tableau 2 Caractéristiques du générateur diesel.

CAT-1000kVA-50Hz-PP	
Capacité	800 kW
Carburant	Diesel
Interception de la courbe de carburant	16.1 L/h
Pente de la courbe de carburant	0.236 L/h/ kw
Émissions	CO (g / L de carburant) : 1.79
	HC non brûlé (g / L) : 0.06
	Particules (g / L de carburant) : 0.12
	Carburant soufre à PM (%) : 0
	NOx (g / L de carburant) : 16.86
Propriétés du carburant	Valeur calorifique inférieure : (MJ / kg) : 43.2
	Densité (Kg / m3) : 820
	Teneur en carbone (%) : 88
	Teneur en soufre (%) : 0.4

3.2.5.3.2 Choix des PV

Les panneaux photovoltaïques sont des composants électroniques qui convertissent les rayons lumineux du soleil en électricité à l'aide de cellules. Le coût des panneaux photovoltaïques varie de manière linéaire avec leur taille. Dans notre étude, le coût des panneaux photovoltaïques est évalué à 30000DA, le coût de remplacement est estimé à 30000DA. La figure "3-13" représente les spécifications techniques du générateur photovoltaïque que nous considérons dans notre étude.



Figure 3-13 Les données du coût du PV.

La figure "3-14" présente la production quotidienne du générateur photovoltaïque sur toute l'année. Selon l'échelle à droite, la couleur noire indique les périodes d'arrêt, la couleur bleue représente les périodes de très faible production, et le jaune marque les périodes de forte production. De plus, la couleur jaune met en évidence les deux pics de production qui surviennent aux mêmes heures en janvier et novembre, de 11h à 15h. La production moyenne est symbolisée par la couleur rose.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	4.50	kW
Mean Output	0.874	kW
Mean Output	21.0	kWh/d
Capacity Factor	19.4	%
Total Production	7,654	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	4.67	kW
PV Penetration	168	%
Hours of Operation	4,387	hrs/yr
Levelized Cost	1.36	DA/kWh

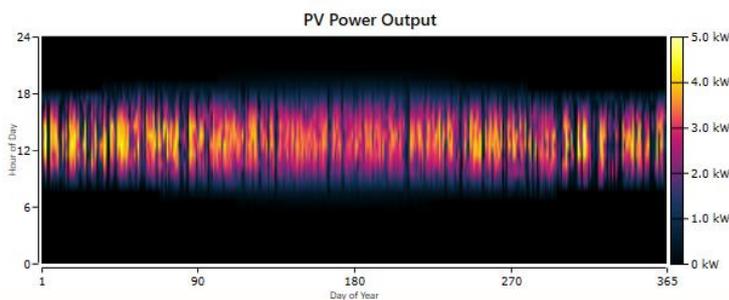


Figure 3-14 Production journalière moyenne du PV.

3.2.5.3.3 Irradiation solaire

La phase cruciale de la conception d'un système photovoltaïque réside dans la détermination de sa taille optimale, qui dépend principalement des données climatiques du site. Le graphique présenté dans la figure "3-15" ainsi que le Tableau 3 fournissent les données du profil de variation de l'irradiation solaire moyenne et journalière, disponibles en téléchargement sur HOMER.

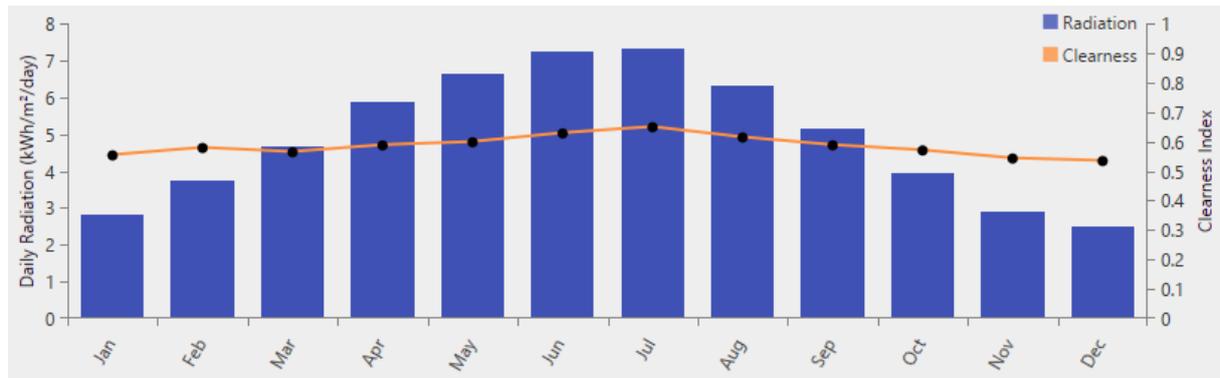


Figure 3-15 Variation de l'irradiation et clarté solaire mensuelle et journalière du site de Ghazaouet.

Tableau 3 Radiation solaire moyenne.

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /day)
Jan	0.552	2.820
Feb	0.577	3.730
Mar	0.563	4.670
Apr	0.586	5.870
May	0.597	6.640
Jun	0.627	7.230
Jul	0.648	7.300
Aug	0.613	6.320
Sep	0.587	5.130
Oct	0.569	3.920
Nov	0.542	2.900
Dec	0.533	2.500

Cependant, ces données confirment une correspondance remarquable avec les variations saisonnières de la région, comme suit :

- En été, une irradiation solaire maximale est observée.
- En hiver, une irradiation solaire minimale est enregistrée. Plus précisément :
- Le mois de juillet présente le plus haut niveau d'ensoleillement, avec une irradiation journalière moyenne de 7.3 kWh/m².

- Le mois de décembre connaît le niveau d'ensoleillement le plus bas, avec 2.5 kWh/m^2 par jour. Nous pouvons également segmenter les niveaux d'irradiation en trois périodes distinctes :

Période 1 (faible ensoleillement) : comprenant les mois de novembre, décembre, janvier et février, avec des niveaux d'irradiation moyens inférieurs à 5 kWh/m^2 par jour.

Période 2 (ensoleillement moyen) : englobant les mois de avril, mai et septembre, avec des niveaux d'irradiation moyens compris entre 5 et 6.8 kWh/m^2 par jour.

Période 3 (ensoleillement élevé) : couvrant les mois de mai, juin, juillet et août, avec des niveaux d'irradiation moyens de 6 kWh/m^2 par jour ou plus. Cette classification des périodes nous permettra de calculer différentes capacités de panneaux photovoltaïques à simuler sur Homer Pro, optimisant ainsi notre système de manière plus efficace.

III.2.4.2.2/ Température

Le fonctionnement des cellules est sensiblement influencé par la température, d'où la nécessité de surveiller sa variation afin de maîtriser son impact sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Le graphique présenté dans la figure "3-16" ainsi que le Tableau 4 indiquent clairement que la température maximale pendant les mois d'été ne dépassera jamais le seuil critique influençant le rendement des cellules.



Figure 3-16 L'évolution des températures mensuelles moyennes de Ghazaouet.

Tableau 4 Les températures mensuelles.

Month	Daily Temperature (°C)	
Jan	7.490	
Feb	8.710	
Mar	11.330	
Apr	13.620	
May	17.450	
Jun	22.320	
Jul	26.270	
Aug	26.390	
Sep	21.850	
Oct	17.220	
Nov	11.770	
Dec	8.630	

3.2.5.3.4 Choix des batteries

Les batteries jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des paramètres de fonctionnement, visant à réduire la dépendance à l'égard de l'énergie produite par les générateurs classiques. L'excès de production provenant des sources d'énergie renouvelable est stocké dans les batteries, permettant ainsi de réduire la consommation de combustible et les émissions de gaz.

STORAGE  Name: Discover 12VRE-3000T Abbreviation: Dis12V

Properties

Kinetic Battery Model

- Nominal Voltage (V): 12
- Nominal Capacity (kWh): 3.11
- Maximum Capacity (Ah): 260
- Capacity Ratio: 0.563
- Rate Constant (1/hr): 0.176
- Roundtrip efficiency (%): 80
- Maximum Charge Current (A): 43

Cost

Quantity	Capital (DA)	Replacement (DA)	O&M (DA/year)
1	50,000.00	50,000.00	10.00

Lifetime

- time (years): 20.00 
- throughput (kWh): 3,581.60 

[More...](#)

Figure 3-17 Les données de la batterie.

- **Caractéristiques de la batterie Discover 12VRE-3000T**

Tableau 5 Caractéristiques de la batterie Discover 12VRE-3000T.

Discover 12VRE-3000T	
Tension nominale	12V
Efficacité	80%
Capacité nominale	3.11kWh
Capacité maximale	260Ah
Garantie	20ans

3.2.5.3.5 Choix des convertisseurs

Le fonctionnement du convertisseur est intimement lié à la demande en énergie stockée. L'étude de son fonctionnement nous permet d'anticiper les périodes de décharge des batteries. De même, le fonctionnement du redresseur est associé à l'état de charge des batteries. L'analyse de son fonctionnement revêt une grande importance car elle nous permet de prévoir les périodes de recharge des batteries et donc les générateurs utilisés pour cette opération (panneaux photovoltaïques, groupes diesel).

The screenshot displays the configuration for an ABB MGS100 converter in the HOMER software. The interface is divided into several sections:

- CONVERTER:** Shows the selected model 'ABB MGS100' with a 'Complete Catalog' button and a 'Remove' button.
- Properties:** Lists the name 'ABB MGS100', abbreviation 'ABB-MGS', and a link to the 'Data Sheet for ABB MGS100'. It includes notes about the converter's features and applications.
- Costs:** A table with columns for Capacity (kW), Capital (DA), Replacement (DA), and O&M (\$/year). Item 1 has a Capital of DA90,000.00, Replacement of DA90,000.00, and O&M of DA0.0.
- Capacity Optimization:** Shows 'HOMER Optimizer™' selected, with a 'Search Space' section for 'Size (kW)' ranging from 0 to 60.
- Input Parameters:** Includes 'Inverter Input' (Lifetime: 15.00 years, Efficiency: 95.00%) and 'Rectifier Input' (Relative Capacity: 60.00%, Efficiency: 95.00%).

Figure 3-18 Les données du coût du convertisseur.

3.2.5.3.6 La charge

La figure "3-19" illustre la consommation annuelle et quotidienne d'énergie, totalisant 12.480 kWh. Ces données révèlent la quantité d'électricité utilisée sur une base annuelle et quotidienne. L'analyse de ces chiffres permet d'identifier les tendances de consommation, les périodes de

pointe et les variations saisonnières potentielles. Ces informations sont cruciales pour la gestion de l'énergie, la planification des ressources et la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique. Elles peuvent également aider à évaluer les besoins en énergie renouvelable et à concevoir des solutions adaptées pour répondre de manière durable à la demande énergétique.

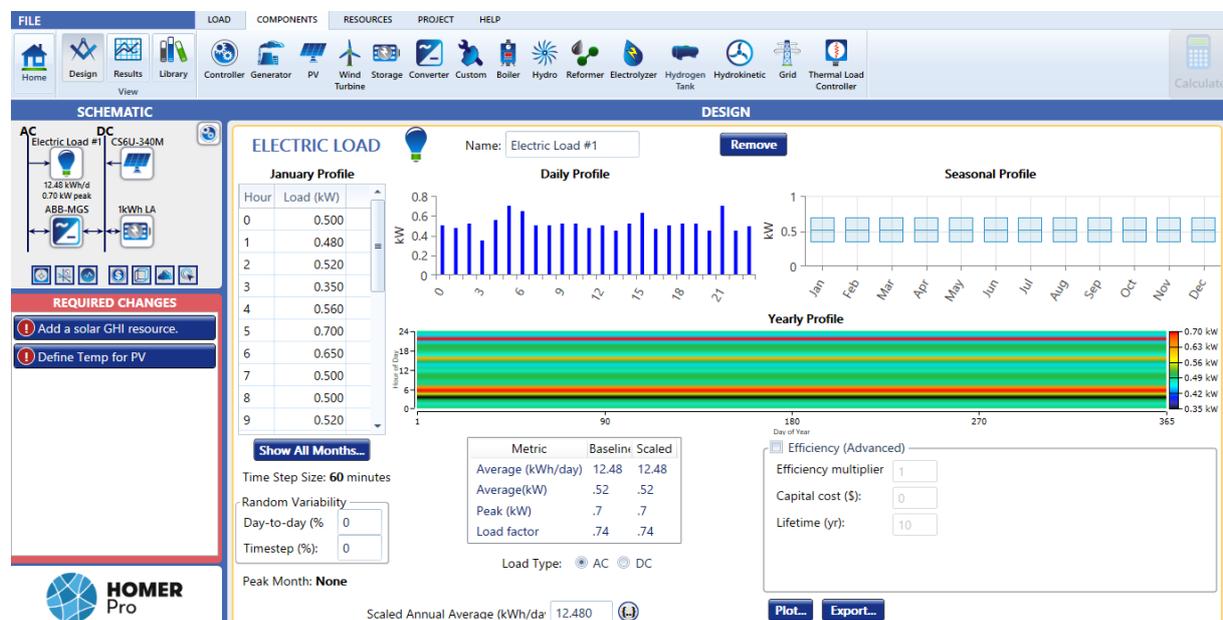


Figure 3-19 Le profil de charge.

3.3 Simulation avec PVsyst

3.3.1 Présentation du Logiciel PVsyst

PVSYST est un logiciel polyvalent destiné à un large éventail d'utilisateurs, notamment les architectes, les ingénieurs, les chercheurs et même les éducateurs, grâce à son utilité comme outil pédagogique. Il propose une assistance contextuelle approfondie qui guide les utilisateurs à travers les procédures et les modèles employés, en plus d'offrir des conseils économiques pour le développement de projets. L'outil permet également d'importer des données météorologiques à partir de diverses sources et de les combiner avec des données personnelles pour une analyse complète et précise [45].

3.3.2 Objectifs du logiciel PVsyst

PVSYST propose une gamme diversifiée de fonctionnalités adaptées aux besoins spécifiques des différentes parties prenantes :

1. **Pour les ingénieurs spécialisés dans les systèmes photovoltaïques :** Le logiciel permet une étude exhaustive et une optimisation complète des systèmes PV, générant

des rapports détaillés qui servent tant pour les appels d'offres que pour l'étude détaillée de la réalisation des systèmes.

