

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 de master

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

Présenté par : MERAH Mouad & MESSAOUDI Abdenour

Thème

**Proposition d'un modèle de bateau
alimenté par énergie renouvelable**

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

En signe de reconnaissance, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de mon stage de fin d'études et à l'élaboration de ce modeste travail. Mes remerciements les plus chaleureux vont à l'encadrante Madame Faradji Djamila pour la qualité de son enseignement, ses conseils avisés, et son intérêt inébranlable pour tous les étudiants. Je suis également reconnaissant envers la co-encadrante Madame Amina Ghomri pour son soutien précieux. Je suis également reconnaissant envers les membres du jury, à savoir Madame Nadia Benahmed, Monsieur Mohamed Mebrouki, et Monsieur Abdelkrim Chemidi, pour l'attention particulière qu'ils ont portée à ce travail. Ma gratitude s'étend également à tout le personnel de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, pour leur engagement envers une formation de qualité. Je souhaite également remercier tout le personnel de la Société de Gestion des Ports de Pêche pour leur patience, leurs conseils avisés, et leur intérêt constant pour mes travaux. Enfin, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes, dont je ne peux pas citer tous les noms, qui ont contribué par leurs conseils et leur expertise à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

A ma mère et mon père,

*Pour l'éducation qu'ils m'ont offert avec tous les moyens et au
prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour
le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance.*

*A mes chères sœurs A tous mes amis et collègues que j'ai pu
connaître depuis mon enfance*

*A tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon
parcours*

A tous ceux qui m'aiment, A tous ceux que j'aime

Je vous dédie ce modeste travail.

Merah Mouad

Dédicace

À mes chers parents,

*En témoignage de ma gratitude, si grande qu'elle puisse être,
pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon bien être et
le soutien qu'ils m'ont prodigué tout le long de mon éducation.*

*Que dieu, le tout puissant, les préserve et les procure santé et
longue vie.*

À mes frères et ma sœur,

*Pour leur encouragement et leur bonté qu'ils m'ont accordé,
j'exprime ma profonde reconnaissance et mon grand respect.*

À toute ma famille,

*mes amis et tous ceux que j'aime. Je dédie ce travail, expression
de mon grand amour avec tous mes vœux de bonheur et de
prospérité.*

Messaoudi Abdenour

Résumé

Dans notre étude, nous avons proposé un modèle de bateau utilisant un moteur hybride (diesel-électrique) avec une architecture parallèle. Le moteur électrique est alimenté par des batteries, rechargeables à partir d'un réseau électrique et de panneaux photovoltaïques. Cette configuration vise à réduire les émissions de CO2 et à améliorer l'efficacité énergétique. Le logiciel HOMER PRO a été utilisé pour simuler et optimiser ce système hybride, mettant en lumière les avantages environnementaux et opérationnels de cette technologie.

Mots-clés : propulsion navale, énergie renouvelable, simulation énergétique, durabilité, gestion des ressources

Summary :

In our study, we proposed a boat model using a hybrid (diesel-electric) engine with a parallel architecture. The electric motor is powered by batteries, rechargeable from an electrical grid and photovoltaic panels. This configuration aims to reduce CO2 emissions and improve energy efficiency. The HOMER PRO software was used to simulate and optimize this hybrid system, highlighting the environmental and operational benefits of this technology.

Keywords : naval propulsion, renewable energy, energy simulation, sustainability, resource management

ملخص

في دراستنا، قمنا باقتراح نموذج لقارب يستخدم محركاً هجيناً (ديزل-كهربائي) مع بنية موازية. يتم تشغيل المحرك الكهربائي بواسطة بطاريات قابلة لإعادة الشحن من شبكة الكهرباء والألواح الضوئية. تهدف هذه التكوينات إلى تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتحسين كفاءة الطاقة. تم استخدام برنامج هومر برو لمحاكاة وتحسين هذا النظام الهجين، مما يبرز الفوائد البيئية والتشغيلية لهذه التكنولوجيا.

الكلمات الرئيسية: دفع بحري، طاقة متجددة، محاكاة طاقة، استدامة، إدارة الموارد

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 Généralités sur les énergies renouvelables	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Les sources des énergies	4
1.2.1 Energie éolienne	4
1.2.2 Energie biomasse.....	5
1.2.3 Energie thermique	6
1.2.4 Energie nucléaire	7
1.2.5 L'énergie géothermique :.....	8
1.2.6 Energie hydraulique.....	9
1.2.7 Energie solaire	10
1.3 L'énergie photovoltaïque.....	10
1.3.1 Définition de l'énergie photovoltaïque	10
1.3.2 Effet photovoltaïque.....	10
1.3.3 Cellule.....	11
1.4 Système photovoltaïque.....	12
1.4.1 Types des systèmes photovoltaïques	14
1.4.2 Avantages des systèmes photovoltaïques	14
1.4.3 Inconvénients des systèmes photovoltaïques	15
1.5 Problématique de l'humidité et de l'eau salée pour les panneaux photovoltaïques	16
1.6 Conclusion	19
2 Choix du système hybride et fonctionnalités du moteur	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 La problématique de la propulsion navale	21
2.3 Types des navires	22
2.4 Types des moteurs utilisés dans la propulsion des navires.....	25
2.4.1 Moteur diesel	25
2.4.2 Moteur à combustion	25
2.4.3 Moteur électrique.....	26
2.4.4 Moteur hybride	27
2.5 Définition de l'hybridation.....	27
2.6 Utilité de l'hybridation.....	28
2.7 Navires hybrides	28
2.8 Fonctionnement d'un moteur hybride	29

2.9	Différentes structures des systèmes hybrides	30
2.10	Hybridation d'une propulsion	32
2.11	Critères de Sélection d'un Système Hybride	32
2.12	Impacts environnementaux des moteurs hybrides	34
2.12.1	Avantages des moteurs hybrides.....	34
2.12.2	Inconvénients des moteurs hybrides	34
2.13	Conclusion	35
3	Simulation du système hybride	37
3.1	Description d'un modèle d'un bateau	37
3.2	Présentation du logiciel HOMER PRO	37
3.2.1	Définition du logiciel HOMER PRO.....	38
3.2.2	Fonctionnement du logiciel HOMER PRO	39
3.2.3	Méthode générale d'utilisation HOMER PRO	40
3.2.4	Méthodologies spécifiques aux simulations	43
3.2.5	Sorties.....	44
3.2.6	Fonctionnement	44
3.3	Simulation de notre travail	45
3.3.1	Architecture du système.....	48
3.3.2	Configuration du générateur diesel	48
3.3.3	Configuration des panneaux photovoltaïques	49
3.3.4	Configuration des batteries	50
3.3.5	Configuration du convertisseur	50
3.3.6	Configuration du réseau	51
3.4	Résultats et interprétations.....	51
3.4.1	La production du panneau photovoltaïque et la consommation du système.....	52
3.4.2	Puissance d'entrée et sortie du convertisseur	53
3.4.3	Résultats concernant les batteries.....	54
3.4.4	Production du champ photovoltaïque	55
3.4.5	Résultats concernant le réseau.....	56
3.4.6	Résultats concernant les émissions du CO2.....	57
3.4.7	Etude économique.....	58
	Conclusion générale.....	61

Liste des figures

Figure 1-1 Energie éolienne	5
Figure 1-2 Centrale biomasse	6
Figure 1-3 Centrale thermique	7
Figure 1-4 Centrale nucléaire	8
Figure 1-5 Centrale géothermique	9
Figure 1-6 Centrale hydroélectrique	9
Figure 1-7 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	11
Figure 1-8 Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque	12
Figure 1-9 Les composants d'un système photovoltaïques.	13
Figure 1-10 Composition d'un module photovoltaïque	16
Figure 1-11 Système de montage	18
Figure 1-12 Panneaux solaires flexibles	19
Figure 2-1 Voiliers	22
Figure 2-2 Navire de fret.....	23
Figure 2-3 Bâtiments de guerre	24
Figure 2-4 Yachts	24
Figure 2-5 L'installation d'un moteur diesel dans un navire	25
Figure 2-6 Turbine à gaz utilisée dans la propulsion d'un navire	26
Figure 2-7 Fonctionnement d'un moteur hybride	30
Figure 2-8 Architecture série.....	30
Figure 2-9 Architecture parallèle	31
Figure 2-10 Le navire de croisière « MS Roald Amundsen »	33
Figure 3-1 Modèle conceptuel du logiciel HOMER.	39
Figure 3-2 L'interface de logiciel HOMER Pro.	41
Figure 3-3 Les équipements.....	42
Figure 3-4 Le schéma de système.	42
Figure 3-5 Les ressources.....	42
Figure 3-6 Rayonnement solaire mensuel à Ghazaouet.....	46
Figure 3-7 Profil annuelle de la charge (moteur électrique)	46
Figure 3-8 Profil quotidien de la charge	47
Figure 3-9 Schéma du système hybride	48

Figure 3-10 Charge alimenté par générateur diesel.....	49
Figure 3-11 Détails du panneau photovoltaïque choisi	50
Figure 3-12 Détails de la batterie	50
Figure 3-13 Détails du convertisseur.....	51
Figure 3-14 Détails du réseau	51
Figure 3-15 Nombre de solution simulé	52
Figure 3-16 Les solutions optimales	52
Figure 3-17 La production électrique totale.....	53
Figure 3-18 Energie et consommation du système	53
Figure 3-19 Puissance entrée/sortie du convertisseur.....	54
Figure 3-20 Etat de charge des batteries	55
Figure 3-21 Production du champ photovoltaïque	56
Figure 3-22 Bilan énergétique du réseau	57
Figure 3-23 Les émissions CO2 du système.....	57
Figure 3-24 Résultats économiques avec HOMER Pro	59

Liste des tableaux

Tableau 1	Avantage et inconvénient de l'architecture hybride.....	31
Tableau 2	Paramètres pour le choix de logiciel HOMER Pro.	38
Tableau 3	Caractéristiques du générateur diesel	48
Tableau 4	Prix unitaire et total des principaux composants	58

Introduction générale

Introduction générale

La navigation maritime, en tant que pilier du commerce mondial et du transport de passagers, est confrontée à d'importants défis environnementaux. Les émissions de gaz à effet de serre, la pollution atmosphérique et la dégradation des écosystèmes marins exigent une transition vers des solutions de propulsion plus respectueuses de l'environnement et durables à long terme.

Dans ce contexte, l'intégration de systèmes de propulsion hybride, combinant des sources d'énergie traditionnelles et renouvelables, apparaît comme une stratégie prometteuse pour répondre à ces enjeux tout en garantissant la continuité des activités maritimes essentielles.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'efficacité d'un système de propulsion hybride intégrant des panneaux photovoltaïques pour les navires. En introduisant l'énergie solaire dans le processus de propulsion, cette approche vise à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre, à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques et à favoriser une navigation maritime plus respectueuse de l'environnement et durable sur le long terme.

Le plan de ce mémoire est structuré autour de trois axes principaux. Dans un premier temps, le chapitre 1 abordera les généralités concernant les panneaux photovoltaïques. Nous explorerons en détail les principes de fonctionnement de ces panneaux, leurs avantages et inconvénients dans le contexte de la propulsion navale, ainsi que leurs applications spécifiques dans le secteur maritime, notamment en termes de production d'énergie à bord des navires.

Ensuite, le chapitre 2 se focalisera sur le choix du système hybride et les fonctionnalités du moteur. Nous présenterons une analyse approfondie des différents types de navires et de moteurs utilisés dans le secteur maritime, en mettant particulièrement l'accent sur les moteurs hybrides (diesel-électrique) et leurs avantages spécifiques. Nous discuterons également des critères de sélection pour choisir un système de propulsion hybride adapté aux besoins du navire, en tenant compte des contraintes opérationnelles et environnementales.

Enfin, le chapitre 3 sera dédié à la simulation des résultats et à la discussion. Nous introduirons la méthodologie de simulation utilisée, en mettant en lumière les paramètres pris en compte dans l'analyse. Nous examinerons ensuite en détail les résultats de la simulation, en nous intéressant notamment à l'efficacité énergétique, à l'autonomie du navire et aux émissions de CO₂ évitées grâce à l'utilisation du système de propulsion hybride. Enfin, nous engagerons une discussion approfondie sur ces résultats, les comparerons avec d'autres solutions de propulsion

Introduction générale

existantes et formulerons des propositions d'amélioration du système afin d'optimiser encore davantage son efficacité et son impact environnemental positif.

En conclusion, cette recherche mettra en évidence l'importance cruciale des simulations pour évaluer et optimiser les systèmes de propulsion hybride dans le contexte maritime. Elle soulignera les avantages indéniables de cette approche tout en identifiant les défis à relever pour une adoption plus large de ces technologies dans l'industrie maritime. En appelant à une collaboration accrue entre les acteurs de l'industrie maritime et les organismes de recherche, cette étude aspire à favoriser l'adoption de solutions plus durables et respectueuses de l'environnement, contribuant ainsi à préserver les écosystèmes marins et à assurer un avenir plus durable pour la navigation maritime.

*Chapitre 1 : Généralités sur les
panneaux photovoltaïques*

1 Généralités sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont essentielles pour un futur énergétique durable, en particulier face aux défis du changement climatique et de l'épuisement des ressources fossiles. Ce chapitre, intitulé "Généralités sur les énergies renouvelables", offre une introduction aux principales sources d'énergie renouvelable et à leurs avantages.

Les énergies renouvelables, telles que le solaire, l'éolien, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie, se caractérisent par leur capacité à se régénérer naturellement. Contrairement aux énergies fossiles, elles sont non polluantes et disponibles en abondance. Intégrer ces sources d'énergie dans notre mix énergétique est crucial pour réduire notre empreinte carbone et répondre aux besoins croissants de manière durable.