2. **Pour les financeurs, notamment les banques** : PVsyst offre une analyse approfondie des propositions émanant des ingénieurs ou fournisseurs, ainsi qu'une évaluation de la maintenance basée sur le comportement réel des installations.
3. **Pour les chercheurs et enseignants** : Le logiciel propose des outils pédagogiques interactifs pour une meilleure compréhension des comportements spécifiques des systèmes PV. Il offre également des fonctionnalités pour l'étude de systèmes particuliers ou innovants, ainsi que la réalisation d'études paramétriques approfondies.
4. **Pour les fabricants de matériel** : PVsyst offre des services de conseil aux clients et permet la présentation de leurs produits dans la base de données du logiciel. De plus, il permet une analyse approfondie des performances réelles des matériels et des innovations.
5. **Dans les pays en voie de développement** : Le logiciel est utilisé pour la formation aux techniques PV, l'optimisation et la faisabilité des systèmes autonomes, ainsi que pour l'évaluation des systèmes de pompage [46].
6. Le logiciel PVsyst offre une palette étendue de fonctionnalités :
 - Il permet le prédimensionnement des installations photovoltaïques.
 - Il offre une estimation rapide de la production pour une première évaluation des projets.
 - PVsyst facilite la conception détaillée des projets, incluant le dimensionnement et la simulation horaire, avec des résultats présentés dans des rapports complets imprimables.
 - Il permet l'importation de données météorologiques à partir de diverses sources, ainsi que la génération synthétique de données météo.
 - Le logiciel comprend une base de données de composants variés tels que les modules PV, les onduleurs, les batteries, et les pompes.
 - Il propose des outils didactiques pour la visualisation de la géométrie solaire, l'optimisation de l'orientation des panneaux solaires, ainsi que la simulation du comportement électrique des champs PV en présence d'ombrage.

- PVsyst offre également une fonctionnalité d'analyse avancée des données réelles mesurées, permettant aux utilisateurs d'obtenir des insights précieux sur les performances des installations photovoltaïques [47].

3.3.3 Options du logiciel PVsyst

Le logiciel PVSYST se distingue par quatre options principales : prédimensionnement, conception de projet, gestion de bases de données et utilisation d'outils [48].

3.3.4 Prédimensionnement

Cette étape initiale du projet dans PVSYST permet une évaluation rapide des performances du système, en se basant sur des valeurs mensuelles et des paramètres généraux, sans spécifier les composants réels du système. Une estimation approximative des coûts est également disponible. Pour les systèmes connectés au réseau, cette étape est axée sur l'architecture et nécessite des informations telles que la surface disponible et les spécifications de la technologie photovoltaïque. Pour les systèmes autonomes, l'outil permet de dimensionner la capacité de puissance des panneaux solaires et des batteries en fonction du profil de charge et des exigences de fiabilité. Pour les systèmes de pompage, l'outil évalue la puissance nécessaire en fonction des besoins en eau et d'autres options techniques générales. En résumé, cette étape de prédimensionnement permet de déterminer les tailles appropriées des composants du système en fonction des besoins spécifiques, tout en prenant en compte la fiabilité et les performances souhaitées.

3.3.5 Conception du projet

Cette phase de conception avancée dans PVsyst implique l'utilisation de simulations horaires détaillées pour élaborer une conception approfondie du système. L'utilisateur a la possibilité d'effectuer plusieurs simulations et de les comparer pour obtenir le meilleur résultat. Il doit définir des paramètres tels que l'orientation des panneaux solaires et choisir les composants spécifiques du système, comme les modules PV, les onduleurs, les batteries ou les pompes.

Dans cette phase, l'utilisateur peut affiner les paramètres et analyser des aspects tels que le comportement thermique, le câblage, la qualité des modules, les pertes d'inadéquation et d'angle d'incidence, ainsi que les ombrages potentiels. Pour les systèmes de pompage, plusieurs configurations peuvent être testées et comparées avec une analyse approfondie de leur efficacité.

Les résultats de la simulation comprennent de nombreuses variables, qui peuvent être présentées sur une base mensuelle, quotidienne ou horaire, et peuvent même être exportées vers d'autres logiciels. Le "diagramme de perte" est un outil particulièrement utile pour identifier les faiblesses potentielles de la conception du système.

Chaque simulation génère un rapport détaillé comprenant tous les paramètres utilisés et les principaux résultats obtenus. De plus, une évaluation économique détaillée peut être réalisée en utilisant les prix réels des composants, ainsi que les coûts supplémentaires et les conditions d'investissement.

3.3.6 Bases de données

La fonction de gestion de bases de données de PVsyst concerne la gestion des données météorologiques ainsi que des composants PV. Cela inclut la création et la gestion de sites géographiques, la génération et la visualisation des données météorologiques horaires, ainsi que l'importation de données à partir de diverses sources prédéfinies ou de fichiers ASCII personnalisés.

Elle englobe également la gestion de la base de données des fabricants et des composants PV, couvrant une variété d'équipements tels que les modules photovoltaïques, les onduleurs, les régulateurs, les générateurs, les pompes, et bien d'autres.

3.3.7 Outils

La fonction de mesure et d'analyse des données de PVSYST permet l'importation de données mesurées à partir de systèmes PV en fonctionnement, dans presque tous les formats ASCII. Elle offre la possibilité d'afficher des tableaux et des graphiques présentant les performances réelles du système, permettant ainsi une comparaison étroite avec les variables simulées.

Cette fonctionnalité offre un moyen efficace d'analyser les paramètres réels de fonctionnement du système et de détecter même de petites irrégularités. Elle inclut également des outils spécifiques utiles pour les systèmes d'énergie solaire, tels que des tableaux et des graphiques présentant les données météorologiques ou les paramètres de géométrie solaire, ainsi que des outils pour modéliser l'irradiation sous un ciel clair, le comportement des champs PV en cas d'ombrage partiel ou de décalage de modules, et des outils d'optimisation pour l'orientation ou la tension.

3.3.8 Présentation du projet

Dans le cadre de notre projet d'installation de panneaux solaires sur un navire, il est important de considérer l'hybridation du système, notamment avec la propulsion diesel existante. L'hybridation implique l'intégration harmonieuse de différentes sources d'énergie, en l'occurrence le diesel et les panneaux solaires, pour alimenter les différents équipements à bord.

En intégrant les panneaux solaires au système de propulsion diesel, nous pouvons réduire la dépendance aux combustibles fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre tout en améliorant l'efficacité énergétique globale du navire. Les panneaux solaires peuvent contribuer à la production d'électricité nécessaire pour alimenter non seulement les équipements non essentiels comme les lampes de navigation, les réfrigérateurs, les téléviseurs, etc., mais également certains systèmes auxiliaires du navire.

L'hybridation permet également d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles, en utilisant l'énergie solaire lorsque les conditions le permettent, et en recourant au diesel lorsque cela est nécessaire, par exemple pendant la nuit ou lorsque les panneaux solaires ne fournissent pas suffisamment d'énergie. Cette approche peut contribuer à réduire les coûts d'exploitation et à améliorer la durabilité environnementale du navire.

3.3.8.1 Donnée géographique du site Ghazaouet, TLEMEN

Les données géographiques de Ghazaouet, une ville en Algérie, indiquent qu'elle se situe à une longitude de -1.8577 degrés à l'ouest et à une latitude de 35.0958 degrés au nord, avec une altitude de 200 mètres par rapport au niveau de la mer. Le fuseau horaire de Tlemcen est GMT+1, ce qui signifie qu'elle est en avance d'une heure par rapport au temps moyen de Greenwich (GMT). Cette information place Tlemcen dans le fuseau horaire d'Europe centrale (CET) pendant la majeure partie de l'année, avec un ajustement d'une heure pendant l'heure d'été (CEST).

The screenshot shows a web-based form titled "Lieu" (Location) and "Coordonnées Géographiques" (Geographical Coordinates). The "Lieu" section includes a text input for "Nom du site" (Site name) containing "Ghazaouet", a dropdown menu for "Pays" (Country) set to "Algérie", and a "Région" (Region) field. The "Coordonnées Géographiques" section features a "Trajectoires du soleil" (Sun trajectories) button with a sun icon. Below this, there are input fields for "Latitude" (35.0958 decimal, 35° 5' 44" DMS), "Longitude" (-1.8577 decimal, -1° 51' 27" DMS), "Altitude" (11 M), and "Fus. horaire" (1.0). A note indicates the time difference: "Temps Légal - Temps Solaire = 1h 7m". A "Obtenir depuis le nom" (Get from name) button is at the bottom.

Figure 3-20 Donnée géographique de Ghazaouet.

3.3.8.2 Données météorologiques

La conception des systèmes photovoltaïques requiert une compréhension précise du rayonnement solaire disponible sur le site d'installation, un paramètre fondamental dans l'évaluation préliminaire pour les panneaux solaires. Pour répondre à un besoin électrique spécifique, la quantité d'énergie solaire reçue influence directement le nombre de panneaux solaires requis : une plus grande quantité d'énergie solaire réduira le nombre de panneaux nécessaires, et vice versa.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il est absorbé et diffusé au niveau du sol. Les interactions avec l'atmosphère entraînent la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident. Ces phénomènes sont complexes et en grande partie aléatoires. Le flux lumineux reçu sur le sol dépend de nombreux paramètres, tels que la composition de l'atmosphère, la couverture nuageuse, l'albédo, la température, le vent, l'humidité relative, etc. Ces paramètres varient selon la localisation géographique, la saison, l'heure de la journée et les conditions météorologiques actuelles, ce qui détermine la taille optimale du système à concevoir.

En général, les moyennes mensuelles des données climatiques ou une estimation du nombre de jours avec une faible ressource en irradiation solaire sont utilisées pour dimensionner les panneaux photovoltaïques et les batteries. Cependant, le comportement dynamique du système face à la nature aléatoire du rayonnement solaire a un impact significatif sur la taille requise du système pour une application donnée [49].

Pour la simulation, les valeurs horaires suivantes sont nécessaires pour le site de Ghazaouet, où l'irradiation globale annuelle est élevée à 208.8 W/m² :

- Irradiation diffuse horizontale : 80.2 W/m²
- Température ambiante : 19.2°C
- Vitesse minimale du vent : 2,6 m/s

Ces paramètres météorologiques sont répertoriés dans le tableau 6.

Tableau 6 Conditions climatiques de Ghazaouet.

Site **Ghazaouet (Algérie)**
Source des données **Meteonorm 8.1 (1996-2010), Sat=100 %**

	Irradiation globale horizontale W/m ²	Irradiation diffuse horizontale W/m ²	Température °C	Vitesse du vent m/s	Turbidité Linke [-]	Humidité relative %
Janvier	118.8	44.2	12.6	2.69	2.594	75.5
Février	154.6	53.4	13.2	3.00	2.858	74.7
Mars	208.2	74.1	15.2	2.79	3.512	73.6
Avril	249.2	95.7	17.0	2.91	3.898	72.6
Mai	275.3	111.2	20.1	2.69	4.397	69.1
Juin	305.6	117.5	23.4	2.60	4.932	69.2
Juillet	294.5	117.2	26.7	2.70	6.020	64.5
Août	271.0	108.2	27.1	2.40	5.295	66.7
Septembre	219.2	90.1	24.0	2.39	4.416	73.4
Octobre	169.6	67.2	21.0	2.20	3.643	73.8
Novembre	129.6	45.3	16.2	2.80	3.034	73.4
Décembre	106.7	37.0	13.8	2.60	2.699	75.5
Année	208.8	80.2	19.2	2.6	3.941	71.8

Irradiation globale horizontale variabilité d'une année sur l'autre 3.1%

3.3.8.3 Orientation des modules photovoltaïques

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil joue un rôle crucial dans leur production énergétique. Il est primordial de les orienter de manière optimale pour exploiter pleinement leur potentiel. L'orientation fait référence au point cardinal vers lequel est dirigée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest, etc.), tandis que l'inclinaison désigne l'angle formé par le panneau par rapport au plan horizontal, mesuré en degrés.

L'orientation idéale d'un panneau photovoltaïque consiste à le tourner vers l'équateur, ce qui correspond au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans l'hémisphère sud. En ce qui concerne l'inclinaison, il est recommandé de prendre en compte la période de l'année la moins ensoleillée afin d'optimiser la production d'énergie. Les panneaux doivent être positionnés de manière à capturer l'énergie d'un soleil situé à une hauteur relativement basse [49].

Dans notre cas, nous avons choisi un plan incliné fixe avec une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale, comme recommandé par le logiciel PVsyst pour une orientation plein sud et une optimisation annuelle avec des pertes négligeables. Nous définissons le facteur de transposition comme le rapport entre l'irradiation incidente sur le plan (GlobInc) et l'irradiation horizontale (GlobHor). En d'autres termes, il représente le gain obtenu lors de l'inclinaison du plan du capteur. Pour notre système, ce facteur de transposition est de 1,16.

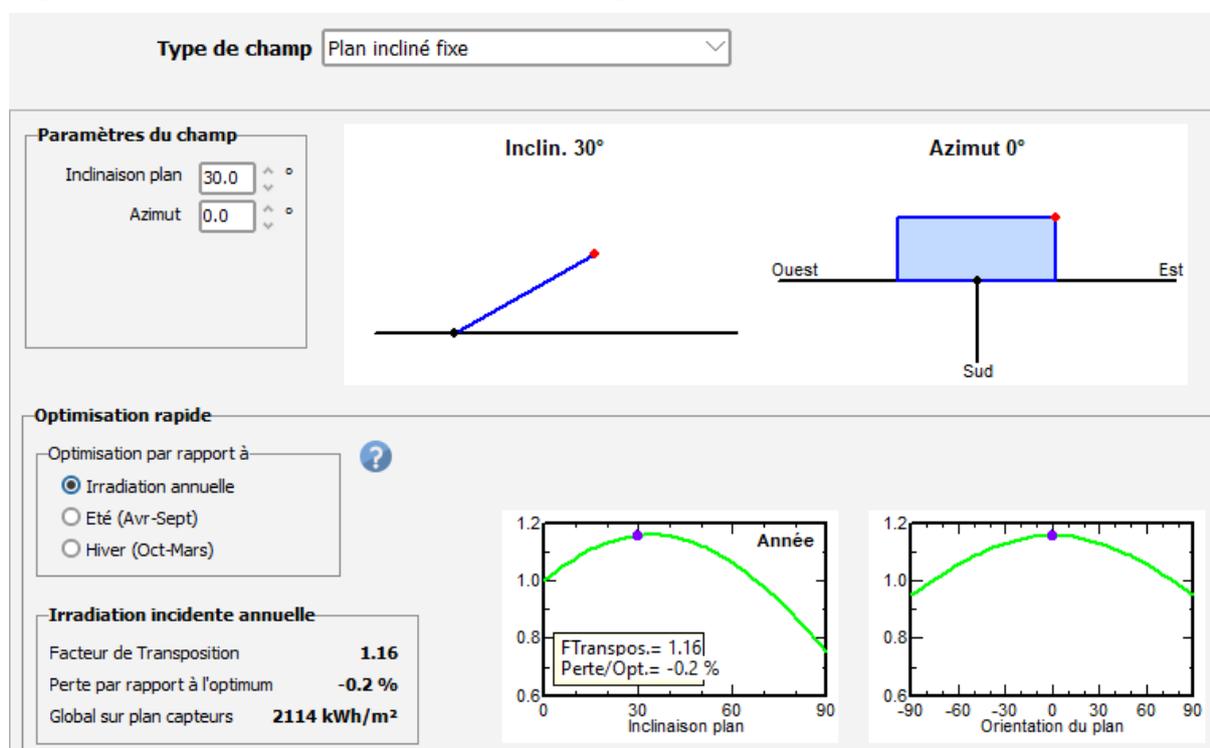


Figure 3-21 Angle d'orientation.

L'orientation optimale des panneaux photovoltaïques sur un navire est un défi en raison de la déambulation constante du navire en mer, qui change continuellement de direction. Un traqueur de soleil est donc essentiel pour maximiser la capture de l'énergie solaire. Ce système permet aux panneaux de suivre automatiquement la trajectoire du soleil, ajustant leur position pour maintenir un angle d'incidence optimal. Ainsi, malgré les mouvements du navire, les panneaux peuvent capter le maximum de lumière solaire, augmentant ainsi l'efficacité de la production d'énergie renouvelable à bord.

3.3.8.4 Hauteur du soleil

La définition d'un profil de l'horizon est une opération simple à réaliser avec l'outil graphique PVsyst. L'horizon est représenté par une ligne brisée superposée sur le diagramme de la trajectoire du soleil, pouvant comporter un nombre variable de points d'azimut et de hauteurs.

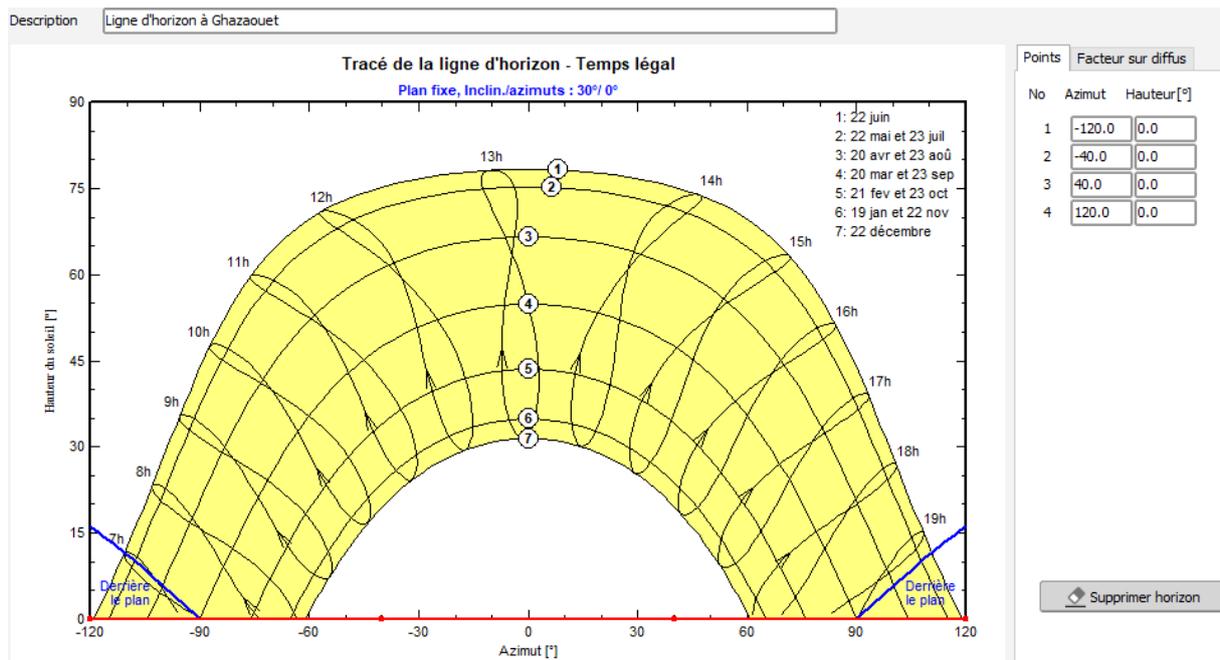


Figure 3-22 Horizon de Ghazaouet.

L'angle de hauteur du soleil, qui est l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal, varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

3.3.9 Simulation d'un système photovoltaïque alimentant les équipements d'un bateau

Pour concevoir un système photovoltaïque (PV) capable d'alimenter les équipements d'un bateau, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. La figure "3-23" illustre le schéma simplifié de ce système PV, qui se compose de trois parties principales :

- Partie photovoltaïque (panneau)
- Système (convertisseur continu/alternatif, onduleur)
- Batterie

Le dimensionnement et la configuration du système de production et de conversion d'énergie nécessitent la détermination du nombre de modules PV nécessaires pour générer l'énergie requise. Les convertisseurs de courant continu, connectés au générateur photovoltaïque, adaptent la tension à ses bornes en utilisant une technique MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui contrôle cycle de travail de commutation. Un onduleur triphasé est ensuite employé pour convertir la puissance continue en puissance alternative, qui peut être utilisée pour alimenter les équipements du bateau.

Configuration typique d'un système isolé

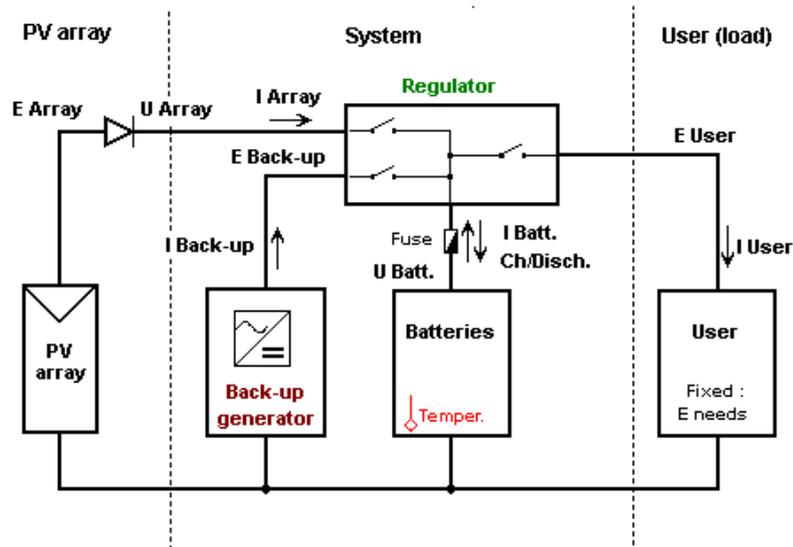


Figure 3-23 Schéma Simplifié.

3.3.9.1 Dimensionnement du système

3.3.9.1.1 Consommation journalière de notre bateau en électricité

La consommation électrique du bateau est principalement axée sur les besoins de base tels que l'éclairage, les systèmes de navigation et de communication, ainsi que les appareils essentiels comme les pompes à eau et les réfrigérateurs. Bien que ces besoins soient modestes par rapport à ceux de navires plus grands, ils demeurent essentiels pour garantir le confort et la sécurité à bord. Un bateau typique peut nécessiter entre quelques centaines de watts à quelques kilowatts d'énergie en fonction de ses équipements. Dans notre cas, notre bateau nécessite une consommation journalière de 12.484 kWh/jour comme l'illustre la figure "3-24"

L'utilisation de systèmes photovoltaïques constitue une solution idéale pour fournir cette énergie de manière durable, en exploitant l'abondante lumière solaire pour alimenter les équipements tout en réduisant la dépendance aux générateurs à carburant fossile.

Consommation
Distribution horaire

Consommations journalières

Nombre	Appareil	Puissance	Util. journ.	Distrib. horaire	Daily energy
7	Lampes (LED ou fluo)	9 W/lampe	10.0 h/jour	OK	630 Wh
1	TV / PC / Mobile	120 W/app	4.0 h/jour	OK	480 Wh
0	Appareils domestiques	0 W/app	0.0 h/jour		0 Wh
1	Frigo / Congélateur	0.35 kWh/jour	24.0	OK	350 Wh
0	Machines à laver linge/vaisselle	0.0 W moy.	0.0 h/jour		0 Wh
1	treuil	5500 W/app	2.0 h/jour	OK	11000 Wh
0	Autres utilisations	0 W/app	0.0 h/jour		0 Wh
	Consomm. de veille	1 W tot	24 h/jour		24 Wh
Energie journalière totale					12484 Wh/jour
Énergie mensuelle					374.5 kWh/mois

? Info appareils

Définition consommation par

Années ?

Saisons

Mois

Utilis. Week-end ou semaine

Utilisation seulement pendant

jours dans la semaine

Figure 3-24 Consommation journalière de notre bateau.

3.3.9.1.2 Configuration des panneaux photovoltaïques

Pour concevoir un système PV adapté, il est essentiel de prendre en compte plusieurs paramètres techniques et environnementaux. Cela inclut la puissance requise pour alimenter les équipements à bord, la superficie disponible pour l'installation des panneaux solaires, ainsi que les caractéristiques spécifiques des modules PV, des convertisseurs et des batteries. Cette étude se concentre sur le dimensionnement d'un tel système pour un bateau stationné à Ghazaouet, Tlemcen, avec des besoins journaliers estimée à 12.5 kWh. En choisissant des modules photovoltaïques en silicium polycristallin et un convertisseur d'énergie adapté, nous visons à optimiser l'efficacité et la performance de l'installation solaire.

Nous avons sélectionné des modules photovoltaïques en silicium polycristallin de 32V/340Wp, de la marque « AE 340P6-72 ».

The screenshot displays the configuration interface for a photovoltaic system. Key sections include:

- Needs and Autonomy:** Average daily needs of 12.5 kWh/day, with a 5.0% acceptable PL0L and 5.0-day autonomy requirement.
- Storage and PV Field:** Options for 'Stockage', 'Champ PV', 'Appoint', and 'Schéma simplifié'. The PV field is named 'Champ PV' with a 30-degree inclination and 0-degree azimuth.
- Module Selection:** Filtered to 'AE Solar' (340 Wp, 32V, Si-poly). Recommended power is 3253 Wc.
- Regulation and Controller:** Selected as 'Régulateur universel' (MPPT) with a 'Générique' controller. Operating mode is 'Convertisseur MPPT'.
- PV Field Design:** 2 modules in series, 6 chains, resulting in 12 modules and 23 m² surface area.
- Operating Conditions:** Irradiance of 1000 W/m², V_{mpp} (60°C) of 65 V, and a maximum power of 3.67 kW.

Figure 3-25 Configuration des panneaux photovoltaïques.

On observe que PVsyst offre une configuration de modules et de systèmes permettant de réaliser une première simulation préliminaire. Ce logiciel intègre également un système de code d'erreurs ou d'avertissements colorés pour signaler toute incohérence, erreur ou avertissement. Ainsi, toute anomalie sera immédiatement signalée dans la fenêtre correspondante, nous permettant de prendre les mesures correctives nécessaires.

3.3.9.1.3 Configuration des batteries

Les batteries jouent un rôle crucial dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, notamment pour les installations photovoltaïques. Elles permettent de stocker l'énergie solaire captée pendant la journée pour une utilisation ultérieure, garantissant ainsi une alimentation électrique continue même en l'absence de soleil. Pour un bateau, cette capacité de stockage est essentielle, car elle assure que les équipements vitaux, comme les systèmes de navigation, les éclairages et les appareils de communication, restent opérationnels à tout moment. De plus, les

batteries contribuent à la stabilité et à la fiabilité du système électrique global, en fournissant une réserve d'énergie en cas de fluctuations ou d'interruptions temporaires de la production solaire. En somme, les batteries sont indispensables pour maximiser l'efficacité, l'autonomie et la sécurité des systèmes énergétiques sur un bateau.

Dans notre cas, nous avons choisi des batteries de (12V avec une capacité de 296Ah) de la marque « 12-CS-11PS » constituant un nombre de 32 batteries (4 en série et 8 en parallèle) et offrant une tension de pack de 48V et une capacité globale de 2368 Ah nécessaire pour l'alimentation des équipements de notre bateau.

The screenshot shows a software interface for battery configuration. It includes a 'Procédure' section with four steps: 1. Pré-dimensionnement, 2. Stockage, 3. Conception champ PV, and 4. Appoint. Below this is the 'Définissez le pack de batteries' section, which allows users to sort batteries by tension, capacity, or manufacturer. The current configuration shows 12V, 296 Ah, Pb Sealed Plates, and 12-CS-11PS. The battery pack configuration is set to 4 batteries in series and 8 in parallel, resulting in a 48V pack, 2368 Ah capacity, 90.9 kWh energy storage, and 4288 kg total weight. The 'Température batterie en opération' section is set to 'Fixée (local tempéré)' at 20°C.

Définissez le pack de batteries		Tension du pack batteries	
Trier les batteries selon <input checked="" type="radio"/> tension <input type="radio"/> capacité <input type="radio"/> fabricant		48 V	
Rolls	12 V 296 Ah Pb Sealed Plates 12-CS-11PS	Capacité globale	
Pb-acide		2368 Ah	
4 batteries en série	Nombre de batteries 32	Energie stockée (80 % DOD)	
8 batteries en parallèle	Nombre d'éléments 192	90.9 kWh	
100.0 % Etat d'usure initial (nb. de cycles)		Poids total	
100.0 % Etat d'usure initial (statique)		4288 kg	
		Nbre de cycles à 80 % DOD	
		1984	
		Energie totale stockée durant la vie de la batterie	
		200 MWh	

Figure 3-26 Configuration des batteries.

3.3.9.1.4 Configuration du convertisseur

Le convertisseur choisi pour cette installation est « MPPT 1000W » caractérisé par les paramètres indiqués dans la figure "3-27".

Description **Generic, Universal controller with MPPT converter**

Entrée solaire (champ PV)		Sortie (batterie et charge utilisateur)	
Tension MPP minimale	50 V	Puissance de sortie nominale	3,26 kW
Tension MPP maximale	90 V	Puissance de sortie maximum	3,55 kW
Tension champ max.	108 V	Tension de sortie nominale	48.0 V
Puissance seuil	35,5 W	Courant de sortie nominal	68.0 A

Cond. de fonctionnement	
Mode d'opération	
<input checked="" type="radio"/> MPPT	
<input type="radio"/> Tension fixe	
Comportement à Pnom	
<input checked="" type="radio"/> Limitation	?
<input type="radio"/> Coupure	
Comportement à Vmin/Vmax	
<input checked="" type="radio"/> Limitation	?
<input type="radio"/> Coupure	

Efficacité	
Efficacité maximale	97.0 %
Efficacité moyenne européenne normalisée	95.0 %

Valeurs pour le profil automatique

Régulateur universel: Les valeurs sont fixées selon votre système. Vous pouvez ajuster les efficacités sur la page suivante.