Ce chapitre explore les principes de base de chaque source d'énergie renouvelable et leurs bénéfices environnementaux et économiques. En offrant une vue d'ensemble des énergies renouvelables, ce chapitre souligne leur importance pour un avenir énergétique plus résilient et écologique.

1.2 Les sources des énergies

1.2.1 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source renouvelable, non polluante et répartie géographiquement. Elle est également en phase avec les saisons : la demande en électricité augmente en hiver, période où les vents sont généralement plus forts. Cette énergie n'entraîne ni émissions dans l'atmosphère ni production de déchets radioactifs. Cependant, sa disponibilité est imprévisible et sa collecte est complexe, nécessitant l'installation de grandes structures, telles que des mâts et des pales pouvant atteindre 60 mètres de hauteur pour des éoliennes de plusieurs mégawatts, dans des zones dégagées afin de réduire les effets de turbulence [1].

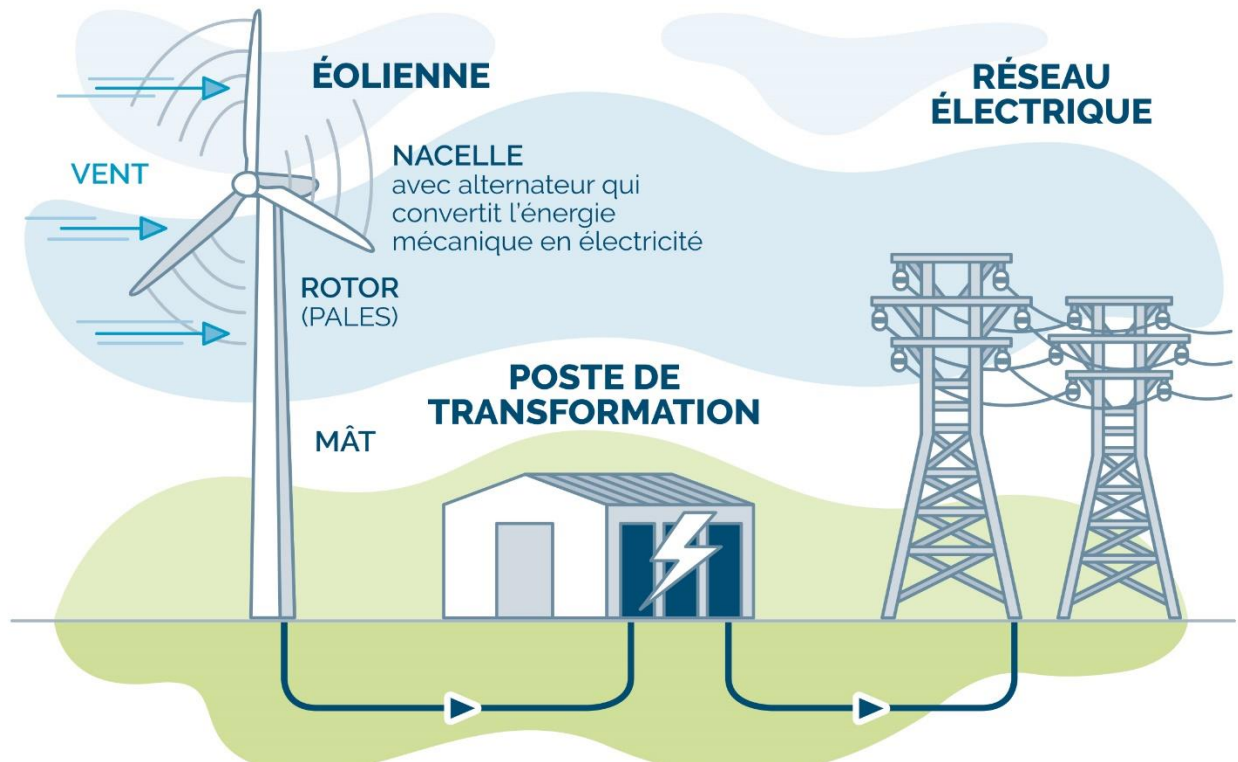


Figure 1-1 Energie éolienne [2].

1.2.2 Energie biomasse

La biomasse est constituée de matières organiques d'origine végétale (y compris les microalgues), animale, bactérienne ou fongique (champignons), qui peuvent être utilisées comme sources d'énergie (bioénergies). Cette énergie peut être obtenue par combustion directe (par exemple, l'énergie issue du bois) ou par combustion après un processus de transformation de la matière première, comme la méthanisation (biogaz ou biométhane épuré) ou d'autres transformations chimiques (telles que la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale et les méthodes de production de biocarburants ou « agrocarburants »). Il existe trois modes de valorisation de la biomasse : thermique, chimique et biochimique [1].

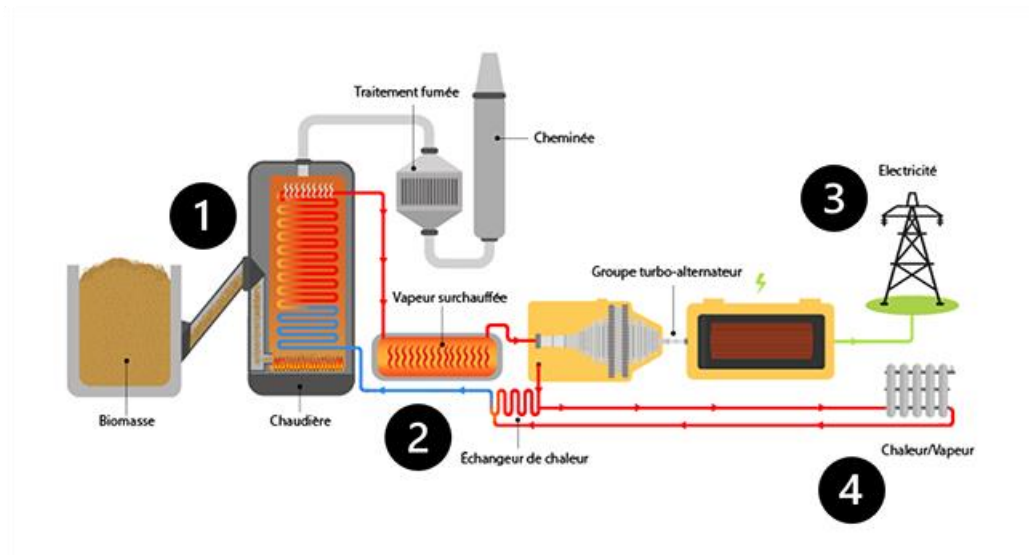


Figure 1-2 Centrale biomasse [3].

1.2.3 Energie thermique

L'énergie thermique peut être exploitée pour produire de l'électricité grâce à diverses technologies, notamment les centrales thermiques à combustibles fossiles, les centrales nucléaires et les centrales géothermiques.

- **Les centrales thermiques à combustibles** : Ces installations produisent de l'électricité en utilisant la chaleur générée par la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. La chaleur produite chauffe de l'eau, créant de la vapeur qui fait tourner une turbine pour générer de l'électricité. Bien que ces centrales soient une source majeure d'électricité dans de nombreux pays, elles sont souvent critiquées pour leur impact environnemental négatif, notamment les émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'air.

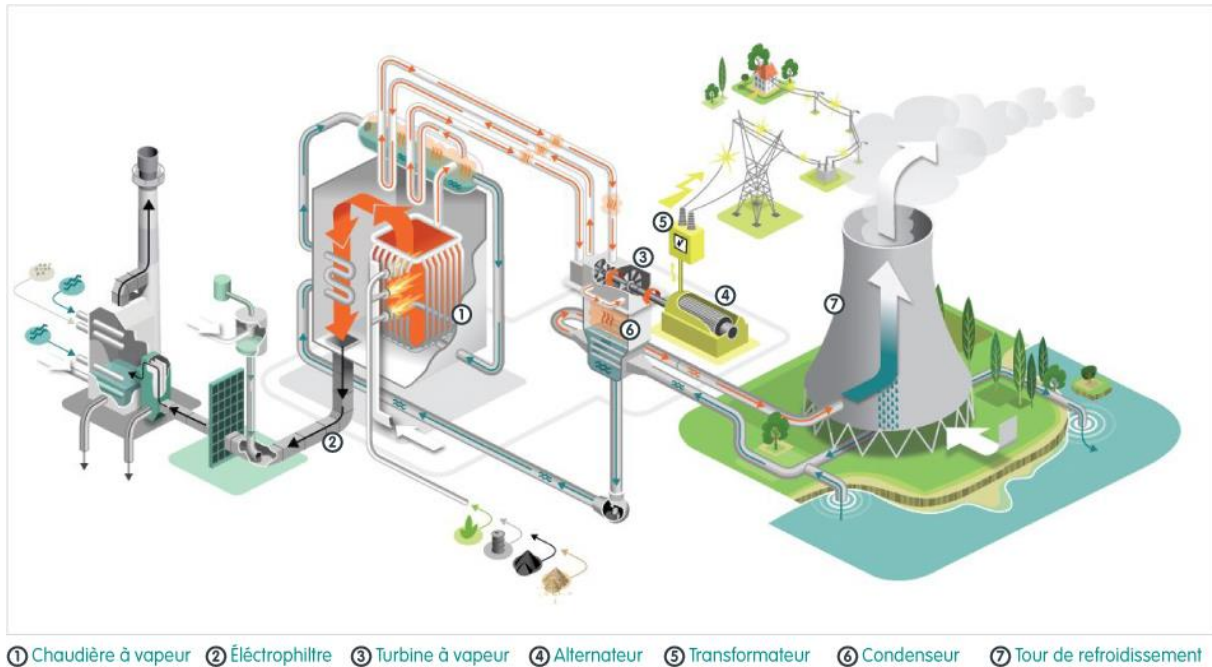


Figure 1-3 Centrale thermique [4].

1.2.4 Energie nucléaire

- **Les centrales nucléaires :** Une centrale nucléaire est une installation de production d'électricité utilisant la chaleur dégagée par la fission de l'uranium, qui sert de combustible nucléaire. Le principe de fonctionnement est similaire à celui des centrales thermiques classiques utilisant d'autres combustibles comme le charbon, le pétrole ou le gaz. La chaleur produite sert à chauffer de l'eau pour générer de la vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine à grande vitesse, entraînant un alternateur qui produit de l'électricité.

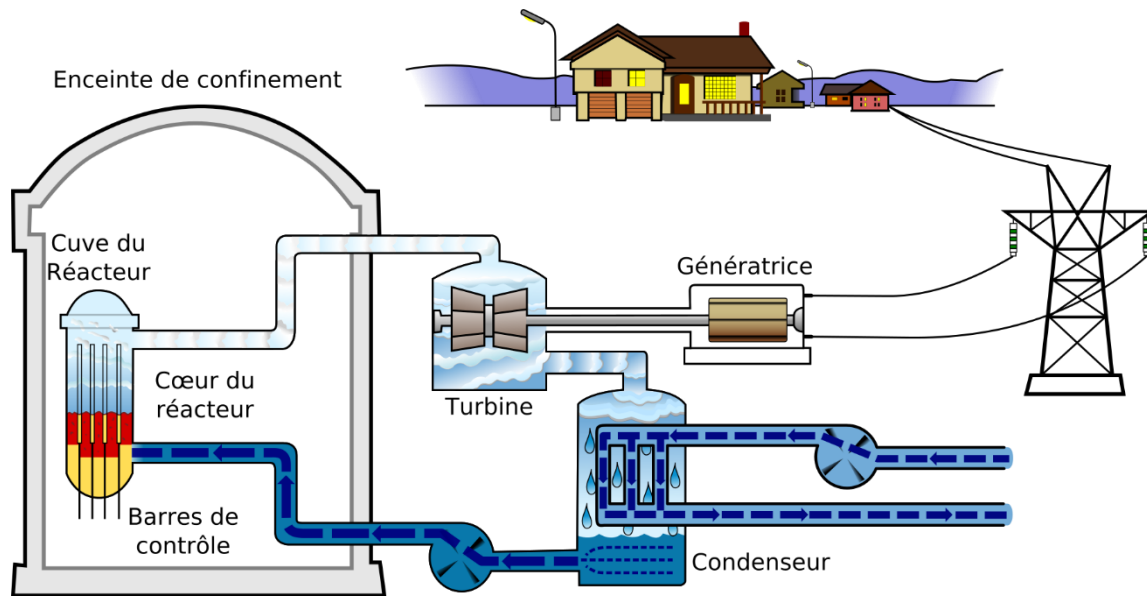


Figure 1-4 Centrale nucléaire [5].

1.2.5 L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique est une source d'énergie propre qui exploite la chaleur naturelle générée par la Terre. Cette chaleur est extraite du sol à l'aide de puits géothermiques forés dans des zones où la température est suffisamment élevée pour produire de l'eau chaude ou de la vapeur. Cette eau chaude ou cette vapeur est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine qui génère de l'électricité.

- **Les centrales géothermiques :** Les centrales géothermiques sont des installations de production d'électricité qui exploitent la chaleur naturelle de la Terre en utilisant différentes sources. Cette chaleur est extraite à partir de réservoirs géothermiques d'eau chaude situés en profondeur sous la surface de la Terre ou de zones géologiques chaudes telles que les zones volcaniques. Les centrales géothermiques utilisent des fluides géothermiques, tels que l'eau chaude et la vapeur, pour produire de l'électricité. Ces fluides sont extraits des réservoirs géothermiques d'eau chaude ou des zones géologiques chaudes, puis transportés à la centrale géothermique où ils sont utilisés pour faire tourner des turbines. Une fois utilisés, les fluides sont réinjectés dans le réservoir géothermique pour maintenir sa pression et sa température.