Figure 3-27 Détails du convertisseur.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'application de HOMER Pro et PVsyst pour dimensionner un système de propulsion et d'alimentation électrique des équipements du bateau utilisant des énergies renouvelables. Nous avons commencé par une description du navire concerné et une description des logiciels utilisés. Ensuite on a donné un aperçu du secteur énergétique en Algérie, en mettant en lumière les projets réalisés, la croissance énergétique et l'importance du potentiel solaire du pays, notamment en ce qui concerne l'énergie solaire photovoltaïque. Enfin, on a dimensionné notre système par les logiciels Homer pro et PVsyst et on a procédé à la configuration des composants constituant ce système.

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4 Résultats et interprétation

4.1 Introduction

Suite à notre étude sur l'installation d'un système photovoltaïque pour alimenter les équipements d'un bateau, ce chapitre présentera les résultats des simulations effectuées avec les logiciels PVSYST et HOMER Pro. Nous inclurons tous les graphiques et tableaux pertinents, ainsi qu'une analyse de la rentabilité du système PV en utilisant PVSYST et HOMER Pro. Cette analyse comparative visera à évaluer l'efficacité économique et énergétique, à déterminer le dimensionnement optimal, et à estimer le coût global actualisé par kWh fourni.

4.2 Résultats pour HOMER Pro

Avec le logiciel HOMER nous avons déterminée dans le chapitre 3 la configuration optimale du système photovoltaïque et après le lancement du calcul, Homer donne la solution optimale dans le Tableau 7.

Tableau 7 Résultat optimal pour HOMER Pro.

Optimization Results													
Architecture				Cost				System		CS6U-340M		Dis12V	
CS6U-340M (kW)	Dis12V	ABB-MGS (kW)	Dispatch	NPC (DA)	COE (DA)	Operating cost (DA/yr)	Initial capital (DA)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (DA)	Production (kWh/yr)	Autonomy (hr)	Annual Thr (kWh)
4.50	21	20.0	CC	DA4.56M	DA77.47	DA75.453	DA3.59M	100	0	135.000	7,654	101	2,962

D'après le tableau 7, on y retrouve les informations suivantes :

- « **zone 1** » représente les équipements du système et leur capacité: **Le champ PV CS6U-340M : 4.5 [KW] Les batteries : 21 L'Onduleur ABB-MGS : 20 [KW]**
- « **zone 2** » représente l'investissement initial devant être fait: **NPC(Coût Net Présent) 4.56M DA COE (Coût de l'énergie) Initial capital 77.47 DA**
- « **zone 3** » représente la proportion d'énergie renouvelable utilisée dans le système (**Ren Frac**) 100%
- « **zone 4** » représente les caractéristiques de sortie de champ PV: (**Energy Production**) 7654 [KWh/ans]

4.2.1 Energie solaire globale

Pour évaluer le paramètre influençant directement la production photovoltaïque, qui est le rayonnement solaire incident, et afin d'éviter toute confusion avec le rayonnement solaire

global, les figures "4-1" et "4-2" illustrent clairement la récupération de l'énergie solaire sur une longue période de l'année. Ces figures montrent comment le rayonnement solaire incident affecte la production d'énergie solaire, en mettant en évidence la corrélation entre les périodes de fort ensoleillement et la quantité d'énergie captée par le système photovoltaïque.

Ces analyses permettent de distinguer l'impact du rayonnement solaire incident par rapport au rayonnement global, ce qui est crucial pour optimiser la conception et l'efficacité des installations photovoltaïques. En étudiant ces figures, on peut comprendre comment la production d'énergie varie en fonction des variations saisonnières du rayonnement solaire et identifier les périodes de l'année où la production est maximale.

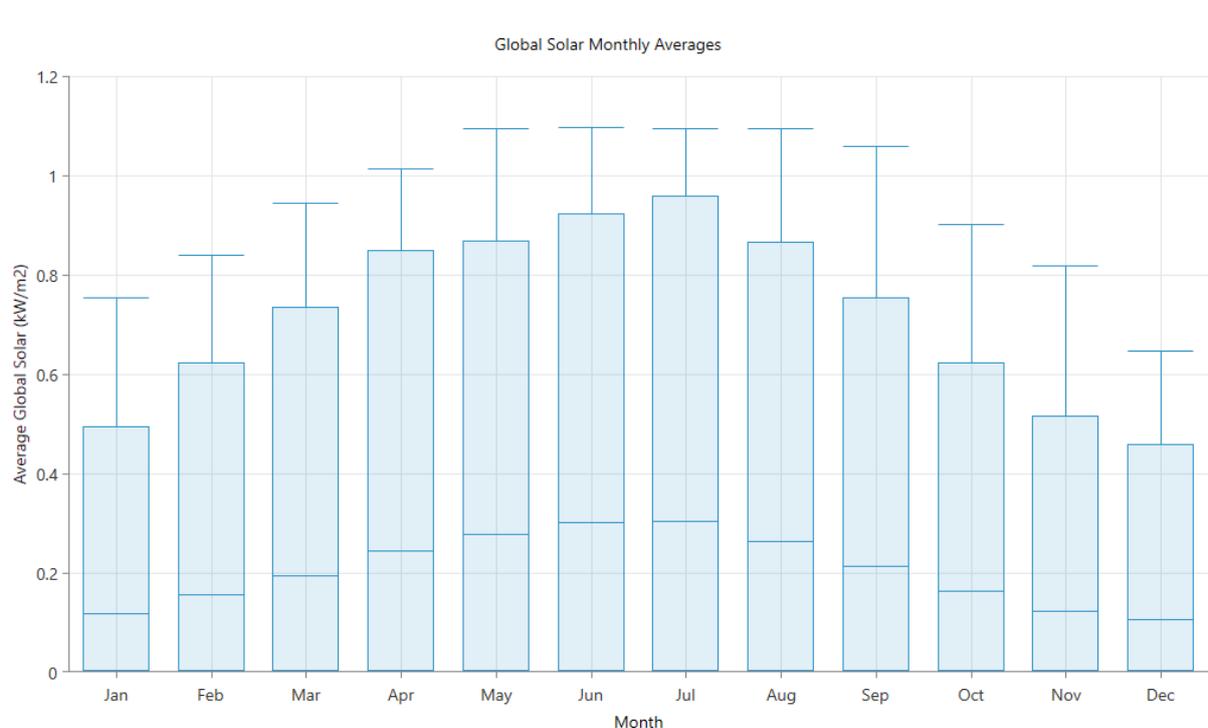


Figure 4-1 L'énergie solaire global.

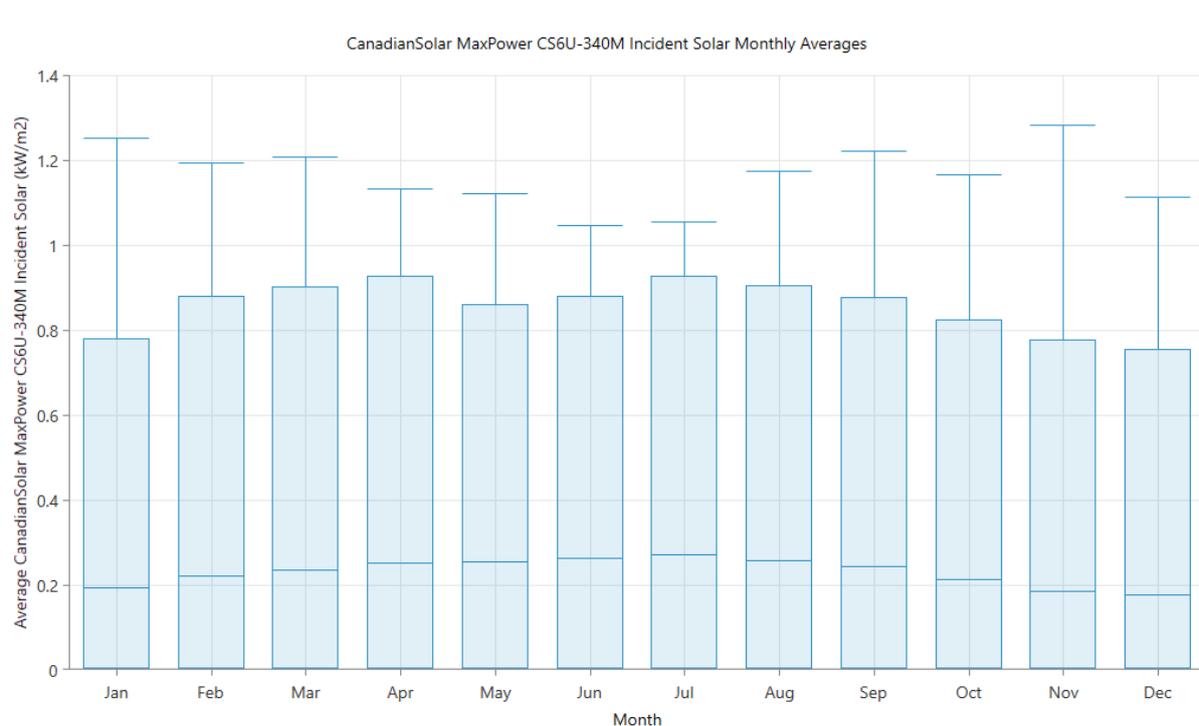


Figure 4-2 L'énergie solaire incidente des champs PV.

4.2.2 Production du champ PV et la consommation

La production photovoltaïque (PV) atteint la valeur de 7654 kWh/an. Cette production est variable tout au long de l'année et dépend directement de l'irradiation solaire. La Figure "4-3" illustre la production électrique totale mensuelle moyenne sur l'année, et met en évidence comment les besoins énergétiques du bateau sont partiellement couverts par le champ photovoltaïque.

La production mensuelle varie en fonction des saisons, avec des pics de production pendant les mois d'été, lorsque l'irradiation solaire est maximale, et des productions moins importantes pendant les mois d'hiver, où l'ensoleillement est réduit. Cette variabilité saisonnière est typique des systèmes photovoltaïques et souligne l'importance de prendre en compte les fluctuations de l'irradiation solaire pour une planification efficace de la production d'énergie.

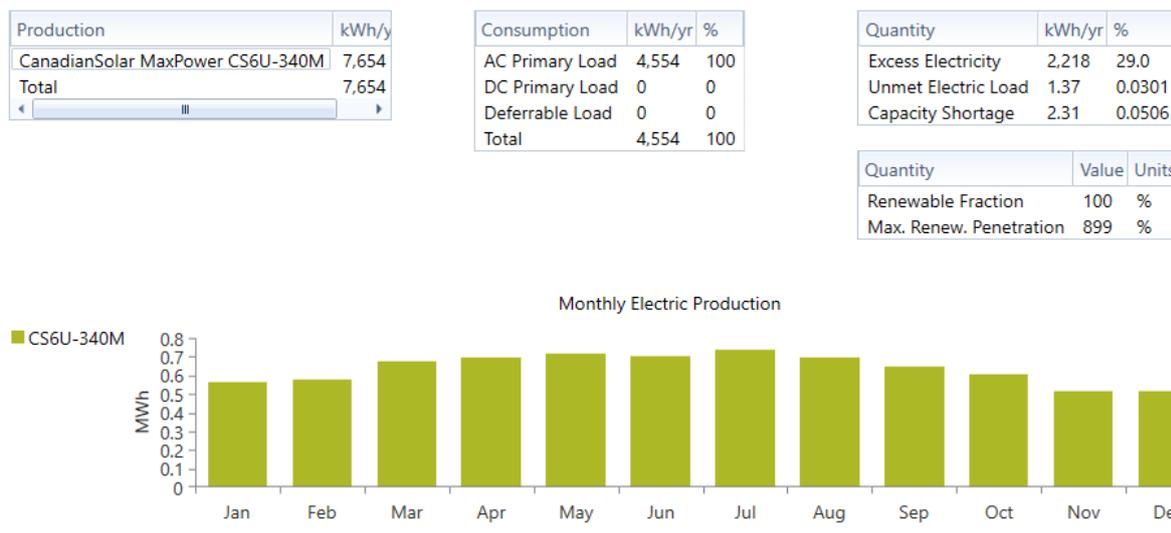


Figure 4-3 Production électrique totale mensuelle.

4.2.3 Détails des composants du système étudié

4.2.3.1 Détails de la température

Homer calcule la température de la cellule photovoltaïque à chaque pas de temps et utilise ce résultat pour déterminer la puissance de sortie des modules PV. Il calcule la température de la cellule en fonction de la température ambiante et du rayonnement sur les panneaux. La température moyenne mensuelle maximale est de 26.31°C en août, tandis que la température moyenne mensuelle minimale est de 7.47°C en janvier. La Figure "4-5" présente le profil annuel de la température ambiante.

En utilisant ces données de température, Homer peut ajuster les calculs de puissance des modules PV pour refléter plus précisément les conditions réelles, car la température de la cellule influence directement l'efficacité des modules photovoltaïques. Des températures plus élevées tendent à réduire l'efficacité des cellules, tandis que des températures plus basses peuvent améliorer légèrement leur performance. Ainsi, comprendre le profil de température ambiante sur une année complète permet d'optimiser les prévisions de production d'énergie solaire et de planifier de manière plus efficace la gestion de l'énergie produite.