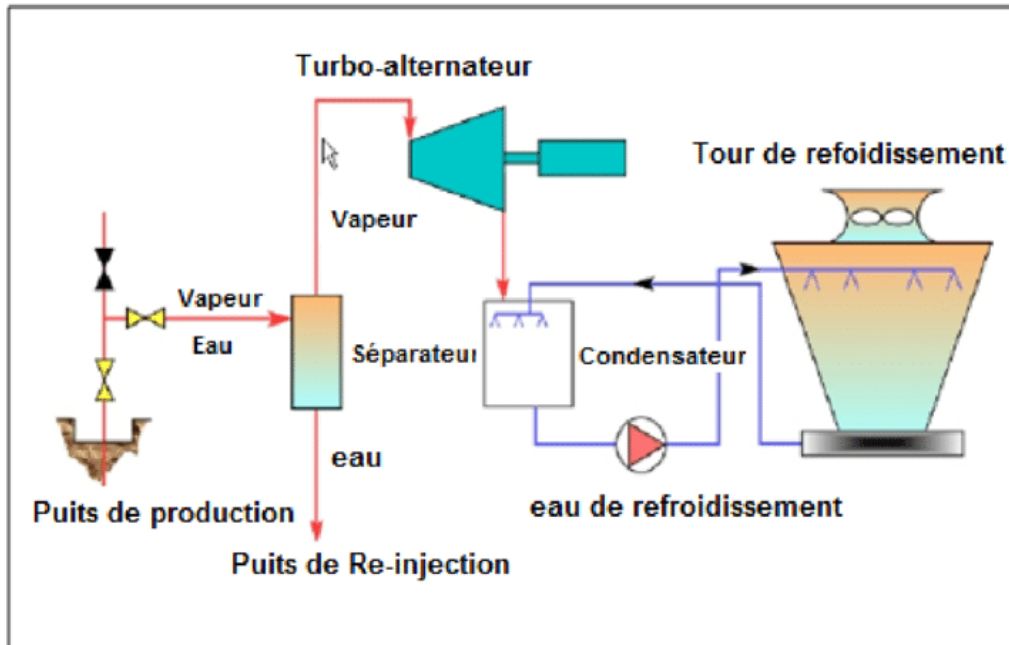


Figure 1-5 Centrale géothermique [6].

1.2.6 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la force de l'eau en mouvement, souvent sous forme de chute d'eau ou de cours d'eau. Cette énergie est convertie en énergie mécanique à l'aide de turbines qui actionnent des générateurs électriques pour produire de l'électricité. Elle est largement utilisée pour alimenter des zones urbaines et des industries [1].

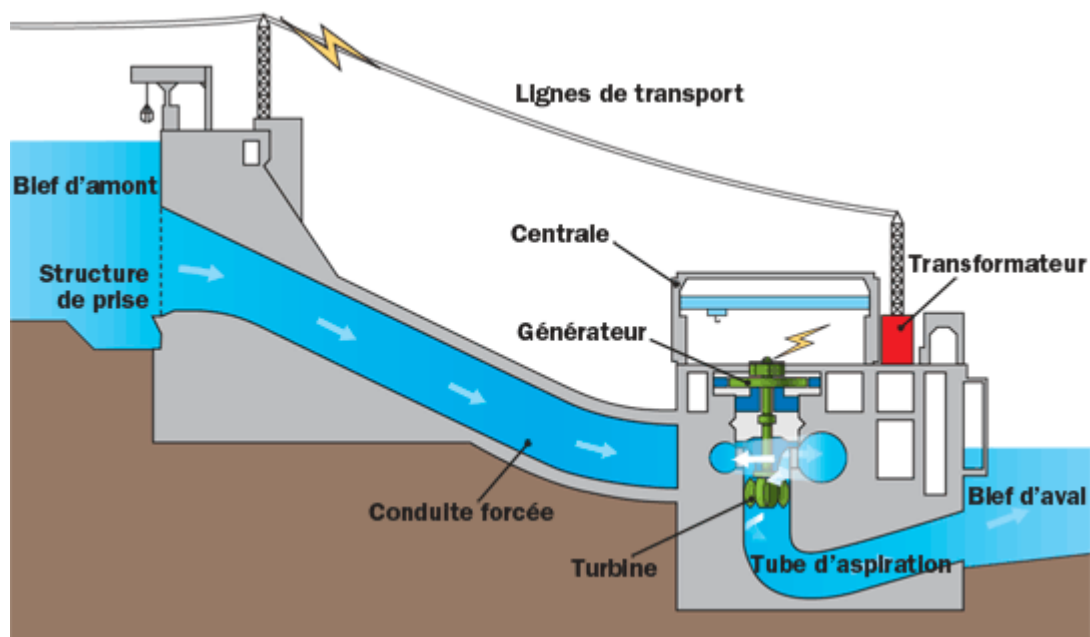


Figure 1-6 Centrale hydroélectrique [7].

1.2.7 Energie solaire

Cette forme d'énergie renouvelable provient de la capture directe du rayonnement solaire. Des dispositifs spécifiques sont employés pour absorber l'énergie des rayons solaires et la redistribuer selon deux modes de fonctionnement principaux.

Énergie solaire photovoltaïque, utilisée dans les panneaux solaires photovoltaïques, implique la captation de l'énergie solaire pour la production d'électricité. D'autre part, l'énergie solaire thermique, utilisée dans les chauffe-eaux solaires, les systèmes de chauffage et les panneaux solaires thermiques, implique la capture de la chaleur des rayons solaires, sa redistribution, et plus rarement, sa conversion en électricité.

1.3 L'énergie photovoltaïque

1.3.1 Définition de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque, une forme d'énergie renouvelable, transforme la lumière du soleil en électricité à l'aide de panneaux solaires équipés de cellules solaires. Cette source d'énergie propre ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre et est abondamment disponible. Elle est employée pour alimenter une gamme variée d'applications, allant des systèmes résidentiels aux installations commerciales. L'énergie photovoltaïque joue un rôle crucial dans la transition vers une économie durable.

1.3.2 Effet photovoltaïque

En 1839, Alexandre-Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, basé sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les semi-conducteurs. Ce processus, présenté dans la section suivante, consiste à transformer l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules solaires. Le terme "photovoltaïque" est dérivé de "photo" pour lumière et "volta" pour électricité, illustrant ainsi la production d'électricité à partir de la lumière. L'effet photovoltaïque implique l'émission d'électrons d'un matériau, tel qu'un métal ou un semi-conducteur, lorsqu'il est exposé à la lumière. Cette émission d'électrons dépend de la fréquence de la lumière, tandis que leur nombre est proportionnel à l'intensité lumineuse. Deux aspects sont à distinguer : l'émission d'électrons et la modification de la conductivité du matériau, qui engendre l'effet photovoltaïque. En résumé, l'effet photovoltaïque convertit l'énergie solaire en électricité en exploitant l'interaction des photons avec les cellules solaires [8].

1.3.3 Cellule

Une cellule solaire, connue également sous les noms de photopile ou photovoltaïque, est un dispositif électronique qui transforme directement la lumière solaire en électricité exploitable. Elle est constituée de couches minces de semi-conducteurs, principalement du silicium, dotés de propriétés électriques spécifiques. Le fonctionnement de la cellule solaire repose sur le principe de l'effet photovoltaïque. Lorsque la lumière solaire atteint la surface de la cellule, elle stimule les électrons présents dans le matériau semi-conducteur, les libérant et créant ainsi un courant électrique. Ce courant peut être collecté par des contacts métalliques sur la cellule solaire et utilisé pour alimenter des appareils électriques ou stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure

1.3.3.1 Caractéristiques de cellule

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

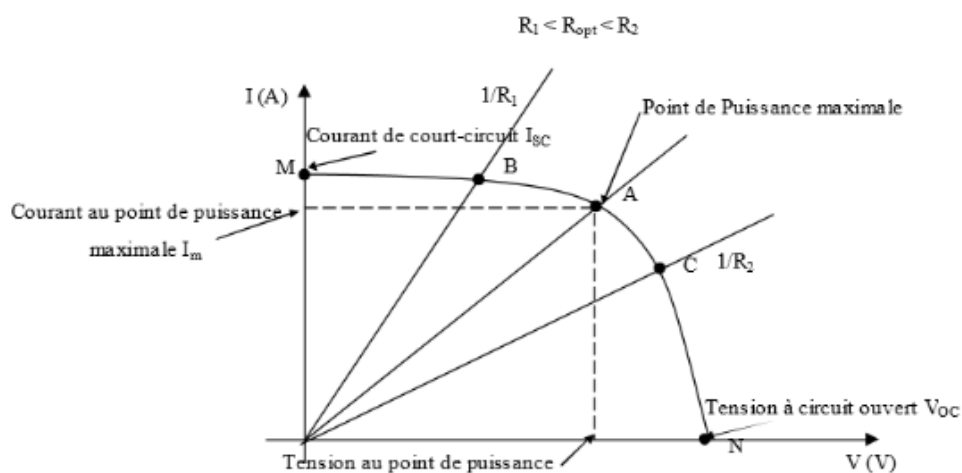


Figure 1-7 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [9].

La caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque représente la relation entre le courant électrique (I) généré par la cellule et la tension électrique (V) appliquée à ses bornes. Cette relation est généralement mesurée sous différentes conditions d'éclairement et de température pour évaluer les performances de la cellule dans des conditions réelles d'utilisation [9].

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque est généralement représentée par une courbe qui illustre la relation entre le courant de sortie de la cellule et la tension appliquée à ses bornes. À une tension nulle, le courant de sortie est généralement nul (courant de court-circuit), et à un courant nul, la tension de sortie est généralement maximale (tension en circuit ouvert). La

courbe I-V fournit des informations sur la puissance maximale que la cellule peut produire, ainsi que sur son rendement énergétique dans différentes conditions d'exploitation.

➤ **Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque**

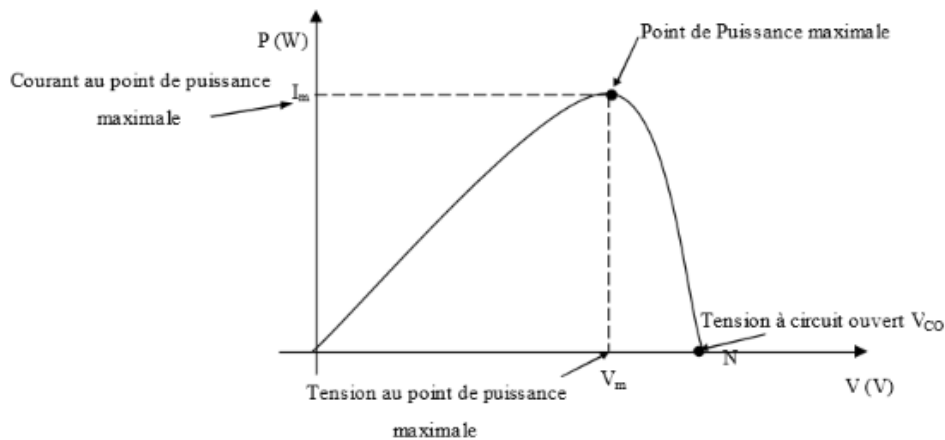


Figure 1-8 Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque [9].

La caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque représente la relation entre la puissance électrique générée par la cellule et la tension électrique appliquée à ses bornes. Cette relation est généralement mesurée sous différentes conditions d'éclairement et de température pour évaluer les performances de la cellule dans des conditions réelles d'utilisation [9].

La caractéristique puissance-tension est déterminée en multipliant le courant électrique par la tension électrique à chaque point de fonctionnement de la cellule. Elle est souvent représentée sous forme de courbe, appelée courbe de puissance, qui illustre la puissance maximale que la cellule peut produire à différentes tensions de fonctionnement. Cette courbe permet de déterminer le point de fonctionnement optimal de la cellule, où la puissance de sortie est maximale.

La caractéristique puissance-tension est un outil important pour évaluer les performances et l'efficacité des cellules photovoltaïques dans des applications réelles, notamment pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

1.4 Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque (PV) est un ensemble utilisant des panneaux solaires pour convertir la lumière solaire en électricité. Ses composants principaux sont les suivants [10] :

- 1. Panneaux solaires (ou modules photovoltaïques) :** Ils sont composés de cellules photovoltaïques qui transforment la lumière solaire en électricité. Installés généralement sur les toits ou dans des endroits bien exposés au soleil, ces panneaux captent l'énergie solaire.
- 2. Batterie :** Utilisée pour stocker l'électricité excédentaire produite par les panneaux solaires. Elle permet d'utiliser cette énergie pendant les périodes où les panneaux ne produisent pas suffisamment d'électricité, comme la nuit ou par temps nuageux. Les batteries sont particulièrement utiles dans les systèmes autonomes non reliés au réseau électrique.
- 3. Convertisseur (ou onduleur) :** Convertit le courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisé par la plupart des appareils domestiques et du réseau électrique. Il existe différents types d'onduleurs, tels que les onduleurs à onde sinusoïdale pure, les onduleurs à onde modifiée et les micro-onduleurs.
- 4. Régulateur de charge (ou contrôleur de charge) :** Gère le flux d'électricité entre les panneaux solaires et la batterie. Il protège la batterie contre la surcharge ou la décharge excessive, prolongeant ainsi sa durée de vie en maintenant une charge optimale.
- 5. Charges (ou consommateurs) :** Ce sont les appareils électriques utilisant l'électricité produite par les panneaux solaires ou stockée dans la batterie. Ils comprennent l'éclairage, les appareils ménagers, les systèmes de chauffage ou de refroidissement, les pompes à eau, les systèmes de communication, etc. Ces charges peuvent être alimentées directement par les panneaux solaires ou par l'intermédiaire de la batterie et du convertisseur.

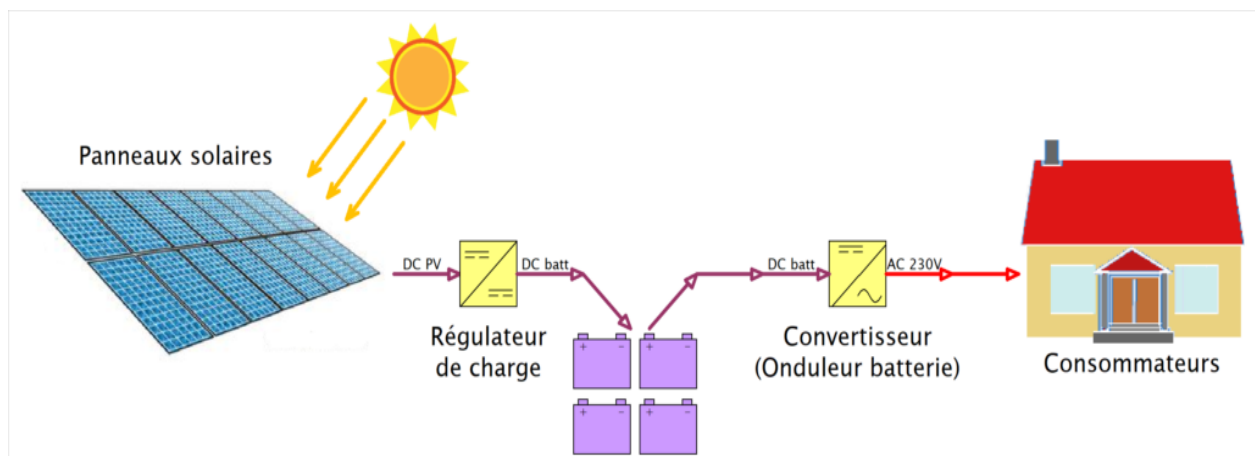


Figure 1-9 Les composants d'un système photovoltaïques [11].

1.4.1 Types des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont catégorisés en trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau, choisis en fonction des besoins énergétiques et de l'emplacement [12].

1. Systèmes PV autonomes (ou hors réseau) : Ils fonctionnent de manière indépendante sans être connectés au réseau électrique public. Principalement utilisés dans des zones éloignées ou sans accès au réseau, ces systèmes sont souvent équipés de batteries pour stocker l'électricité produite et la fournir lorsque nécessaire. Ils alimentent des maisons isolées, des installations agricoles, des tours de télécommunication, etc. Ces systèmes peuvent être divisés en deux catégories : avec accumulateurs (stockage dans des batteries) et sans accumulateurs (stockage sous d'autres formes telles que le pompage, la réfrigération ou l'électrolyse de l'eau).
2. Systèmes PV hybrides : Ils combinent l'énergie solaire avec d'autres sources renouvelables comme l'éolien ou l'hydroélectricité pour maximiser la production d'énergie. Ces systèmes peuvent être autonomes ou reliés au réseau selon les besoins locaux. Ils sont souvent utilisés dans des régions où les ressources solaires peuvent varier saisonnièrement.
3. Systèmes PV reliés au réseau (ou systèmes en réseau) : Ils sont connectés au réseau électrique public, permettant à l'électricité produite par les panneaux solaires d'être utilisée directement ou injectée dans le réseau. Les propriétaires peuvent bénéficier de tarifs de rachat ou de réductions sur leur facture d'électricité. Ces systèmes sont courants dans les habitations résidentielles, les bâtiments commerciaux et industriels.

1.4.2 Avantages des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent plusieurs avantages [13] :

- Utilisation d'une énergie renouvelable : Les systèmes PV exploitent l'énergie solaire, une ressource abondante et renouvelable, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Faibles émissions de carbone : Les systèmes PV produisent de l'électricité sans émissions directes de CO₂, aidant ainsi à lutter contre le changement climatique et à réduire la pollution de l'air.
- Réduction des coûts d'énergie à long terme : Une fois installés, les systèmes PV peuvent considérablement réduire les factures d'électricité à long terme, car l'énergie solaire est

gratuite, ce qui est particulièrement avantageux dans les régions où les prix de l'électricité sont élevés.

- **Fiabilité et durabilité** : Les systèmes PV sont robustes et ont une durée de vie moyenne de 25 à 30 ans. Ils nécessitent peu d'entretien, ce qui en fait une source d'énergie fiable.
- **Flexibilité d'installation** : Les panneaux solaires peuvent être installés sur différents types de surfaces, comme les toits, les murs ou les structures au sol, et peuvent être dimensionnés pour répondre aux besoins spécifiques d'une résidence, d'un bâtiment commercial ou d'un système hors réseau. De plus, ils présentent un risque de choc électrique réduit à 12 ou 24 Vcc, et un risque d'incendie moindre comparé aux groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

1.4.3 Inconvénients des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent plusieurs inconvénients [13] :

1. **Coût initial élevé** : Bien que l'installation initiale d'un système PV puisse représenter un investissement important, les coûts des panneaux solaires ont considérablement baissé ces dernières années, rendant l'énergie solaire plus accessible.
2. **Dépendance aux conditions météorologiques** : Les systèmes PV dépendent de l'ensoleillement pour produire de l'électricité, ce qui peut entraîner des variations de performance en fonction des conditions météorologiques, affectant ainsi leur efficacité dans certaines régions ou pendant certaines saisons.
3. **Espace requis** : Les systèmes PV nécessitent une certaine surface pour installer les panneaux solaires, ce qui peut poser un défi dans les zones urbaines densément peuplées où l'espace est limité.
4. **Intermittence de l'énergie solaire** : L'énergie solaire est une source intermittente car elle n'est pas disponible pendant la nuit et peut varier en fonction des saisons. Cependant, les systèmes PV autonomes peuvent être équipés de batteries de stockage pour compenser cette intermittence.

1.5 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 [14] :

➤ 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.

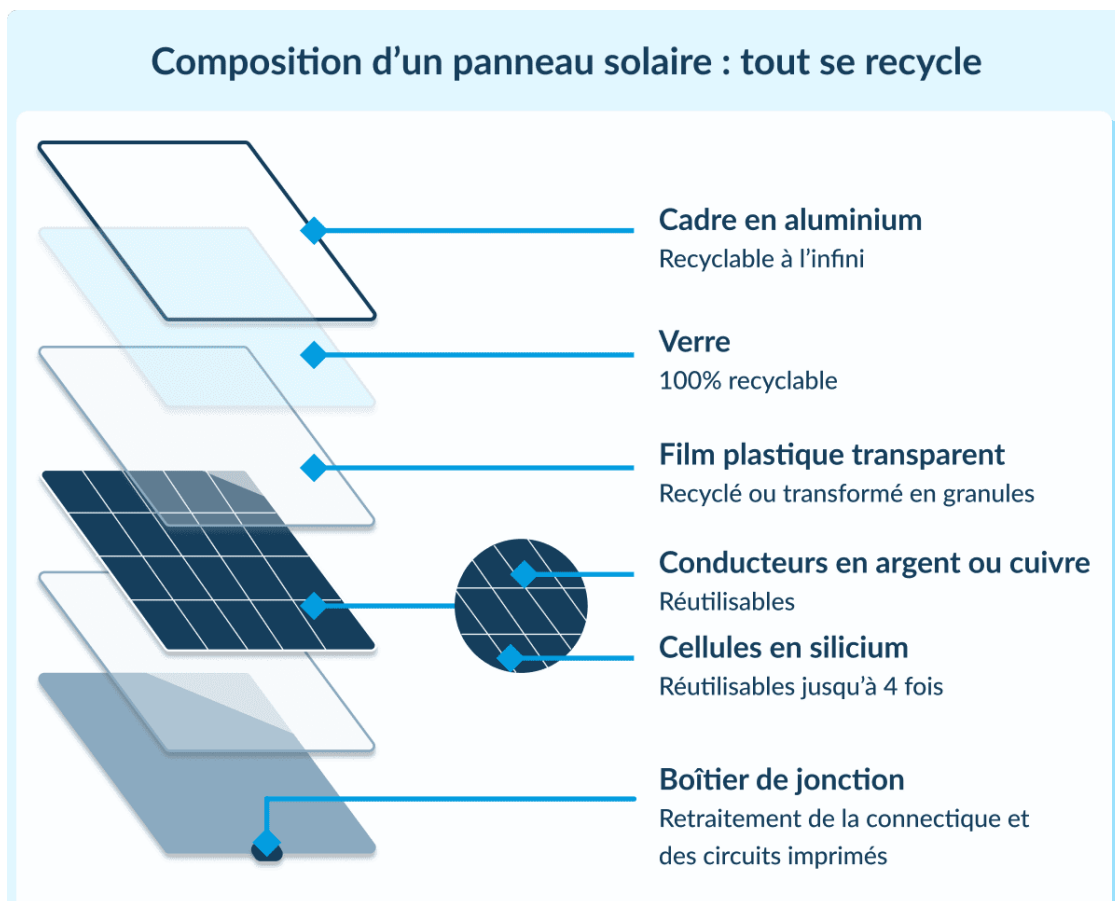


Figure 1-10 Composition d'un module photovoltaïque [15].

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 1-11 Système de montage [16].

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 1-12 Panneaux solaires flexibles [17].

1.6 Conclusion

En somme, l'énergie photovoltaïque représente une source renouvelable essentielle avec de nombreux avantages dans le paysage énergétique actuel. Elle contribue significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, jouant ainsi un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique. En convertissant directement la lumière solaire en électricité, elle évite également les émissions de polluants associées aux combustibles fossiles, tout en étant une source d'énergie propre et silencieuse, sans production de déchets dangereux.

D'un point de vue économique, les coûts de production des panneaux solaires ont chuté de manière significative au fil du temps, rendant cette technologie de plus en plus accessible et compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. De plus, l'installation de systèmes photovoltaïques offre des avantages financiers à long terme en réduisant les factures d'électricité, ce qui représente des économies substantielles pour les utilisateurs. En définitive, l'énergie photovoltaïque joue un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus durable et équilibré.

*Chapitre 2 : Choix du système hybride
et fonctionnalités du moteur*

2 Choix du système hybride et fonctionnalités du moteur

2.1 Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le secteur maritime explore activement des solutions plus écologiques et efficaces. Ce chapitre aborde les considérations essentielles pour le choix d'un système hybride et les fonctionnalités des moteurs associés. Nous commencerons par une analyse des différents types de navires et des moteurs utilisés, suivie d'une explication détaillée du fonctionnement des moteurs hybrides. Ensuite, nous explorerons les nombreux avantages qu'offrent ces technologies avant de conclure par les critères déterminants pour la sélection d'un système hybride optimal.

2.2 La problématique de la propulsion navale

L'hybridation dans le domaine de la propulsion navale offre bien plus que simplement une réduction de la consommation de carburant. Elle ouvre la voie à de nouvelles fonctionnalités et possibilités :

Propulsion électrique silencieuse : En utilisant principalement la propulsion électrique, les navires peuvent naviguer de manière plus discrète, réduisant ainsi les nuisances sonores.

Réponse rapide de la commande de l'hélice : Les systèmes hybrides permettent une réponse rapide aux commandes de propulsion, améliorant ainsi la maniabilité du navire.

Inversion de la poussée de l'hélice : Cette fonctionnalité permet au navire de reculer sans avoir à changer la direction de rotation de l'hélice, simplifiant ainsi les manœuvres.

Stockage accru d'énergie électrique : Les systèmes hybrides offrent la possibilité de stocker davantage d'énergie électrique à bord, ce qui peut être utile pour les périodes de faible consommation ou pour alimenter des équipements électriques.

Récupération d'énergie par l'hélice : Si le navire est équipé de voiles, l'énergie produite par celles-ci peut être récupérée par l'hélice, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique globale.

Placement flexible du moteur thermique : Sans contrainte de ligne d'arbre, le moteur thermique peut être placé de manière à réduire les bruits et à améliorer la répartition des masses à bord.

Utilisation de l'hélice dans un pod : Un pod, une nacelle orientable sous-marine, permet une meilleure manœuvrabilité du navire en permettant une orientation flexible de l'hélice [18].

2.3 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.

➤ 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 [19].

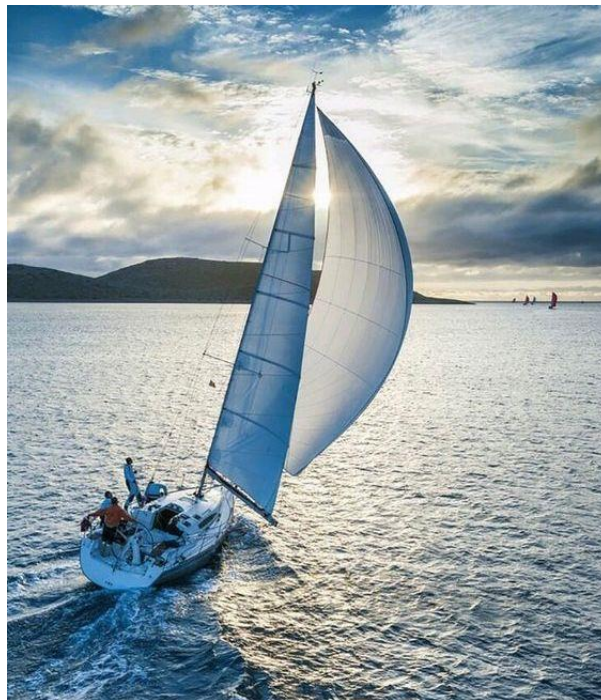


Figure 2-1 Voiliers [20].