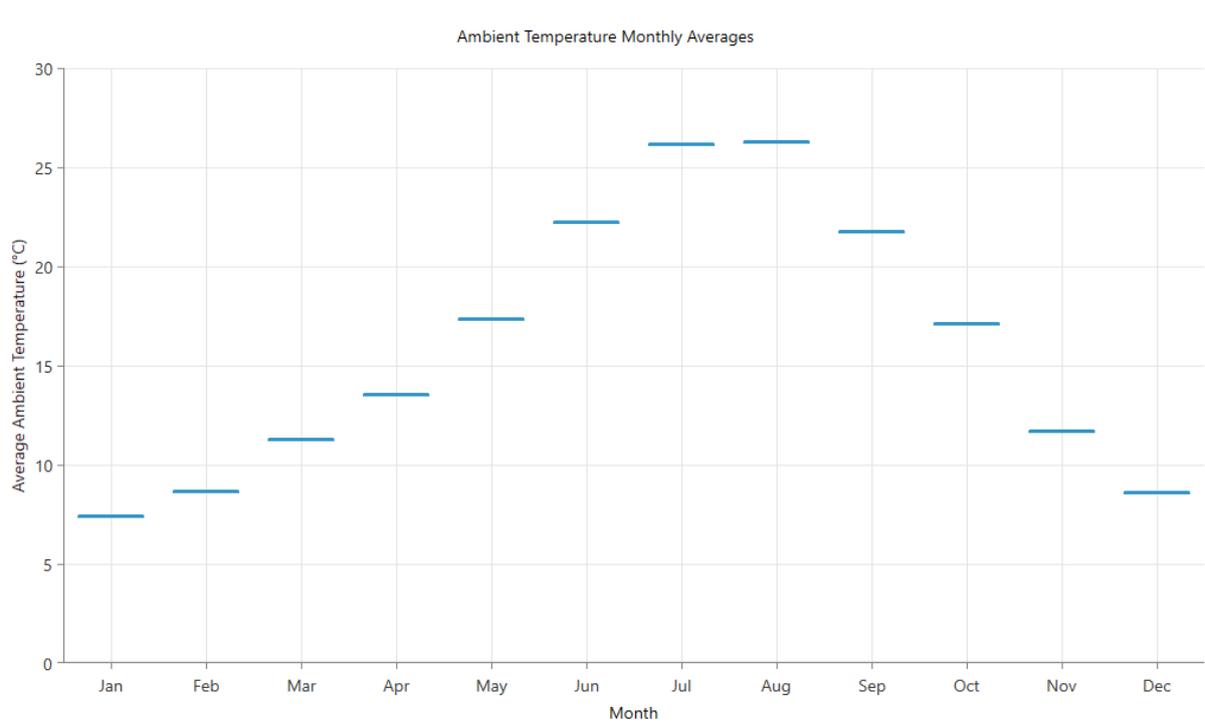


Figure 4-4 Température ambiante annuelle.

La variation de la température ambiante journalière au cours des saisons, est donnée par la Figure "4-5" ci-dessous :

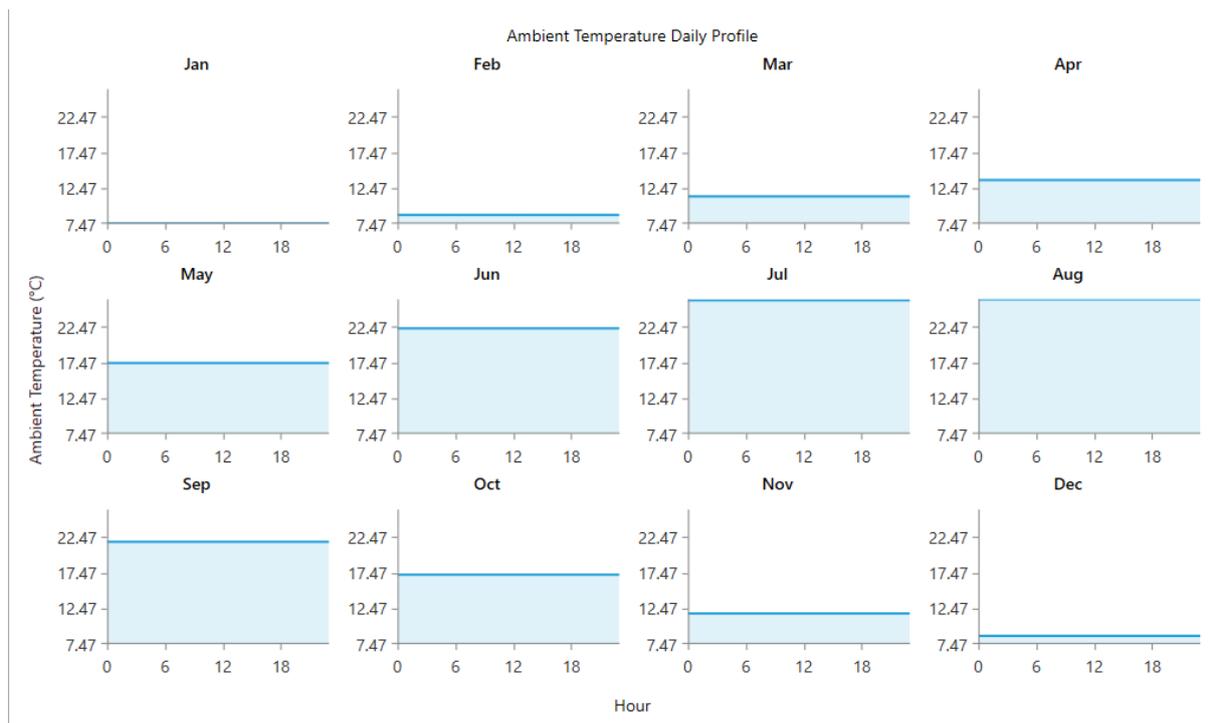


Figure 4-5 Température ambiante journalière.

4.2.3.2 Détails de la charge

Le dimensionnement d'un système de production d'énergie repose principalement sur le profil de consommation à satisfaire. Les détails de la charge sont introduits dans HOMER Pro sous forme de profil annuel de la charge, comme illustré dans la Figure "4-6". Ce profil montre la consommation d'énergie sur une base annuelle, permettant une évaluation précise des besoins énergétiques à couvrir.

En complément, la Figure "4-7" présente le profil de consommation journalier en fonction des saisons. Cette illustration permet de visualiser comment la demande d'énergie varie tout au long de la journée.

Ces profils sont essentiels pour dimensionner correctement le système photovoltaïque afin de garantir qu'il puisse répondre à la demande énergétique de manière efficace et fiable tout au long de l'année. En intégrant ces profils dans HOMER Pro, on peut simuler différentes configurations et optimiser la taille et la performance du système pour maximiser la production d'énergie renouvelable tout en minimisant les coûts et les pertes.

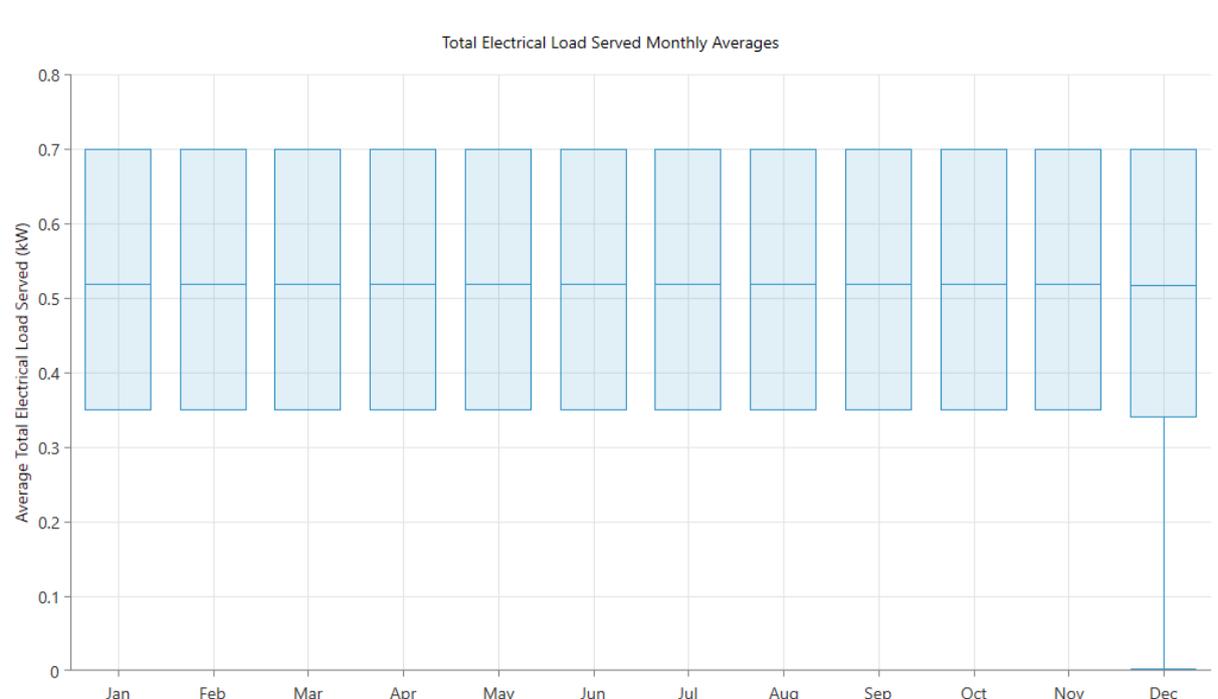


Figure 4-6 Profil de charge annuel.

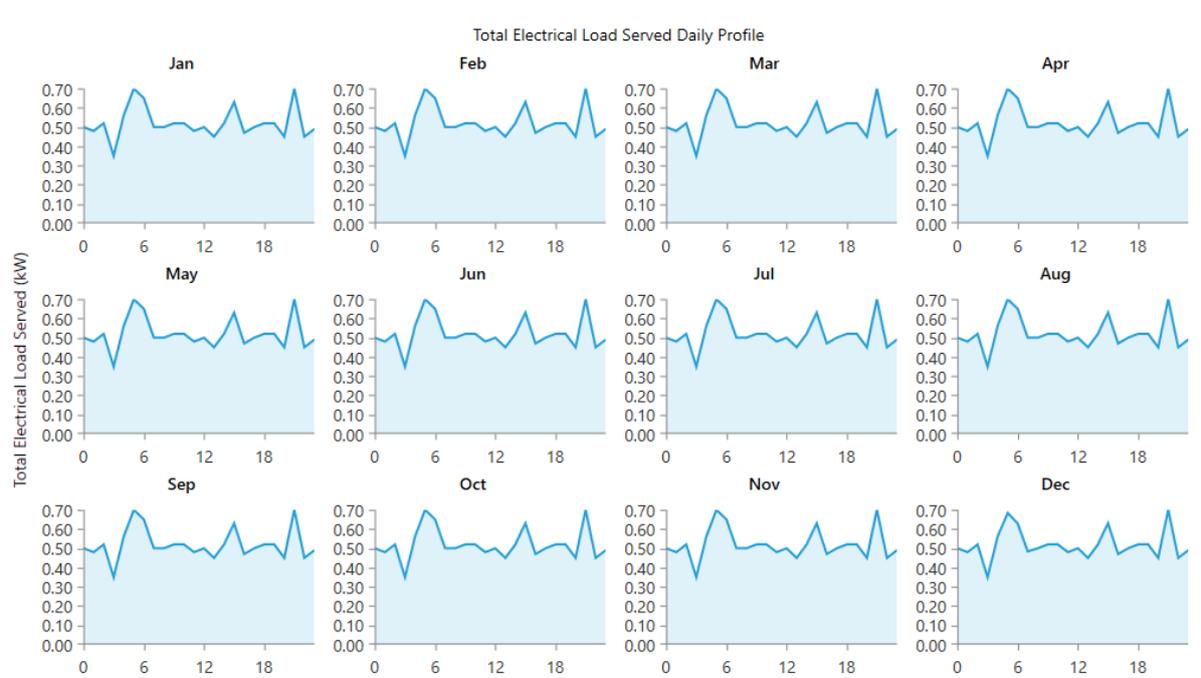


Figure 4-7 Profil de charge journalier suivant les saisons.

On remarque que le profil de consommation a généralement une tendance d'évolution journalière et mensuelle similaire. Journalièrement, Il y a un creux de consommation la nuit, entre 00 h et 03 h, et un pic de consommation le matin, vers 5h et le soir vers 20h. Mensuellement, la consommation est similaire pendant tous les mois atteignant une valeur moyenne de 0.52 kW et une valeur maximale de 0.70 kW

4.2.3.3 Détails du convertisseur

D'après la figure ci-dessous "4-8" on constate que l'énergie entrante atteint la valeur de 4,795 kWh/an et l'énergie en sortie de l'onduleur atteint la valeur de 4,555 kWh/an ce qui est équivalent à un rendement de 95% fonctionnant 8758 h/an. Ces figures "4-9" et "4-10" montre la puissance entrante et sortante de l'onduleur on remarque que leurs valeurs sont similaire toute au long de l'année avec des pertes estimées à une valeur de 240 kWh/an.

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	60.0	36.0	kW
Mean Output	0.520	0	kW
Minimum Output	0	0	kW
Maximum Output	0.700	0	kW
Capacity Factor	0.867	0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	8,758	0	hrs/yr
Energy Out	4,555	0	kWh/yr
Energy In	4,795	0	kWh/yr
Losses	240	0	kWh/yr

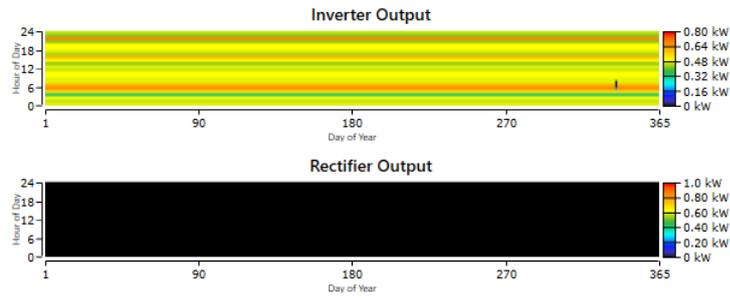


Figure 4-8 Indications puissance de l'onduleur.

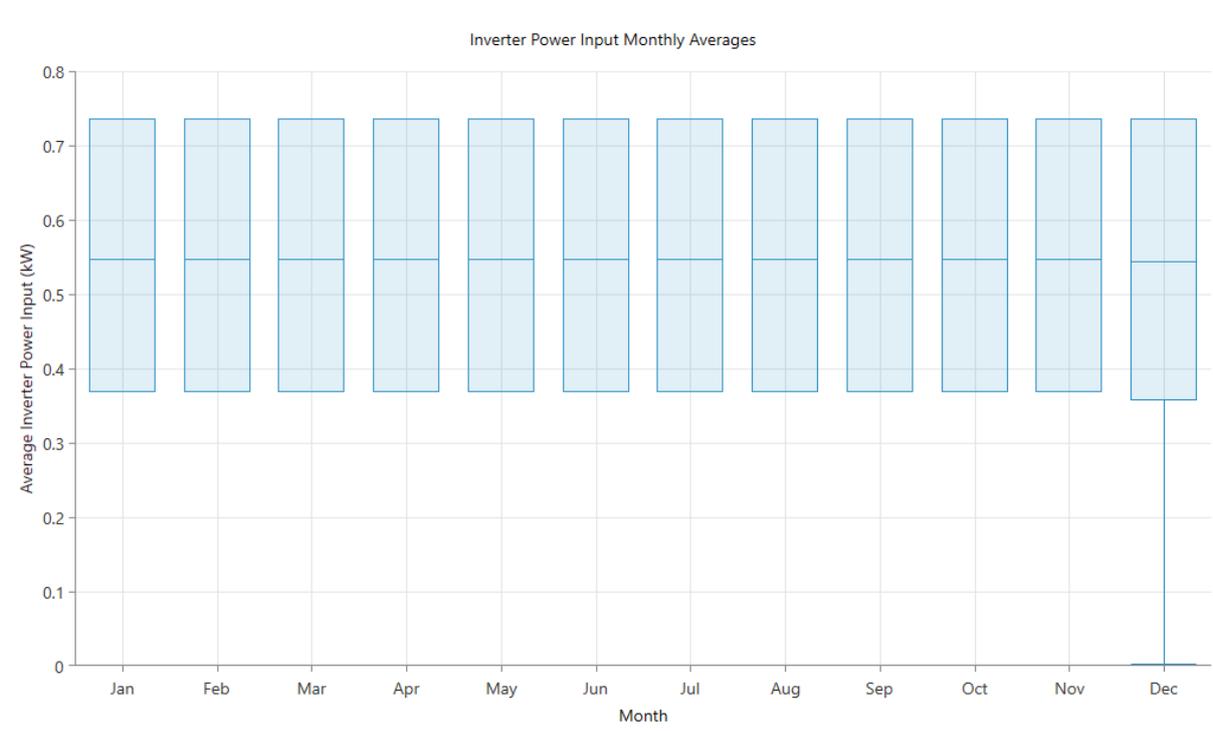


Figure 4-9 La puissance d'entrée du convertisseur.

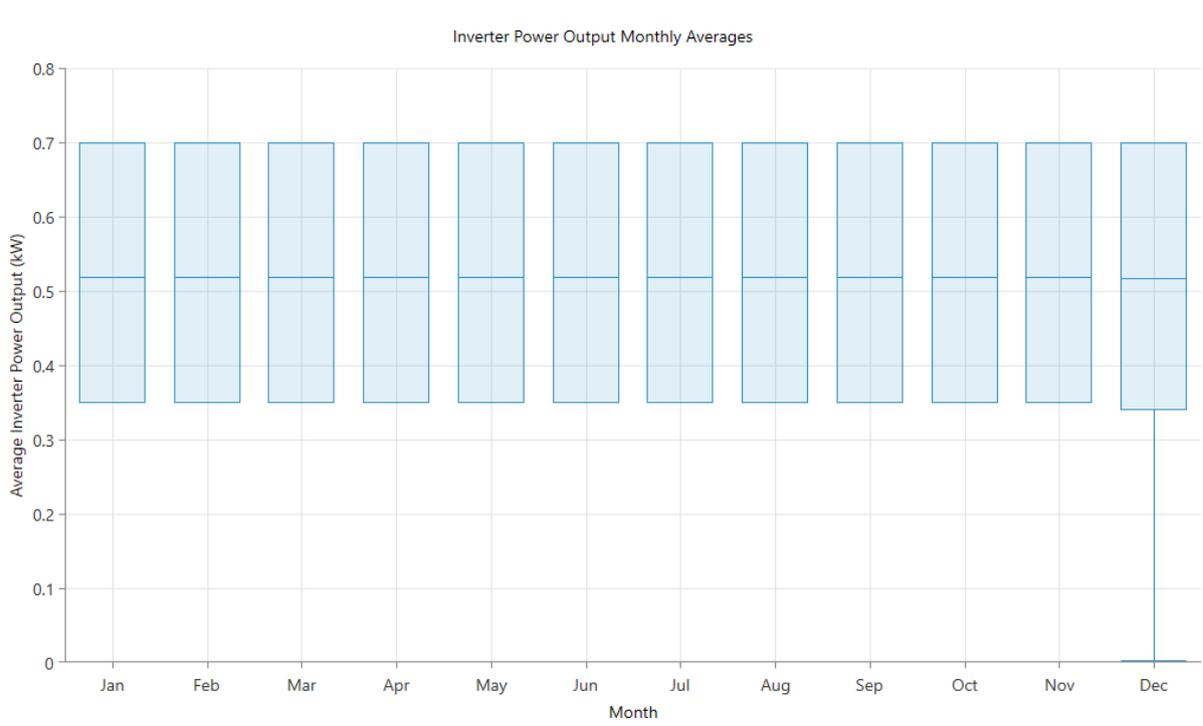


Figure 4-10 La puissance de sortie du convertisseur.

4.2.3.4 Détails des batteries

La figure "4-11" illustre la configuration suggérée par Homer pour obtenir une tension de 12V. Cependant, l'autonomie affichée est très faible, avec une valeur de 101 heures. Cela signifie que la fiabilité du système repose principalement sur l'alimentation provenant du panneau photovoltaïque plutôt que sur l'énergie stockée dans les batteries. En cas de faible production par les panneaux photovoltaïques, le système dépend de l'énergie stockée dans les batteries.

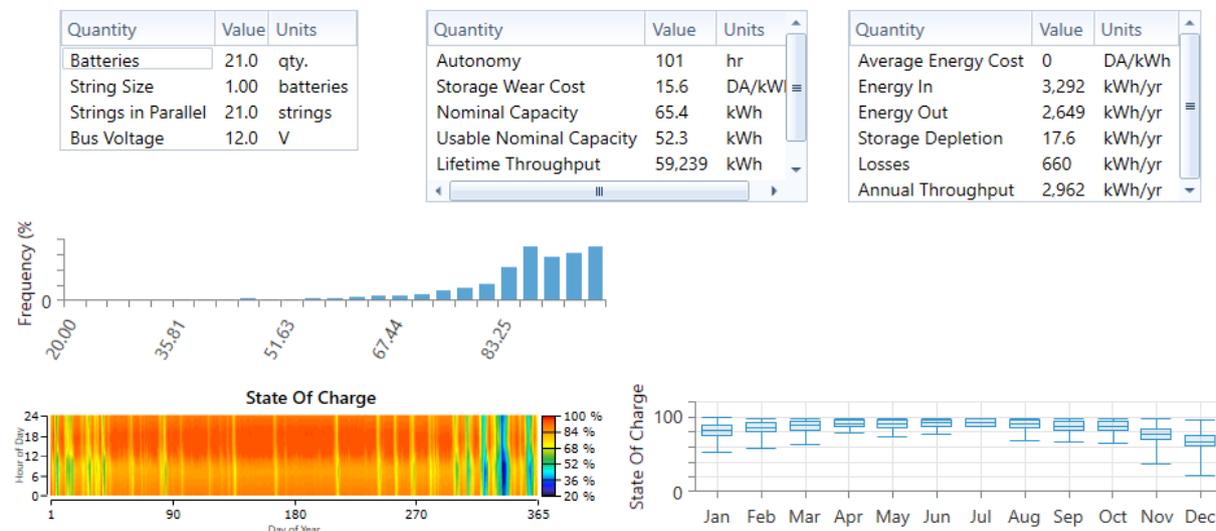


Figure 4-11 Indication des paramètres de la batterie.

4.3 Résultats pour PVsyst

Les résultats principaux des simulations effectuées avec PVsyst seront présentés sous forme de graphiques et de tableaux pour illustrer les différentes performances et rendements du système photovoltaïque. Ensuite, une discussion approfondie de ces résultats permettra d'analyser les implications des données obtenues, en mettant en lumière les points forts et les éventuelles limitations du système.

De plus, l'analyse portera également sur la faisabilité globale du système, en prenant en compte divers aspects tels que les coûts d'installation, les avantages économiques, l'impact environnemental, et la compatibilité avec les besoins énergétiques du site. Cette évaluation permettra de déterminer si le système photovoltaïque est viable et rentable sur le long terme.

4.3.1 Distribution de l'irradiation incidente

La figure "4-12" montre l'irradiation solaire incidente sur les panneaux photovoltaïques (PV) ainsi que leur production journalière en fonction du temps d'ensoleillement et de la hauteur du soleil. L'irradiation globale horizontale est estimée à 1829 kWh/m², avec une efficacité de conversion de 14.5 % pour l'irradiation globale incidente. Il y a également une perte supplémentaire de 1,9 % due au facteur de masse d'air, ce qui donne une irradiation de 2053 kWh/m². Par conséquent, la valeur totale effective sur la surface est de 23 m².

Cette irradiation suit la distribution du rayonnement incident et atteint un pic maximal d'environ 100 kWh/m² lorsque le rayonnement solaire atteint une valeur maximale de 900 W/m². Cela indique que les performances des panneaux PV sont fortement dépendantes des conditions d'ensoleillement, avec une efficacité maximale atteinte lors des périodes de rayonnement solaire élevé.

L'analyse de ces données est essentielle pour optimiser la conception et le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, permettant de maximiser la production d'énergie en fonction des conditions climatiques et de l'irradiation solaire disponible.

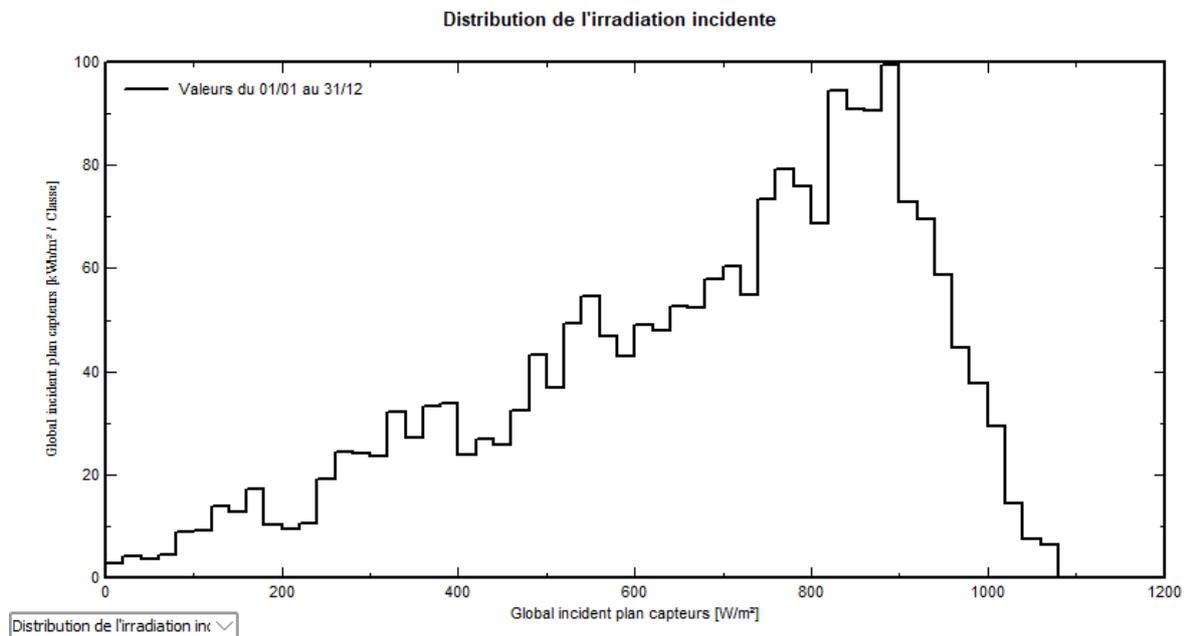


Figure 4-12 Distribution de l'irradiation incidente.

4.3.2 Distribution de la puissance du champ PV

La figure "4-13" illustre la puissance effective annuelle produite par le champ photovoltaïque (PV), qui peut atteindre 5434 kWh. On observe également une valeur de pic de puissance de 125 kWh/m². La distribution de la puissance en sortie du champ PV suit la même tendance que la distribution du rayonnement incident, bien qu'à une échelle différente.

Cette corrélation est due à plusieurs facteurs, dont les pertes globales variables qui dépendent de la qualité des modules. En particulier, les pertes mis match (désadaptation) et les pertes ohmiques de câblage jouent un rôle important. Ces pertes ohmiques sont influencées par la température, ce qui affecte significativement la production des modules photovoltaïques. De plus, ces pertes dues au câblage varient en fonction du niveau d'irradiance, c'est-à-dire de l'intensité du rayonnement solaire reçu.

Il est important de noter que les pertes ohmiques de câblage représentent environ 2,1 % des pertes totales, ce qui peut sembler faible mais ils ont un impact notable sur la production globale

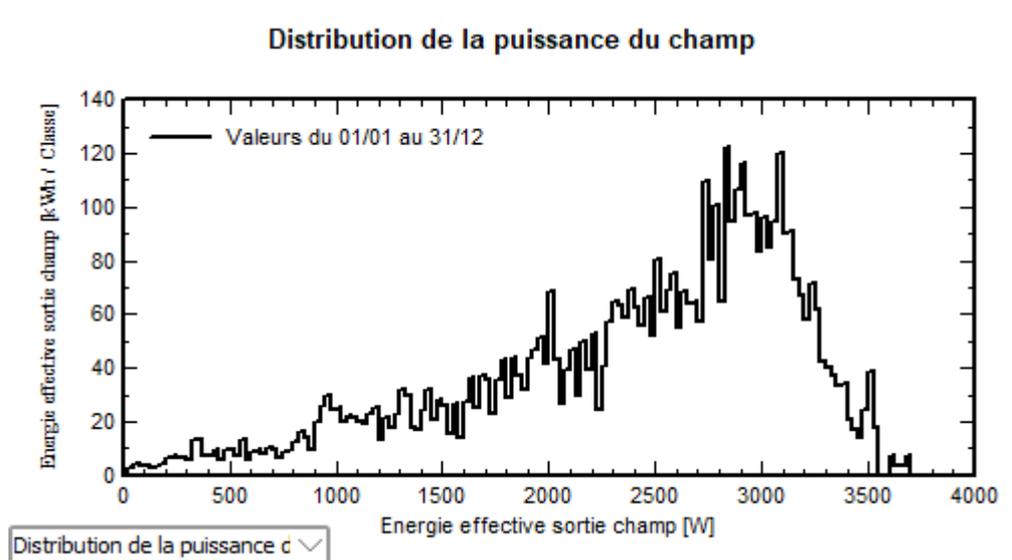


Figure 4-13 Distribution de la puissance du champ PV.

d'énergie. La gestion de ces pertes est essentielle pour optimiser l'efficacité du système PV et maximiser la production d'énergie.

4.3.3 Energie solaire disponible

La figure "4-14" indique que l'énergie solaire disponible atteint son pic maximal de 6.800 kWh pendant l'été, spécifiquement durant les mois de juin, juillet et août. En revanche, la valeur moyenne minimale d'énergie solaire est généralement observée en hiver, en décembre et janvier.

L'énergie solaire disponible suit une variation saisonnière prononcée, avec des niveaux élevés en été grâce à des jours plus longs et une irradiation solaire plus intense. En hiver, les jours plus courts et un ensoleillement moins intense réduisent considérablement l'énergie solaire disponible.

Cette variation saisonnière doit être prise en compte lors de la planification et de la gestion des systèmes photovoltaïques. Des systèmes de stockage d'énergie ou des sources d'énergie complémentaires peuvent être nécessaires pour assurer une fourniture énergétique stable tout au long de l'année.