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.

- **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) [19].



Figure 2-2 Navire de fret [21].

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 2-3 Bâtiments de guerre [22].

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.



Figure 2-4 Yachts [23].

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.

2.4 Types des moteurs utilisés dans la propulsion des navires

2.4.1 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 2-5 L'installation d'un moteur diesel dans un navire [24].

2.4.2 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 2-6 Turbine à gaz utilisée dans la propulsion d'un navire [25].

➤ **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 [26].

2.4.3 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 [27].

2.4.4 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 [28].

2.5 Définition de l'hybridation

Dans le domaine de la technologie des véhicules, la notion d'hybridation de la propulsion n'est pas toujours aisée à définir. Il est primordial de poser des critères clairs pour distinguer une propulsion conventionnelle d'une propulsion hybride. La simple présence de deux sources d'énergie ne suffit pas à qualifier un système de propulsion d'hybride, sinon tous les véhicules à propulsion thermique pourraient être considérés comme tels, étant donné l'utilisation omniprésente de l'électricité dans diverses fonctions. Pour clarifier la distinction, des conditions supplémentaires sont nécessaires.

Dans le secteur automobile, des chercheurs ont proposé des critères précis pour définir l'hybridation. Selon ses propositions, un véhicule hybride doit non seulement avoir au moins deux sources d'énergie, mais aussi utiliser au moins deux de ces sources pour la propulsion. Une autre approche consiste à identifier les fonctionnalités spécifiques qu'une propulsion hybride peut offrir, telles que l'optimisation de la gestion énergétique des accessoires, le système start/stop, la récupération d'énergie au freinage, la fonction de "boost" et le mode tout électrique.

Il est important de noter que ces définitions ne sont pas exhaustives et peuvent être perçues comme limitatives. En effet, elles excluent certaines formes d'hybridation, notamment la "micro-hybridation", où la seconde source d'énergie n'est pas de même ordre de grandeur que la source thermique.

Pour simplifier, nous retenons la définition suivante : Un véhicule est qualifié d'hybride lorsque sa chaîne de propulsion comprend au moins deux sources d'énergie d'importance comparable, dont au moins l'une est réversible. Cette définition englobe les types d'hybridation série et

parallèle, tout en écartant la micro-hybridation qui ne répond pas aux mêmes critères quant à l'importance des sources d'énergie utilisées [29].

2.6 Utilité de l'hybridation

L'efficacité d'une propulsion hybride n'est pas toujours garantie, et son utilité dépend largement du contexte d'utilisation. Par exemple, pour un véhicule qui maintient une vitesse constante sur une autoroute pendant tout son trajet, l'hybridation peut ne pas offrir d'avantages significatifs, surtout si le moteur est correctement dimensionné. Dans certains cas, elle peut même entraîner une consommation d'énergie supplémentaire en raison de la masse additionnelle.

Cependant, dans le domaine maritime, l'hybridation thermique/électrique trouve sa place à bord des cargos et autres navires de gros tonnage. Deux raisons principales motivent son utilisation :

- Elle permet d'assurer une redondance des sources d'énergie primaires, offrant ainsi une sécurité accrue sans accroître la complexité mécanique.
- Elle permet également d'alimenter les divers équipements électriques à bord, évitant ainsi la nécessité d'ajouter des générateurs supplémentaires.

Il est crucial de comprendre que l'hybridation n'est pas une solution universelle pour améliorer l'efficacité énergétique. Sa mise en œuvre efficace nécessite une méthodologie rigoureuse de modélisation, de dimensionnement et de contrôle spécifique à chaque application. La recherche et le développement dans ce domaine sont donc essentiels pour maximiser les avantages de cette technologie et répondre aux défis complexes de l'efficacité énergétique dans divers secteurs industriels [18].

2.7 Navires hybrides

L'hybridation des navires désigne l'intégration de systèmes de propulsion mixtes qui combinent des technologies conventionnelles (comme les moteurs diesel) avec des technologies électriques (moteurs électriques et stockage d'énergie via des batteries ou d'autres dispositifs). Cette combinaison vise à optimiser la performance énergétique, à réduire la consommation de carburants fossiles et à diminuer les émissions polluantes. En particulier, l'hybridation offre une flexibilité opérationnelle accrue et peut contribuer à l'atteinte des objectifs de durabilité dans le secteur maritime.

Les systèmes hybrides pour navires peuvent fonctionner selon différents modes, par exemple, en utilisant l'énergie électrique stockée pour la propulsion à faible vitesse ou en mode "zéro

émission" dans les ports, et en basculant sur des moteurs conventionnels pour les vitesses plus élevées ou lorsque les besoins en énergie augmentent. La gestion intelligente de l'énergie entre les composants du système hybride est essentielle pour maximiser l'efficacité et les bénéfices environnementaux [30].

2.8 Fonctionnement d'un moteur hybride

Les moteurs hybrides diesel-électrique fonctionnent en combinant deux types de sources d'énergie : un moteur diesel et un moteur électrique, souvent alimenté par des batteries. Ce système permet une utilisation plus efficace de l'énergie et offre plusieurs avantages en termes de performance et d'efficacité énergétique.

Le fonctionnement de ces moteurs peut varier en fonction de la configuration spécifique du système, mais en général, voici comment cela se déroule :

1. **Moteur Diesel** : Le moteur diesel est utilisé comme source principale de propulsion. Il convertit l'énergie chimique contenue dans le carburant diesel en énergie mécanique. Ce moteur peut être utilisé pour alimenter directement l'hélice du navire ou pour charger les batteries qui alimentent le moteur électrique.
2. **Moteur Électrique** : Le moteur électrique est utilisé en complément du moteur diesel pour fournir une puissance supplémentaire lors des périodes de forte demande ou pour fonctionner seul à des vitesses réduites. Il peut être alimenté par les batteries du système hybride ou directement par un générateur diesel.
3. **Batteries** : Les batteries stockent l'énergie électrique produite par le moteur diesel ou récupérée lors du freinage ou de la décélération du navire. Cette énergie peut être utilisée pour alimenter le moteur électrique lorsque la demande est élevée ou lorsque le navire fonctionne à basse vitesse.

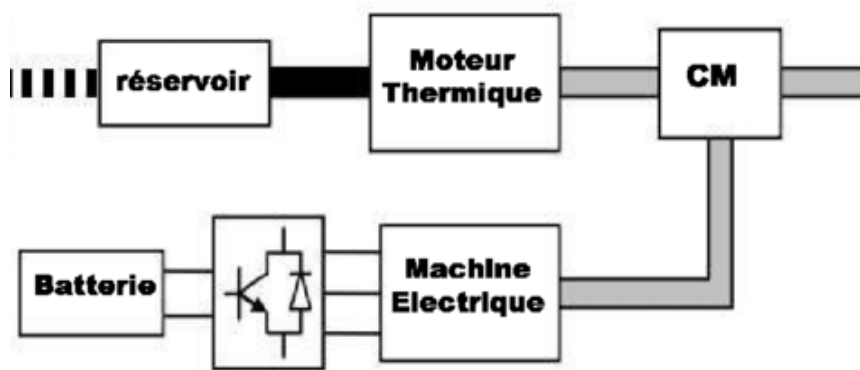


Figure 2-7 Fonctionnement d'un moteur hybride [31].

L'avantage principal des moteurs hybrides diesel-électrique réside dans leur capacité à optimiser l'utilisation du moteur diesel, en le faisant fonctionner à des régimes plus efficaces et en réduisant les périodes de fonctionnement à charge partielle, ce qui entraîne une consommation de carburant réduite et des émissions polluantes plus faibles [32].

2.9 Différentes structures des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides offrent différentes architectures pour la propulsion maritime, se déclinant en trois types principaux : l'hybride série, l'hybride parallèle et l'hybride à dérivation de puissance (dite aussi série/parallèle).

Dans un système **hybride série**, un moteur électrique est employé pour propulser le navire, tandis que le moteur thermique se charge de recharger les batteries [33].

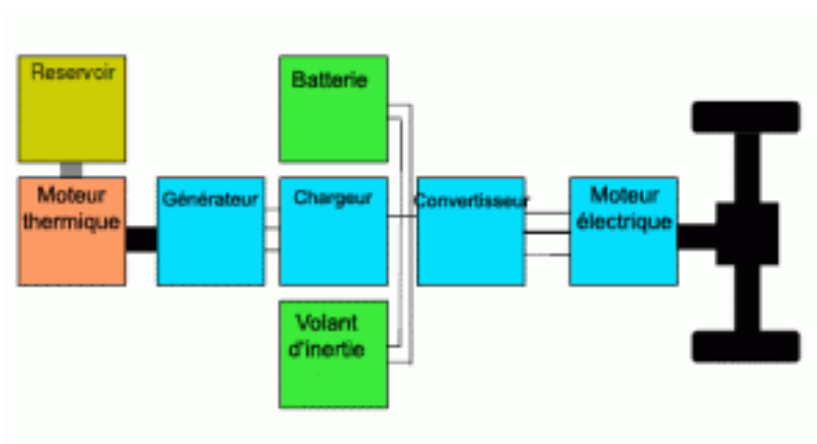


Figure 2-8 Architecture série [33].

L'**hybride parallèle**, quant à lui, utilise à la fois le moteur électrique et le moteur thermique pour propulser le navire, que ce soit de concert ou de manière indépendante [33].

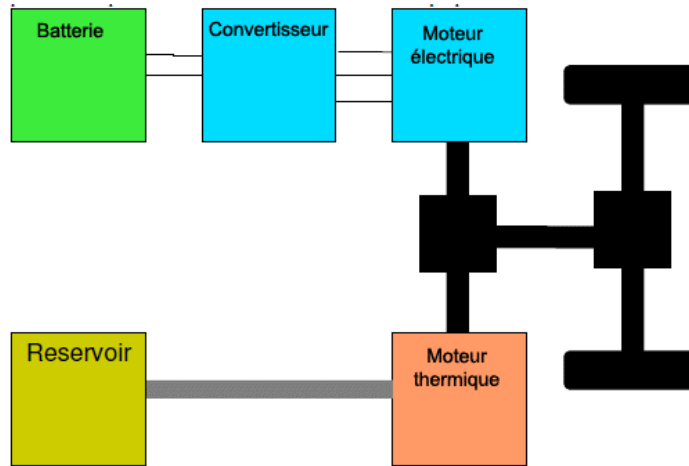


Figure 2-9 Architecture parallèle [33].

Enfin, l'**hybride série-parallèle** adopte un moteur électrique pour les basses vitesses et un moteur thermique pour les hautes vitesses.

L'hybridation série-parallèle combine des éléments des deux méthodes, mais il existe diverses approches pour sa mise en œuvre, comme le détaille (Scordia 2004). Nous avons opté pour étudier exclusivement la configuration hybride série, jugée plus adaptée au contexte naval [13].

- Dans le tableau 1 on a résumé les avantages et les inconvénients de chaque architecture [34] :

Tableau 1 Avantage et inconvénient de l'architecture hybride.

Architecture	Avantage	Inconvénients
Série	Bon rendement en régime dynamique Facilité de commande Mode tout électrique possible Bonne possibilité de récupération d'énergie Confortable d'utilisation Flexibilité d'installation	Faible gain de rendement en régime stationnaire Nécessite trois machines de forte puissance Cout Masse embarquée
Parallèle	Bon rendement Mode tout électrique possible Nécessite moins de machine tournante	Complexe à commander Complexe à implanter
Série/Parallèle	Efficacité a toute vitesse Reduction de la consommation du carburant	Complexité de conception Cout initial élevé Poids supplémentaire

	Meilleure réponse à l'accélération	
--	------------------------------------	--

2.10 Hybridation d'une propulsion

L'hybridation d'une propulsion se réfère au développement et à l'utilisation de systèmes de propulsion qui combinent différentes sources d'énergie pour actionner un véhicule, que ce soit un navire, une automobile, un train, ou tout autre moyen de transport. L'objectif principal de l'hybridation est de tirer parti des avantages spécifiques de chaque source d'énergie (comme la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et la réduction de la consommation de carburant) tout en compensant leurs inconvénients respectifs.

Dans le contexte de la propulsion marine, par exemple, un système hybride peut combiner un moteur diesel traditionnel avec un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par des batteries. Ce type de système permet de fonctionner en mode purement électrique pour des opérations silencieuses et sans émissions dans des zones sensibles, comme les ports ou les zones protégées, et de basculer sur le moteur diesel ou une combinaison des deux pour des performances accrues ou une autonomie prolongée en haute mer [35].

2.11 Critères de Sélection d'un Système Hybride

A. Critères de sélection :

Lors du choix d'un moteur hybride diesel-électrique pour un navire, plusieurs critères doivent être pris en compte. Tout d'abord, la performance du moteur est cruciale. Il doit être capable de fournir la puissance nécessaire pour propulser efficacement le navire tout en maintenant une vitesse et une maniabilité appropriées. L'efficacité énergétique est un autre critère important. Un moteur hybride bien conçu peut réduire la consommation de carburant et donc les coûts opérationnels du navire, tout en réduisant les émissions polluantes. Enfin, l'impact environnemental est un facteur clé. Les moteurs hybrides offrent généralement une réduction significative des émissions de CO₂, de NO_x et de particules fines par rapport aux moteurs diesel conventionnels, ce qui les rend attrayants pour les armateurs soucieux de l'environnement [36].

B. Avantages de la propulsion hybride :

La propulsion hybride présente de nombreux avantages pour différents types de navires. Pour les navires de transport de marchandises, elle peut permettre une réduction

significative de la consommation de carburant, ce qui se traduit par des économies substantielles sur les coûts opérationnels. Pour les navires de croisière, elle offre une meilleure efficacité énergétique, ce qui permet de réduire les émissions et de répondre aux exigences environnementales plus strictes. Pour les navires de pêche, elle peut améliorer la fiabilité et la maniabilité, ce qui est crucial pour les opérations en mer. Enfin, pour les navires de plaisance, elle offre une autonomie accrue et une expérience de navigation plus agréable grâce à une réduction du bruit et des vibrations [37].

C. Exemples d'application et retours d'expérience :

Il existe de nombreux exemples d'application réussie de la propulsion hybride dans l'industrie maritime. Par exemple, le navire de croisière « MS Roald Amundsen » de la compagnie Hurtigruten est équipé d'un système de propulsion hybride diesel-électrique, ce qui lui permet de naviguer de manière plus écologique dans les régions polaires sensibles. De même, le ferry électrique "Ampere" en Norvège utilise un système de propulsion hybride qui lui permet de fonctionner de manière totalement électrique sur certaines routes, réduisant ainsi les émissions de CO2. Ces exemples démontrent les avantages significatifs de la propulsion hybride dans différents contextes maritimes.



Figure 2-10 Le navire de croisière « MS Roald Amundsen » [38].

2.12 Impacts environnementaux des moteurs hybrides

2.12.1 Avantages des moteurs hybrides

1. Réduction des émissions polluantes : Les moteurs hybrides permettent de réduire les émissions de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NOx), les particules fines et les gaz à effet de serre (CO₂), contribuant ainsi à la préservation de l'environnement et à la conformité aux réglementations environnementales strictes.
2. Meilleure efficacité énergétique : Les moteurs hybrides optimisent l'utilisation de l'énergie en ajustant la puissance du moteur diesel en fonction des besoins, ce qui permet de réduire la consommation de carburant et d'augmenter l'efficacité globale du système de propulsion.
3. Flexibilité opérationnelle : Les moteurs hybrides offrent une flexibilité dans le choix de la source d'énergie, permettant de basculer entre le moteur diesel et le moteur électrique en fonction des conditions de navigation et des exigences opérationnelles, ce qui permet d'optimiser les performances du navire.
4. Réduction du bruit et des vibrations : Les moteurs électriques sont généralement plus silencieux que les moteurs diesel, ce qui réduit les nuisances sonores à bord du navire et améliore le confort des passagers et de l'équipage. De plus, les vibrations sont souvent réduites, ce qui peut augmenter la durée de vie des équipements et réduire les coûts de maintenance.
5. Amélioration de la sécurité : Les moteurs hybrides offrent une redondance et une fiabilité accrues du système de propulsion, ce qui peut améliorer la sécurité du navire en cas de défaillance d'un composant ou d'une source d'énergie.

2.12.2 Inconvénients des moteurs hybrides

1. Perturbations acoustiques

- Les moteurs hybrides peuvent produire des bruits sous-marins perturbant la vie marine, notamment les mammifères marins qui dépendent de l'écholocation. Ces perturbations acoustiques peuvent altérer leur comportement et affecter leur santé [39].

2. Impact sur les habitats marins

- L'installation et le fonctionnement des systèmes hybrides peuvent entraîner des perturbations des habitats marins. Des mesures compensatoires, comme la création de zones de refuge pour la faune marine, peuvent être mises en place pour minimiser ces impacts.

3. Consommation de ressources rares

- La fabrication des batteries nécessaires aux systèmes hybrides implique l'extraction de matériaux rares tels que le lithium et le cobalt. Cette extraction a des impacts environnementaux significatifs, notamment en termes de dégradation des paysages et de pollution associée aux processus miniers.

2.13 Conclusion

Les systèmes hybrides pour navires offrent une solution innovante combinant les avantages des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques. Le choix d'un système hybride repose sur une compréhension approfondie des différents types de navires et de leurs moteurs, ainsi que des principes de fonctionnement des moteurs hybrides. Ces moteurs permettent une efficacité énergétique accrue, une réduction des émissions polluantes et des coûts opérationnels réduits. Pour sélectionner le système hybride le plus adapté, il est crucial de considérer des critères tels que le type de navire, le profil d'exploitation, les exigences en matière de performance et les objectifs environnementaux. En intégrant ces facteurs, les systèmes hybrides peuvent optimiser les performances des navires tout en contribuant à un transport maritime plus durable.

*Chapitre 3 : Simulation du système
hybride*

3 Simulation du système hybride

3.1 Description d'un modèle d'un bateau

Dans ce mémoire, nous proposons un modèle novateur de bateau propulsé par des sources d'énergie renouvelable, utilisant un système de propulsion hybride diesel-électrique. Le modèle intègre un moteur diesel de 75 kW et un moteur électrique de 20 kW. Cette configuration combine la robustesse et la fiabilité du moteur diesel avec les avantages environnementaux et l'efficacité énergétique du moteur électrique.

Le moteur électrique est alimenté par un système hybride combinant des panneaux photovoltaïques (PV) et le réseau électrique. Les panneaux solaires, installés au port, génèrent de l'électricité pour charger les batteries du bateau. Ces batteries fournissent ensuite l'énergie nécessaire au moteur électrique lorsque le bateau est en navigation. En parallèle, les batteries peuvent également être rechargées via le réseau électrique, garantissant une source d'énergie fiable même lorsque la production solaire est insuffisante.

Pendant le fonctionnement, le moteur diesel et le moteur électrique peuvent fonctionner simultanément. Le moteur diesel assure une propulsion continue et fiable, tandis que le moteur électrique, alimenté par les batteries chargées par les panneaux PV et le réseau électrique, contribue à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre. Cette configuration permet une flexibilité optimale dans l'utilisation des différentes sources d'énergie et améliore l'efficacité énergétique globale du bateau.

Avant de procéder à la simulation de ce modèle avec le logiciel HOMER PRO, nous analyserons les performances et la faisabilité de cette configuration hybride. La simulation permettra d'évaluer l'efficacité énergétique, les coûts opérationnels et les impacts environnementaux en tenant compte de divers scénarios d'exploitation et de production d'énergie. Cette évaluation nous aidera à optimiser la conception et à démontrer les avantages de l'intégration des énergies renouvelables dans la propulsion maritime.

3.2 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 [40].

Les paramètres pour le choix de logiciel HOMER Pro.

Tableau 2 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	----

3.2.1 Définition du logiciel HOMER PRO

HOMER est un logiciel 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 [41].

3.2.2 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 "3-1" 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 [42].

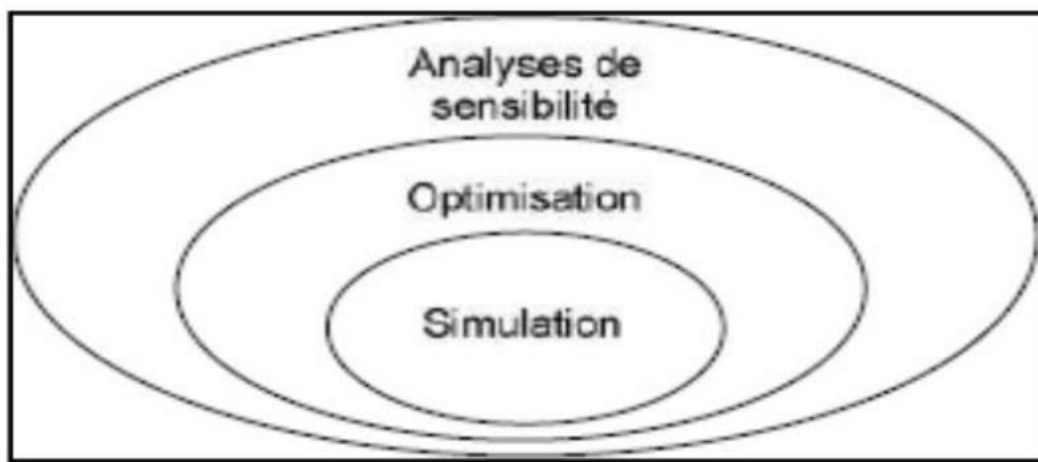


Figure 3-1 Modèle conceptuel du logiciel HOMER [43].

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.

3.2.3 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 (voir Figure "3-2"). 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.

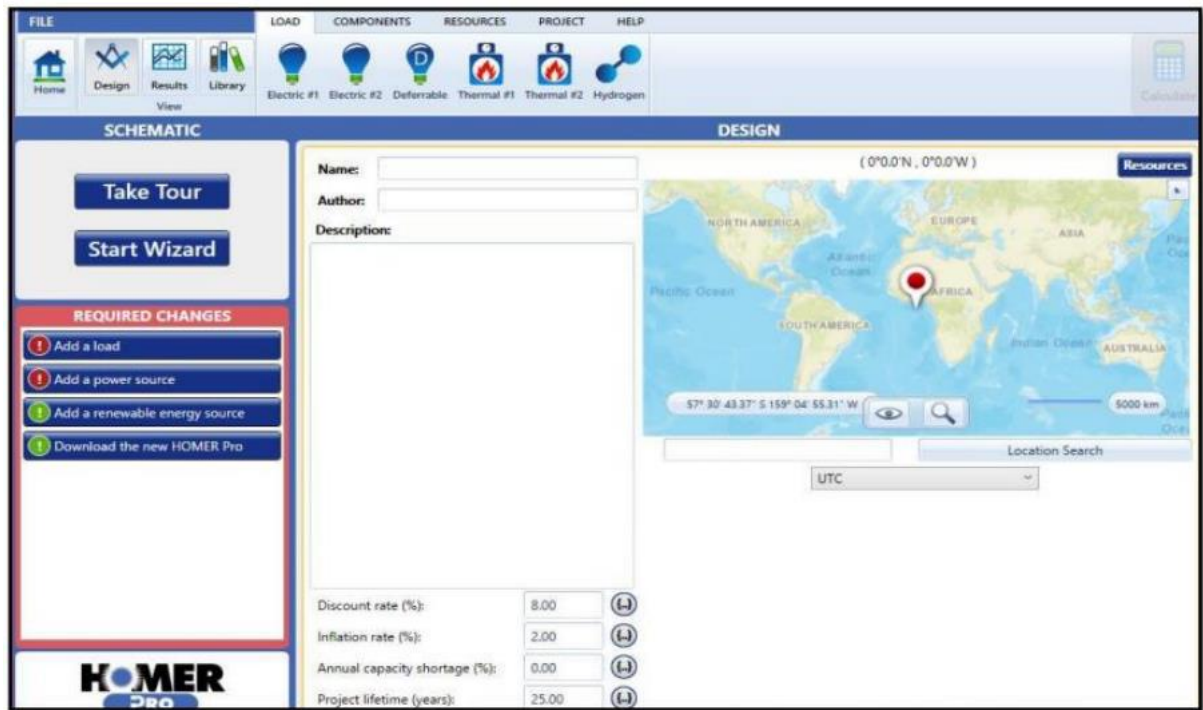


Figure 3-2 L'interface de logiciel HOMER Pro.

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 "3.2".

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 "3-3". 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 3-3 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 "3-4". 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 "3-5".



Figure 3-4 Le schéma de système.

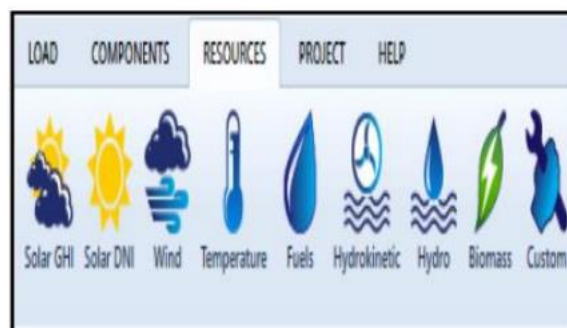


Figure 3-5 Les ressources.

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 entrées, 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 [42].

3.2.4 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.

3.2.5 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 [44].

3.2.6 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 [45].

3.3 Simulation de notre travail

Dans cette simulation, nous proposons d'alimenter en électricité un modèle d'un bateau à Ghazaouet dans la wilaya de Tlemcen en Algérie, déjà connectée au réseau électrique, grâce à un système hybride combinant énergie photovoltaïque (PV) et réseau. Pour mettre en œuvre ce système énergétique, il est essentiel de disposer de données précises telles que le profil de charge et le rayonnement solaire du site choisi. Ces informations proviennent de mesures réelles du rayonnement solaire dans la région, collectées tout au long de l'année par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). La figure "3.6" illustre ces données de rayonnement solaire pour la région étudiée. Utiliser ces données authentiques permet une modélisation réaliste et précise du système hybride PV-réseau dans ce contexte particulier.