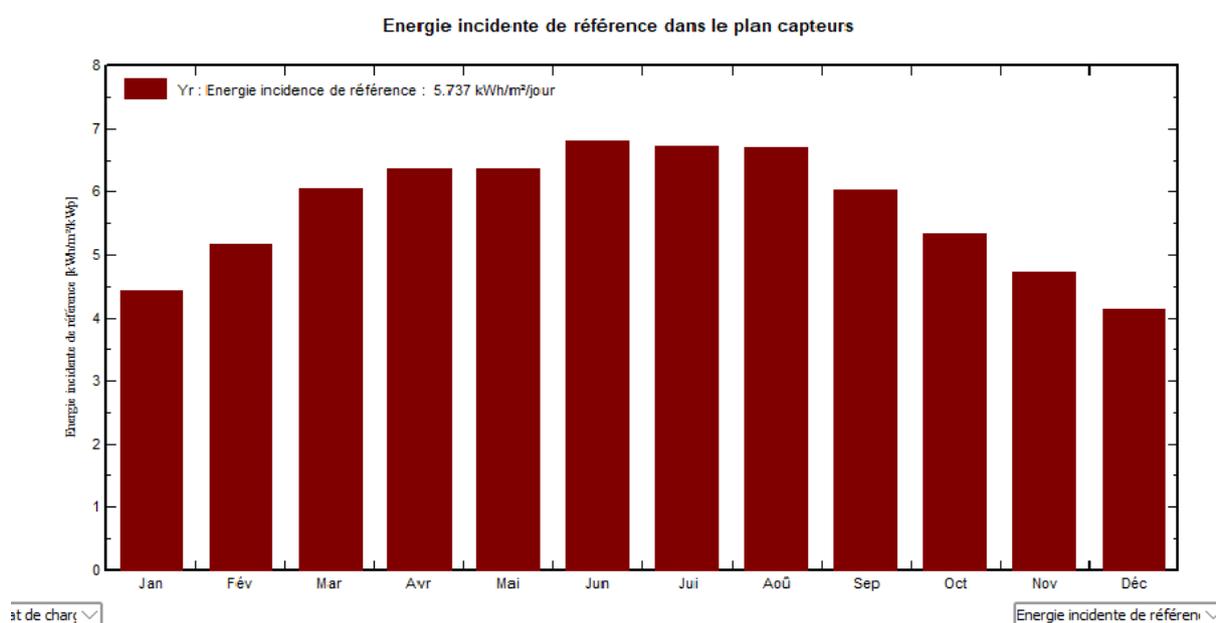


Figure 4-14 Energie solaire disponible.

4.3.4 Schéma Entrée/Sortie

Le diagramme d'entrée/sortie illustre la production du système en fonction de l'irradiation reçue. Idéalement, l'absorption photovoltaïque devrait augmenter de manière linéaire avec l'irradiation, démontrant une utilisation optimale des panneaux solaires. Le diagramme d'entrée/sortie aide à comprendre le fonctionnement du système et à identifier rapidement les jours où l'efficacité est moindre. Un graphique d'entrée/sortie solide suggère une bonne absorption de l'énergie solaire, indiquant ainsi une efficacité optimale du module. L'axe horizontal représente le rayonnement global incident par mètre carré par jour (kWh/m²/jour), tandis que l'axe vertical indique l'énergie injectée dans notre bateau (kWh/jour). Chaque point du diagramme, soit 365 points au total, correspond à la moyenne d'irradiation quotidienne et à l'absorption correspondante par le système.

Le schéma d'entrée/sortie du système montre une efficacité globale élevée, comme le démontre la majorité des points alignés le long d'une même ligne, indiquant une relation linéaire entre l'irradiation reçue et l'énergie produite. Cela suggère que le système photovoltaïque fonctionne de manière optimale la plupart du temps, utilisant efficacement l'irradiation solaire disponible.

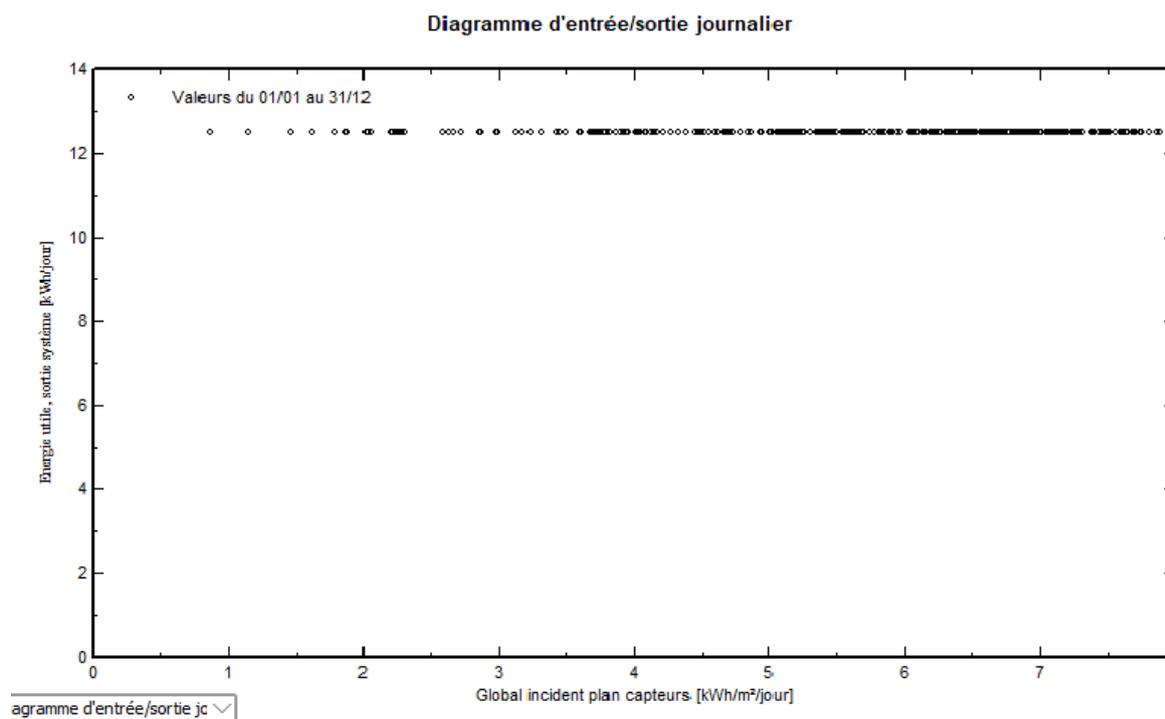


Figure 4-15 Schéma d'entrée / sortie journalier.

4.3.5 Diagramme des pertes

Concernant les pertes, les valeurs par défaut sont appliquées dans la simulation, incluant les pertes des onduleurs, des modules photovoltaïques et d'autres composants du système. Cependant, il est possible d'ajouter d'autres types de pertes. Par exemple, les pertes dues à la désadaptation causée par une configuration non uniforme de la matrice, ainsi que des pertes de câblage supplémentaires. Toutefois, il a été décidé d'utiliser les pertes par défaut, car les recherches montrent qu'elles sont soigneusement sélectionnées et réalistes, en plus de ne pas être influencées par l'ombre.

Le diagramme de la figure "4-16" présente les pertes, montrant les énergies à différents niveaux du système, avec une évaluation des pertes à chaque étape.

Diagramme des pertes pour "Nouvelle variante de simulation" - année

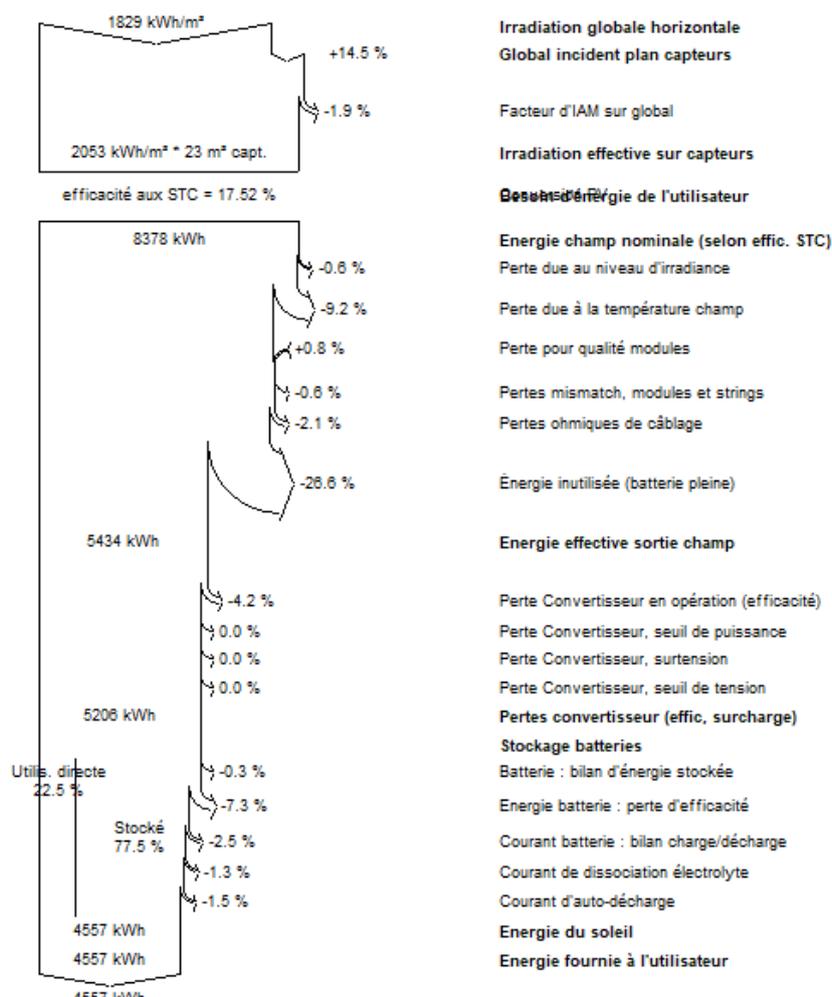


Figure 4-16 Diagramme des pertes.

En examinant la figure "4-16", nous constatons qu'il existe de nombreuses façons d'analyser les pertes des systèmes photovoltaïques. Par exemple, nous pouvons considérer l'énergie totale atteignant les modules photovoltaïques, ou choisir de ne pas tenir compte de l'efficacité des modules. Inclure les pertes dues à l'inefficacité des modules n'est pas une pratique courante, car les modules photovoltaïques ont généralement un faible rendement.

4.3.6 Production normalisée

La production normalisée est illustrée dans la figure ci-dessous :

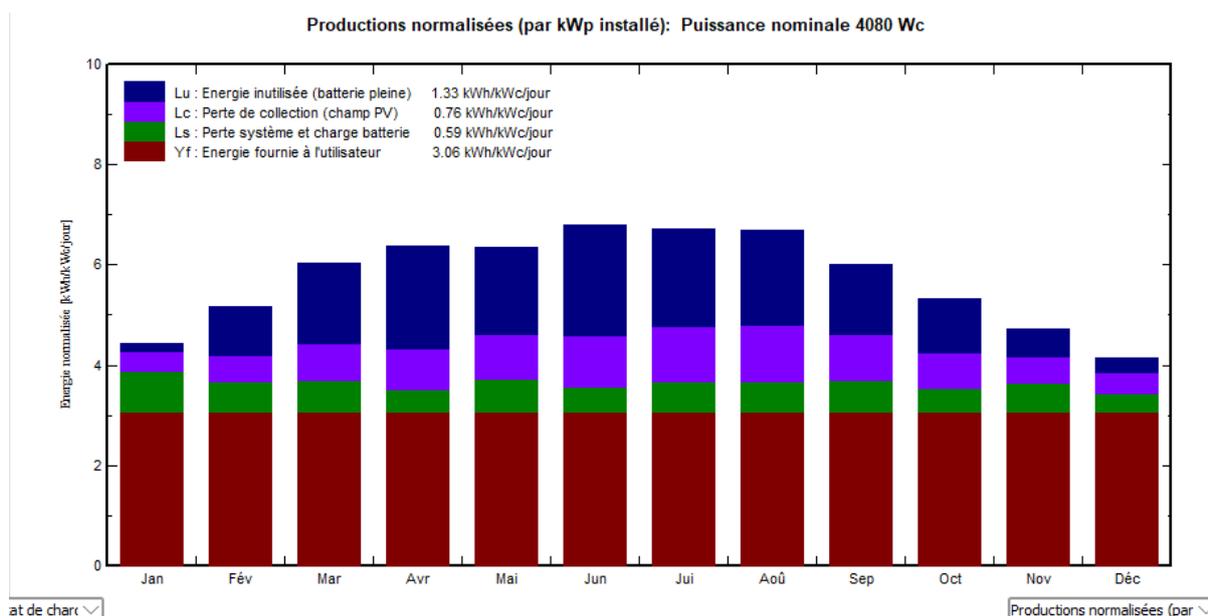


Figure 4-17 Diagramme de la production normalisée.

La figure "4-17" illustre l'énergie produite par l'installation photovoltaïque au cours de l'année, mois par mois. On observe que la production d'énergie est maximale durant la période estivale (juin-juillet-août) et minimale en décembre.

- Les pertes Lc sont évaluées à 0.76 kWh/kWc/jour.
- Ces pertes incluent les inefficacités dans le champ photovoltaïque, telles que les pertes dues à la température, les désadaptations de module, et d'autres inefficacités systémiques.
- Pendant les mois d'été et de printemps, l'énergie produite par le champ PV est suffisante pour répondre à la demande, ce qui réduit l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries.
- En hiver, la production d'énergie solaire diminue, augmentant la dépendance à l'énergie stockée dans les batteries pour combler le déficit. Cela entraîne une utilisation accrue de l'énergie de la batterie pendant ces mois.

Il est crucial de considérer les variations saisonnières dans la production d'énergie solaire pour optimiser l'utilisation des batteries et minimiser les pertes. Pendant les mois où la production est élevée, il peut être bénéfique de maximiser le stockage d'énergie pour utilisation ultérieure durant les périodes de faible production.

Réduire les pertes L_c peut améliorer l'efficacité globale du système. Cela peut être accompli par la maintenance régulière des panneaux PV, l'utilisation de technologies de suivi solaire pour optimiser l'angle d'incidence, et l'amélioration des conditions thermiques pour minimiser les pertes de chaleur.

4.3.7 Bilans et résultats principaux

Le tableau suivant résume le bilan de l'énergie reçu et délivrée par l'installation durant une année :

Tableau 8 Bilan énergétique.