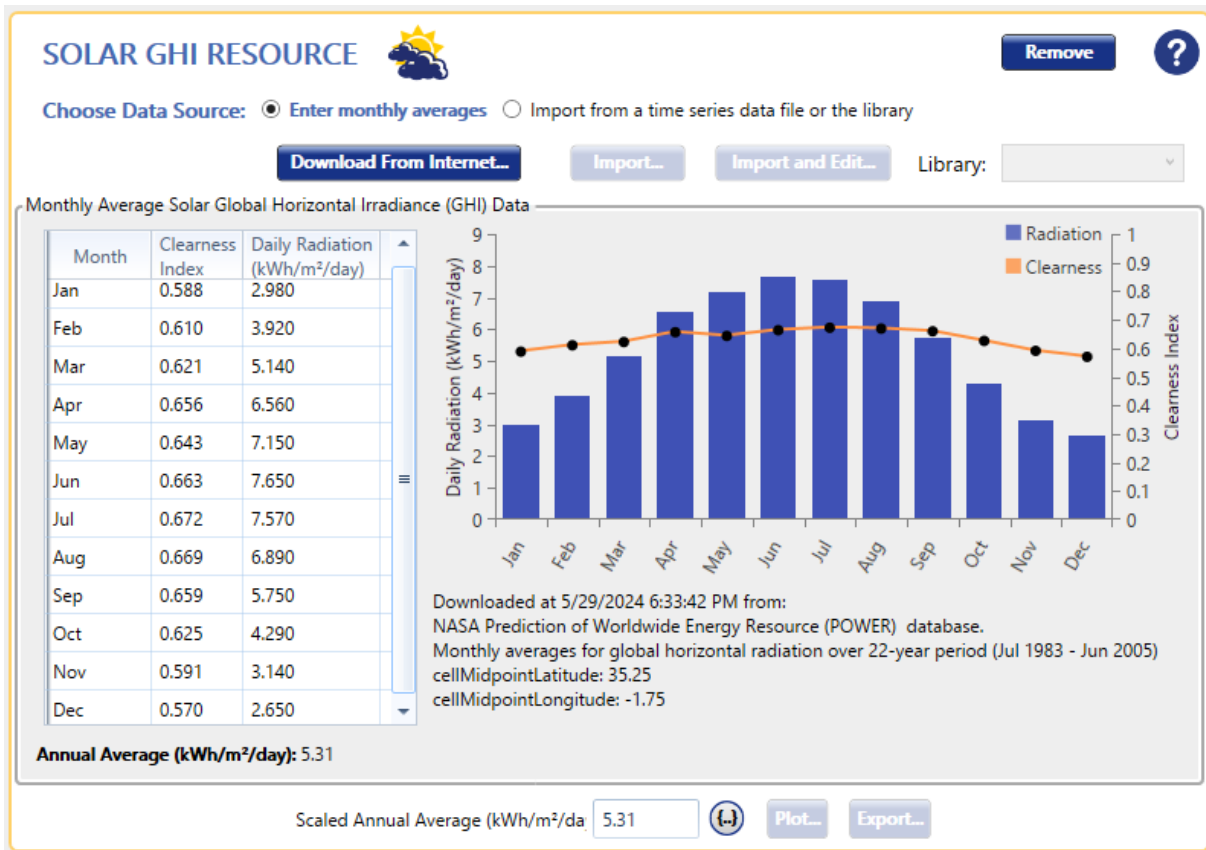


Figure 3-6 Rayonnement solaire mensuel à Ghazaouet.

Le système hybride est conçu pour alimenter le moteur électrique avec une consommation de 120 kWh/jour.

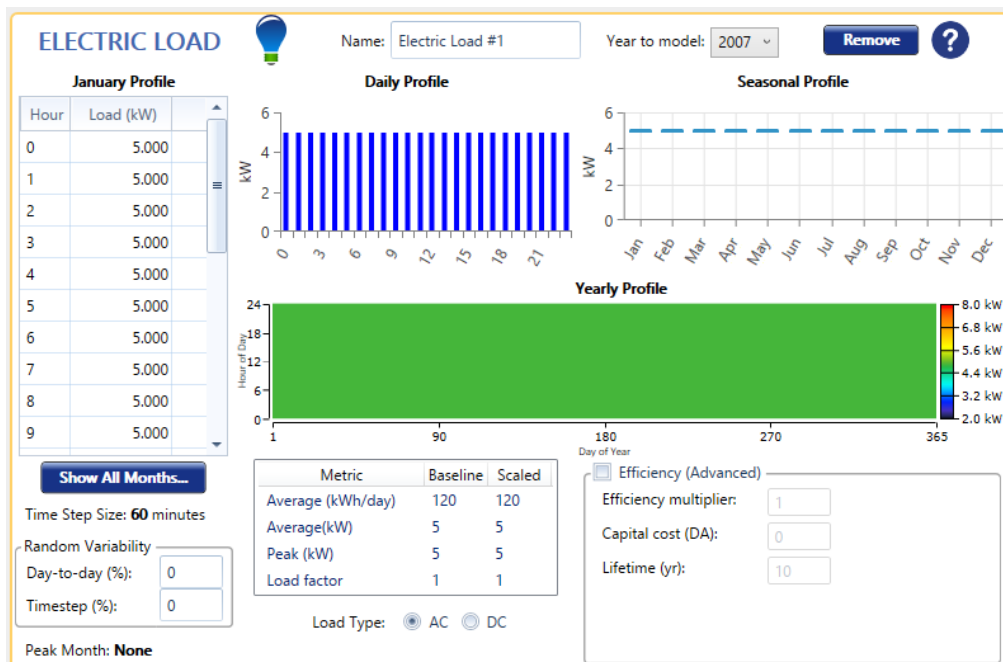


Figure 3-7 Profil annuelle de la charge (moteur électrique).

Yearly Load Data

Hour	Weekdays												Weekends											
	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
1	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
2	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
3	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
4	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
5	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
6	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
7	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
8	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
9	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
10	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
11	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
12	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
13	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
14	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
15	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
16	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
17	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
18	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
19	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
20	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
21	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
22	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	
23	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	

Figure 3-8 Profil quotidien de la charge.

Les graphiques "3-7" et "3-8" illustrent la consommation d'énergie à la fois annuelle et quotidienne du moteur électrique, avec une consommation quotidienne de 120 kWh/jour. Cela reflète la quantité d'électricité utilisée sur une base annuelle et quotidienne. L'examen de ces données permet d'identifier les tendances de consommation, les périodes de pointe et les fluctuations saisonnières potentielles. Ces informations sont cruciales pour la gestion de l'énergie, la planification des ressources et l'adoption de mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique. Elles peuvent également être utilisées pour évaluer les besoins en énergie renouvelable et pour concevoir des solutions durables répondant à la demande énergétique.

3.3.1 Architecture du système

La figure "3-9" représente le système global examiné à l'aide du logiciel HOMER, incluant les panneaux solaires, le groupe diesel, les convertisseurs, les batteries et le réseau électrique.

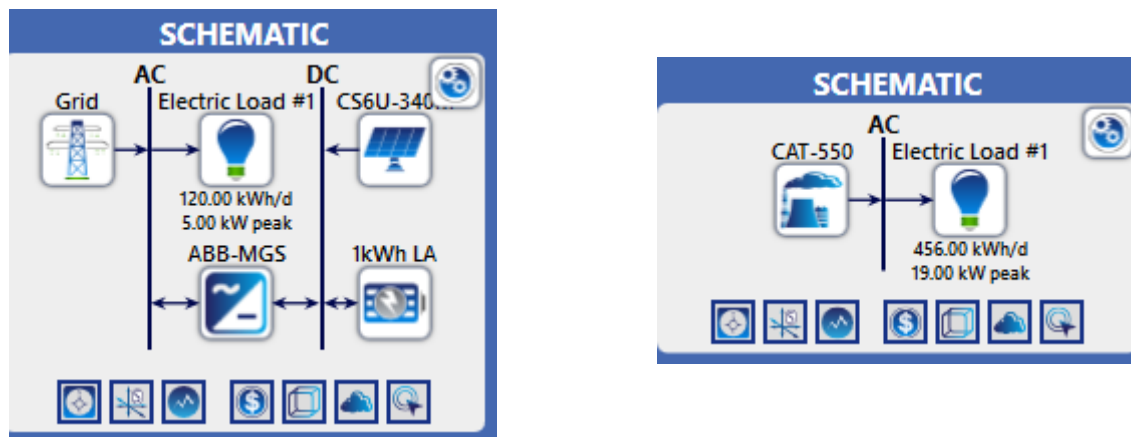


Figure 3-9 Schéma du système hybride.

3.3.2 Configuration du générateur diesel

Le générateur étudié est un générateur diesel conçu pour s'adapter automatiquement à la demande de charge, sans disposer de capacité de stockage excédentaire. Il ajuste également sa consommation de carburant en fonction de sa taille. Le tableau 3 illustre les caractéristiques techniques de ce générateur dans notre étude.

- Caractéristiques du générateur diesel

Tableau 3 Caractéristiques du générateur diesel.

CAT-550kVA	
Capacité	440 kW
Carburant	Diesel
Interception de la courbe de carburant	7.5 L/hr
Pente de la courbe de carburant	0.2 L/hr/ kw
Émissions	CO (g / L de carburant) : 3.90
	HC non brûlé (g / L) : 0.03
	Particules (g / L de carburant) : 0.09
	Carburant soufre à PM (%) : 0

	NOx (g / L de carburant) : 22.77
Propriétés du carburant	Valeur calorifique inférieure : (MJ / kg) : 43.2
	Densité (Kg / m3) : 820
	Teneur en carbone (%) : 88
	Teneur en soufre (%) : 0.4

- Charge alimentée par le générateur diesel

Le générateur diesel alimente une charge quotidiennement à une valeur de 456 kWh/jour.

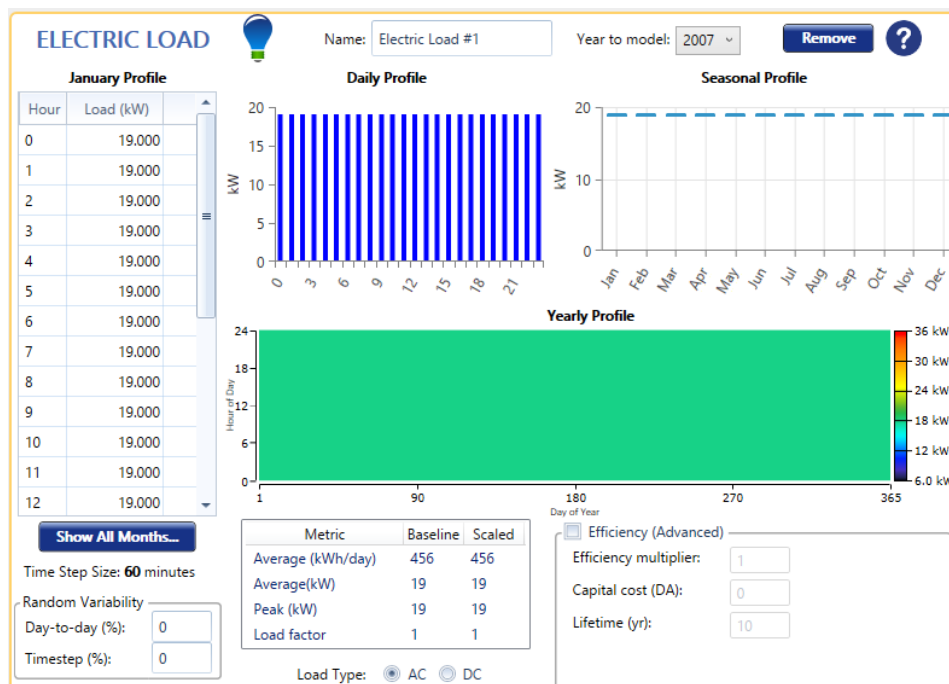


Figure 3-10 Charge alimenté par générateur diesel.

3.3.3 Configuration des panneaux photovoltaïques

Nous avons choisi un panneau solaire modèle CS6U-340M construit par CanadianSolar de puissance crête de 340 Wc., commercialisé sur le marché algérien représenté par la figure "3-11".

PV Name: CanadianSolar MaxPower CS6U-340M Abbreviation: CS6U-3

Properties
 Name: CanadianSolar MaxPower CS6U-340M
 Abbreviation: CS6U-340M
 Panel Type: Flat plate
 Rated Capacity (kW): 120
 Temperature Coefficient: -0.41
 Operating Temperature (°C): 45.00
 Efficiency (%): 17.49
 Manufacturer: Canadian Solar
 Data Sheet for CS6U-340M
 Notes:
 72 Mono-crystalline cells.
 The MaxPower CS6U mono-crystalline line offers

Cost

Capacity (kW)	Capital (DA)	Replacement (DA)	O&M (DA/year)
1	30,000.00	30,000.00	0.00

Lifetime
 time (years): 25.00

Site Specific Input
 Derating Factor (%): 88.00

Sizing
 HOMER Optimizer™
 Search Space

Electrical Bus
 AC DC

Advanced...

Figure 3-11 Détails du panneau photovoltaïque choisi.

3.3.4 Configuration des batteries

Nous avons choisi un modèle de batterie (Generic 1kWh Lead Acid) de 12V et 83.4Ah . Le nombre de batterie choisi est 160 batteries (8 en série et 20 en parallèle). Les caractéristiques des batteries choisies sont dans la figure "3-12".

STORAGE Name: Generic 1kWh Lead Acid Abbreviation: 1kWh L

Properties
 Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 12
 Nominal Capacity (kWh): 1
 Maximum Capacity (Ah): 83.4
 Capacity Ratio: 0.403
 Rate Constant (1/hr): 0.827
 Roundtrip efficiency (%): 80
 Maximum Charge Current (A): 16.7
 Maximum Discharge Current (A): 24.3
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
 www.homerenergy.com
 This is a generic 12 volt lead acid battery with 1 kWh of energy storage.
 Generic
 homerenergy.com

Cost

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

Lifetime
 time (years): 10.00
 throughput (kWh): 800.00

Site Specific Input
 String Size: 8 Voltage: 96 V
 Initial State of Charge (%): 100.00
 Minimum State of Charge (%): 40.00

Sizing
 HOMER Optimizer™
 Search Space

Figure 3-12 Détails de la batterie.

3.3.5 Configuration du convertisseur

Nous avons choisi le modèle suivant pour le convertisseur « ABB MGS100 ». Les caractéristiques du convertisseur sont mentionnées sur la figure "3-13".

CONVERTER ABB MGS100 Name: ABB MGS100 Remove
 Complete Catalog Abbreviation: ABB-Mt Copy to Library ?