Balances and main results								
	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
January	88.4	135.6	490.7	20.3	0.000	387.0	387.0	1.000
February	103.9	142.5	511.6	111.2	0.000	349.6	349.6	1.000
March	154.9	183.9	653.8	204.5	0.000	387.0	387.0	1.000
April	179.4	186.9	662.3	249.4	0.000	374.5	374.5	1.000
May	204.8	192.5	672.8	220.9	0.000	387.0	387.0	1.000
June	220.0	199.3	688.7	269.9	0.000	374.5	374.5	1.000
July	219.1	203.7	691.5	245.7	0.000	387.0	387.0	1.000
August	201.6	203.4	687.4	240.6	0.000	387.0	387.0	1.000
September	157.8	177.0	606.4	171.7	0.000	374.5	374.5	1.000
October	126.2	162.6	565.7	137.1	0.000	387.0	387.0	1.000
November	93.3	139.3	495.0	66.0	0.000	374.5	374.5	1.000
December	79.4	126.7	453.9	36.3	0.000	387.0	387.0	1.000
Year	1828.9	2053.3	7179.7	1973.6	0.000	4556.8	4556.8	1.000

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

E_Avail Available Solar Energy

EUnused Unused energy (battery full)

E_Miss Missing energy

E_User Energy supplied to the user

E_Load Energy need of the user (Load)

SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

D'après le tableau 8 des bilans et les résultats, nous enregistrons une énergie solaire disponible totale de 7179.7 kWh.

L'énergie transmise aux consommateurs, estimée à 4556.8 kWh par an, est suffisante pour couvrir les besoins énergétiques de notre bateau. Cela démontre l'efficacité et la capacité du système photovoltaïque à répondre aux exigences énergétiques du navire.

Les données montrent l'importance de considérer non seulement le rayonnement solaire, mais aussi d'autres facteurs tels que la performance des panneaux et les conditions opérationnelles pour optimiser la production d'énergie.

En conclusion, ces résultats soulignent la fiabilité et l'efficacité du système photovoltaïque pour satisfaire les besoins énergétiques du bateau, tout en mettant en évidence les variations mensuelles de la production d'énergie en fonction des conditions climatiques et saisonnières.

4.4 Emissions du CO2

La figure "4-18" montre que l'intégration des panneaux photovoltaïques dans les systèmes énergétiques est souvent perçue comme une solution sans émissions directes de gaz à effet de serre durant la production d'électricité.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	0	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

Figure 4-18 Les émissions.

4.5 Etude économique

Dans le contexte de la transition énergétique, l'utilisation de panneaux photovoltaïques (PV) pour alimenter les équipements des navires représente une alternative durable aux sources d'énergie traditionnelles. Cette étude économique évalue les coûts et les avantages d'un système comprenant des panneaux PV, des onduleurs et des batteries. L'objectif est de déterminer la viabilité économique de cette solution en analysant les coûts d'installation et d'entretien ainsi que les économies potentielles à long terme grâce à la réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂.

Le système étudié comprend les principaux composants suivants :

- 12 Panneaux photovoltaïques (PV)
- 1 Onduleurs
- 32 Batteries

- **Analyse des Coûts**

Le tableau ci-dessous présente les prix unitaires des principaux composants du système :

Tableau 9 Prix unitaire et total des principaux composants du système.

Composant	Prix unitaire en DA	Total en DA
Panneau photovoltaïque	30,000	360,000
Batterie	50,000	1,600,000
Onduleur	90,000	90,000

Le cout total de l'installation est estimé à **2,050,000 DA**.

L'alimentation électrique d'un port en Algérie se ferait probablement à un niveau de tension moyenne, comme 20 kV ou 63 kV, en se raccordant au réseau moyenne tension le plus proche [50].

Le prix de l'électricité à un niveau de tension moyenne est évalué à 38,7 DA par kWh en raison de la forte consommation [51].

Calcul du retour sur investissement (ROI) de notre système photovoltaïque :

1. **Investissement initial** : L'installation du système coûte **2,050,000DA**.
2. **Production annuelle d'énergie (E)** : 7654 kWh par an.
3. **Coût de l'énergie (C_e)** : Coût de l'énergie par kWh en dinars algériens est évalué à 38,7 DA pour les ports.
4. **Économies annuelles (S)** : $S = E \times C_e = 7654 \times 38,7 = 296,209DA$

Calcul du retour sur investissement (ROI) : $ROI = \text{Investissement initial} / \text{Économies annuelles}$

$$ROI = 2,050,000DA / 296,209DA = 6.92 \text{ ans}$$

Cette étude économique a permis de démontrer que l'adoption de systèmes photovoltaïques pour l'alimentation des équipements de navires peut constituer une solution durable et économiquement avantageuse. Les résultats montrent que, malgré les coûts initiaux d'installation, les économies réalisées sur le long terme et la réduction des émissions de CO₂ font de cette solution une option viable et bénéfique pour le secteur maritime.

4.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons exploré les fonctionnalités complémentaires des logiciels HOMER Pro et PVsyst pour dimensionner un système hybride à énergie renouvelable pour alimenter les équipements électriques d'un navire. L'utilisation conjointe de ces deux logiciels

nous a permis d'obtenir une vision détaillée de la production globale d'énergie solaire et des spécifications précises concernant les batteries nécessaires. Les résultats obtenus ont mis en lumière la viabilité et l'efficacité de l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques du navire, tout en contribuant à la réduction des émissions de carbone et des coûts opérationnels. Cette approche de dimensionnement hybride offre une perspective prometteuse pour une navigation maritime plus respectueuse de l'environnement et économiquement viable.

Conclusion générale

Conclusion générale

La conclusion de cette étude offre l'opportunité de consolider les éléments fondamentaux explorés tout au long de notre recherche, tout en évaluant les implications pratiques de nos découvertes et en proposant des recommandations éclairées pour l'avenir. Premièrement, notre travail a clairement mis en lumière l'essor croissant de l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur maritime. Parmi ces sources d'énergie alternatives, les panneaux photovoltaïques ont émergé comme une solution prometteuse pour résoudre les défis liés à l'alimentation des équipements électriques des navires, tels que les treuils, les réfrigérateurs, les lampes, et autres appareils électroniques. En fournissant une source d'énergie propre, abondante et renouvelable, ils ouvrent la voie à une navigation maritime plus respectueuse de l'environnement.

L'examen approfondi des résultats de notre simulation a révélé que l'intégration des panneaux photovoltaïques pour alimenter ces équipements électriques peut apporter des avantages significatifs. En contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la promotion d'une navigation maritime plus durable, ces résultats soulignent l'importance cruciale de poursuivre les efforts de recherche et développement dans ce domaine.

Nos résultats indiquent qu'il est nécessaire d'installer 12 panneaux photovoltaïques de 340W chacun, ainsi que 32 batteries de 296Ah pour alimenter efficacement les équipements électriques d'un navire. Cette configuration a démontré une capacité suffisante pour fournir une alimentation stable et continue, même dans des conditions de fonctionnement variables.

Pour garantir une intégration réussie des énergies renouvelables dans l'alimentation des équipements électriques des navires, il est impératif de prendre en compte une gamme de facteurs. Ces derniers incluent la conception du système, la disponibilité des ressources solaires, les conditions météorologiques, et les contraintes opérationnelles spécifiques à chaque navire. En outre, des mesures incitatives et des politiques favorables peuvent jouer un rôle essentiel dans la promotion de l'adoption généralisée des énergies renouvelables dans le secteur maritime.

En somme, notre recherche met en évidence le potentiel considérable des énergies renouvelables, en particulier des panneaux photovoltaïques, pour façonner l'avenir de la navigation maritime vers un horizon plus durable et respectueux de l'environnement. En poursuivant l'exploration et le développement de ces solutions novatrices, et en encourageant une collaboration étroite entre les différents acteurs de l'industrie maritime, nous pouvons

Conclusion générale

concrétiser une vision collective d'un avenir maritime plus propre et plus durable pour les générations futures.

Bibliographie

- [1] "*Construction de bateaux de pêche : Appel au strict respect de la sécurité*" par EL MOUDJAHID
- [2] Eyres, D. J. (2007). *Ship construction*. Oxford, Royaume-Uni : Butterworth-Heinemann.
- [3] Guy Bolduc. (2019). "*Match comparatif intéressant entre trois bateaux européens*"
- [4] Pallas, J. L. (2006). *Outboard Motors Maintenance and Repair Manual*.
- [5] Hussein, R. Mémoire d'ingénieur, "*Caractéristiques des systèmes de propulsion en bord pour les grands bateaux*".
- [6] Taher Jaziri. (2023). "*Quelle différence entre un moteur de bateau In-bord et hors-bord ?*"
- [7] Vincent, F. (2015). *Les embarcations maritimes : Classification et Utilisation*. Marseille, France : Presses Universitaires Maritimes.
- [8] Solène, canal reporter. (2018). "*Osez la croisière en voilier !*"
- [9] Arthur Devriendt. (2022) "*Amphitrite fusionne les données satellite et ouvre la voie au routage intelligent des navires*"
- [10] J.Guivarchi, Defense zone. (2023) "*Les plus grandes marines du monde*"
- [11] U.S. Coast Guard. (2006) - "*A diesel engine being lifted into the USCGC Bertholf, built at the Northrop Grumman Ship Systems (NGSS) Ingalls Operations in Pascagoula*"
- [12] Rama, Wikipedia. (2005) "*Turbine haute pression Sulzer*"
- [13] "*Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*" par Doug Woodyard
- [14] : "*Modélisation et Simulation d'un système de distribution d'énergie du type diesel-électrique pour un navire marchand*" par Kaouter EL JAMALI
- [15] Bosch, K., et al. (2019). "*Hybrid Propulsion Solutions for Ships*". In Proceedings of the International Conference on Marine Engineering and Technology.
- [16] International Maritime Organization. "*Guidelines for the Use of Hybrid Systems in Ships*." IMO, 2014
- [17] Brekke, Christen B., et al. "*Technical and economic potential of solar energy use in maritime applications*." Solar Energy 159 (2018): 402-410.
- [18] Baarholm, Roar, et al. "*Optimization of energy management for a marine hybrid power system*." IEEE Transactions on Sustainable Energy 6.1 (2015): 198-206.

Bibliographie

- [19] Papadimitriou, Costas, et al. "*Hybrid Power Systems for Sustainable Ship Propulsion.*" *Energies* 13.2 (2020): 292.
- [20] Stopford, Martin. "*Maritime Economics.*" Routledge, 2009.
- [21] International Maritime Organization (IMO). "*International Shipping Facts and Figures – Information Resources on Trade, Safety, Security, Environment.*" IMO, 2020.
- [22] International Chamber of Shipping. "*Shipping and World Trade: The Essential Connection.*" ICS, 2019.
- [23] Kizielewicz, B., & Lukowska-Matuszewska, K. "*Renewable Energy Solutions on Ships.*" Polish Maritime Research, 2020.
- [24] BADILLO, A. "‘Quelles sont les 5 sources d’énergies renouvelables (EnR) ?’" 2023
- [25] "*Empreinte environnementale des énergies renouvelables*" par Isabelle Blanc et Catherine Guermont
- [26] Zouaoui Hayet, "*Impact des conditions météorologiques sur le rendement d’un panneau solaire PV*", MEMOIRE, Faculté des sciences Exactes et Sciences de la Nature et de La Vie , Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2020.
- [27] Université Alioune DIOP de Bambey. (2015). "*Chapitre 5: Capteurs solaires photovoltaïques*"
- [28] F. Lasnier, T. G. Ang, "*Photovoltaic Engineering Handbook*", IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [29] Glodi Mbwama Binamen. (2019). "*Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour l'alimentation d'un quartier résidentiel*"
- [30] B. RAZIKA, HAMZA CHERIF NADIR "*Proposition d’un système de détection des pannes des cages flottantes*", École supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, 2023.
- [31] ASKRI Abdallah, SOUDA El Mekki, KHEMICI Ahmed "*Étude de Défaits et Défaillances sur les Panneaux Photovoltaïques et leur Maintenance*" Université Echahid Hamma Lakhdar- El Oued
- [32] BERREGUI ABDELFETTAH, "*Etude technicoéconomique d’une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla*", UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.

Bibliographie

- [33] "Quelle est la durée de vie d'un panneau solaire et photovoltaïque ?" par La Maison Saint-Gobain
- [34] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, "Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques", université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [35] Parretta, A., et al. 2019. "Performance of Photovoltaic Systems in Marine Environments. Renewable Energy".
- [36] Emma ROBIC. (2024). "Le démantèlement et le recyclage des panneaux solaires"
- [37] "Amortisseur pour panneau solaire" par DGIT
- [38] "Panneau solaire souple sur bimini" par HISSE ET OH
- [39] AMMARI Chouaib "Modélisation, simulation et optimisation d'un system hybride autonome en trois sources, Thèse de Doctorat en physique énergétique", Université Ahmed Draia Adrar, Faculté des Sciences et de la technologie, Département d'hydrocarbures et énergies renouvelables.
- [40] MEBROUKI Abdallah et DJAAFRI Abdelkrim "Etude d'un système Hybride cas des Centrales KABERTENE", Mémoire de MASTER en Physique énergétique, Université d'Adrar, Faculté des sciences de la matière, Département sciences de la matière.
- [41] M. KARA Abdelfattah "Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie", Mémoire de Master, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1, Faculté de Technologie Département
- [42] Semantic Scholar. (2011). "Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls"
- [43] Tammam Basbous, " Etude de faisabilité d'un jumelage éolien — diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé", Mémoire de Recherche, Université Du Québec à Rimouski, Février 2009.
- [44] Loumi Maya, Hamitouche Salma, " Étude et simulation d'un jumelage éolien-diesel sous HOMER", Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.
- [45] BOUKHLIFA Hamza "Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw", Mémoire de Master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique.

Bibliographie

- [46] DEGLA Mohammed et LARBI Ben Ahmed Bachir "*Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque*", mémoire de Master en Sciences, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication, Département d'Electronique et des Télécommunications.
- [47] AMAROUAYACHE Mohamed "*Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque*", Thèse de Doctorat en Sciences, Université CONSTANTINE 1, Faculté DES SCIENCES de Technologie Département d'Electrotechnique.
- [48] DAHMANI Chawqi "*Etude et conception d'une installation photovoltaïque à l'aide du logiciel PVSYST*", MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Faculté de Technologie, Département d'Electronique.
- [49] BOUTLILIS Fatima "*Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique*", Thèse de Doctorat EN GENIE ELECTRIQUE, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie UNITE DE RECHERCHE ENERGIES RENOUVELABLES.
- [50] Boukadoum Aziz, "*Support de Cours réseaux électriques*", Faculté des sciences et de la technologie, Université echahid cheikh Larbi Tebessi – tébessa, 2021.
- [51] Sonelgaz, "*04-Coût des facteurs de l'Algérie - AAPI*", Agence Algérienne de Promotion de l'Investissement.