Properties
 Name: ABB MGS100
 Abbreviation: ABB-MGS
[Data Sheet for ABB MGS100](#)
 Notes:
 Load-following converter. Converter features solar PV input, battery connection, grid/genset input, and load output.
 Applications: microgrids, energy access, back-up power for small commercial and industrial facilities, biofuel or diesel

Costs

Capacity (kW)	Capital (DA)	Replacement (DA)	O&M (DA/year)
1	DA90,000.00	DA90,000.00	DA0.0

Click here to add new item

Capacity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 Size (kW)
 0
 20
 40
 60

ABB
www.abb.com
 Contact Centre
contactcentre@in.abb.com
 +91 80 67 143 000

Inverter Input
 Lifetime (years): 15.00
 Efficiency (%): 95.00
 Parallel with AC Generator?

Rectifier Input
 Relative Capacity (%): 60.00
 Efficiency (%): 95.00

Figure 3-13 Détails du convertisseur.

3.3.6 Configuration du réseau

Les données sur le réseau est montré dans la figure "3-14" suivante :

ADVANCED GRID Name: Grid Abbreviation: Grid Remove
 Copy To Library

Simple Rates Real Time Rates Scheduled Rates Grid Extension

Grid Extension

Capital cost (DA/km): 8,000.00
 O&M cost (DA/yr/km): 160.00
 Grid power price (DA/kWh): 0.10

Figure 3-14 Détails du réseau.

3.4 Résultats et interprétations

La simulation effectuée avec Homer Pro a permis d'identifier les solutions les plus optimales pour notre projet. Nous avons choisi d'installer un système photovoltaïque (PV) avec stockage. Cette configuration combine de manière efficace l'énergie solaire et le stockage, ce qui maximise l'utilisation des ressources renouvelables tout en assurant un approvisionnement électrique continu. Le système PV convertit l'énergie solaire en électricité, tandis que le stockage permet de conserver l'excédent d'énergie produit pour une utilisation ultérieure, y compris pendant les périodes de faible ensoleillement. Cette solution améliore notre autonomie énergétique et réduit notre dépendance aux sources d'énergie traditionnelles.

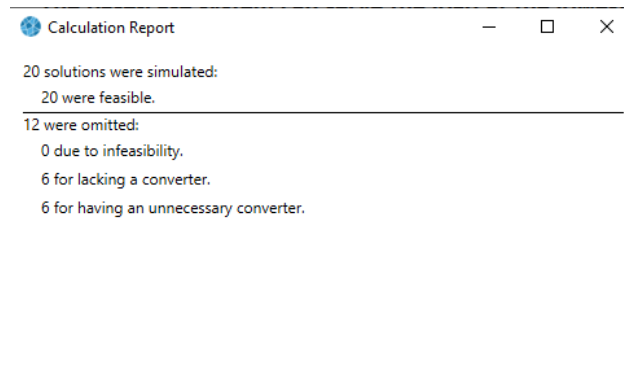


Figure 3-15 Nombre de solution simulé.

Optimization Results

Export... Export Details... Compare Economics Column Choices... Categorized Overall

Architecture				Cost				System		Project Economics		CS6U-340N		
CS6U-340M (kW)	1kWh LA (#)	Grid (kW)	ABB-MGS (kW)	Dispatch	NPC (DA)	LCOE (DA/kWh)	Operating cost (DA/yr)	CAPEX (DA)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	IRR (%)	Simple Payback (yr)	CAPEX	Energy Pri (kWh)
120		999,999	60.0	CC	-DA70,062	-DA0,0274	-DA5,420	DA0,00	88.5	0			0	220,119
120	160	999,999	60.0	CC	DA35,278	DA0,0138	-DA984,12	DA48,000	88.5	0			0	220,119
		999,999		CC	DA56,623	DA0,100	DA4,380	DA0,00	0	0				
	160	999,999	60.0	CC	DA161,962	DA0,288	DA8,815	DA48,000	0	0				

Figure 3-16 Les solutions optimales.

3.4.1 La production du panneau photovoltaïque et la consommation du système

D'après les figures "3-17" et "3-18", le système photovoltaïque (PV) génère 90 % de l'énergie électrique, tandis que le reste provient du réseau électrique. Cette constatation met en évidence la contribution significative des énergies renouvelables, représentées par le système PV, à la production d'électricité. En utilisant principalement l'énergie solaire, le système PV diminue la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles, favorisant ainsi la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement. Cette forte implication des énergies renouvelables est prometteuse et témoigne du potentiel et de l'efficacité croissants des technologies solaires.

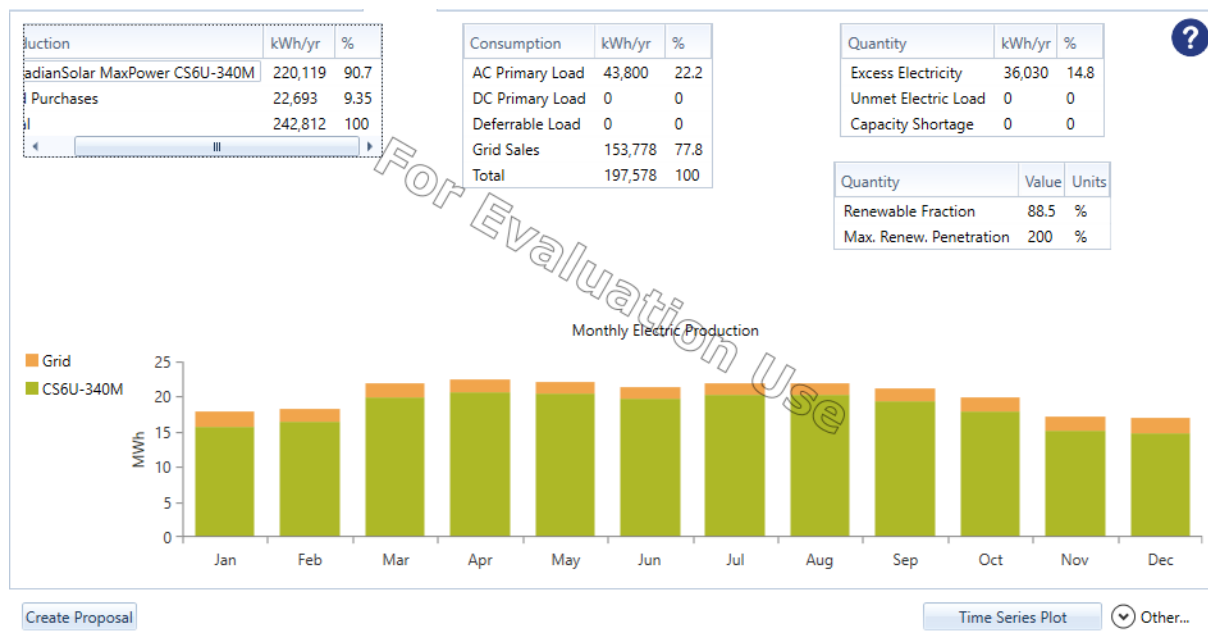


Figure 3-17 La production électrique totale.

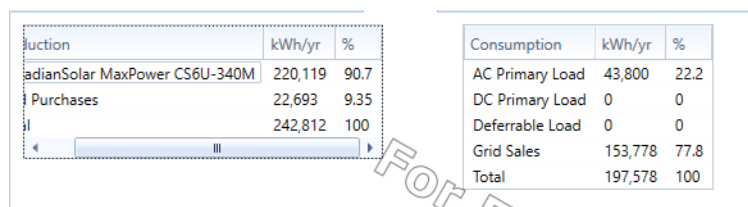


Figure 3-18 Energie et consommation du système.

3.4.2 Puissance d'entrée et sortie du convertisseur

D'après les deux tableaux dans la figure "3-19" nous constatons que l'énergie d'entrée de l'onduleur est 184.089 KWh/ans or que l'énergie de sortie de l'onduleur 174.885 KWh/ans. L'énergie à injecter sur le réseau varie suivant les saisons et l'ensoleillement.

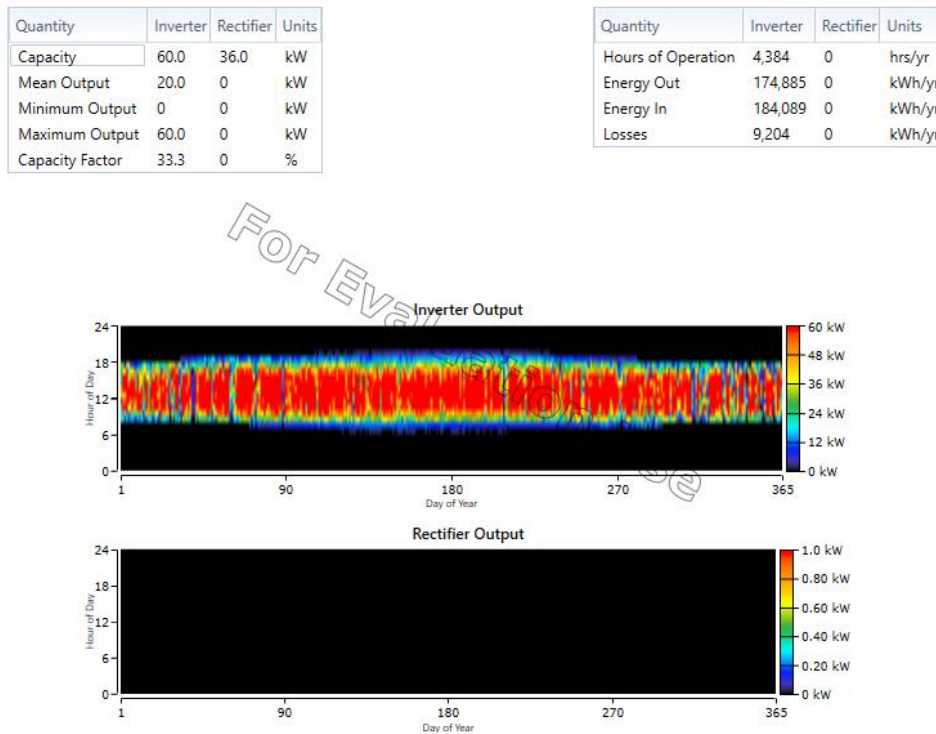


Figure 3-19 Puissance entrée/sortie du convertisseur.

3.4.3 Résultats concernant les batteries

La figure "3-20" illustre la configuration suggérée par Homer pour obtenir une tension de 96V. Cependant, l'autonomie affichée est très limitée, avec une valeur de 19.2 heures. Cela signifie que la fiabilité du système repose principalement sur l'alimentation provenant du réseau électrique plutôt que sur l'énergie stockée dans les batteries. En cas de panne de courant, le système dépend davantage de l'alimentation du réseau que de l'énergie stockée dans les batteries. Il est crucial de tenir compte de cette faible autonomie lors de la planification et de la gestion du système, en garantissant la disponibilité de mesures de secours appropriées pour assurer une alimentation continue en cas de panne du réseau.

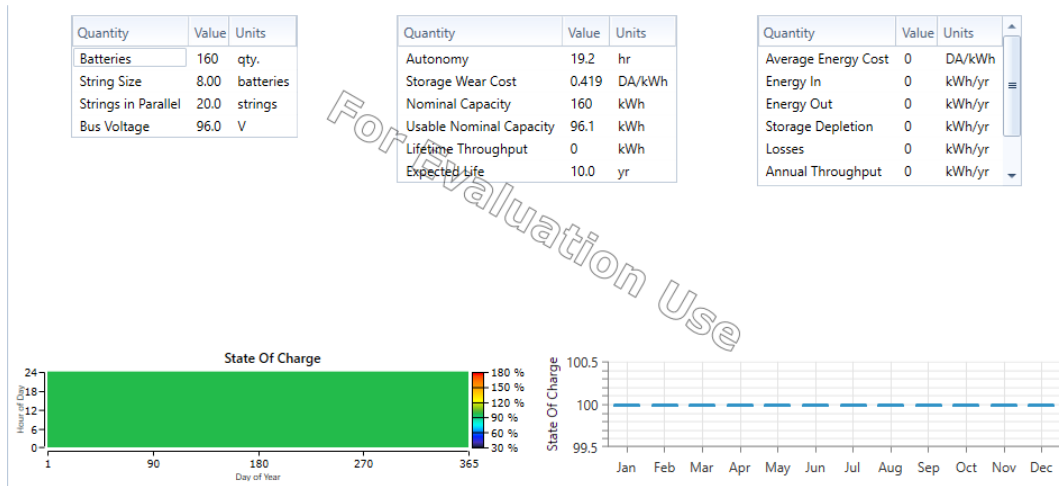


Figure 3-20 Etat de charge des batteries.

3.4.4 Production du champ photovoltaïque

Le graphique "3-21" illustre la production d'électricité par les panneaux solaires, montrant un pic de production à 12h en raison de l'intensité solaire maximale à ce moment-là. Cependant, la production diminue tout au long de la journée et est nulle pendant la nuit en raison de l'absence de lumière solaire. Cette observation souligne la corrélation directe entre la production d'électricité solaire et l'ensoleillement. Il est essentiel de prendre en compte ces variations quotidiennes lors de la planification et de l'utilisation de l'énergie solaire, en maximisant la production pendant les heures de forte luminosité et en ayant recours à des systèmes de stockage d'énergie pour compenser les périodes de faible production. Une bonne compréhension de ces fluctuations dans la production d'électricité solaire est cruciale pour une gestion efficace des ressources et une utilisation optimale de l'énergie solaire.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	120	kW
Mean Output	25.1	kW
Mean Output	603	kWh/d
Capacity Factor	20.9	%
Total Production	220,119	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	120	kW
PV Penetration	503	%
Hours of Operation	4,384	hrs/yr
Levelized Cost	0	DA/kWh
Clipped production	0	kWh

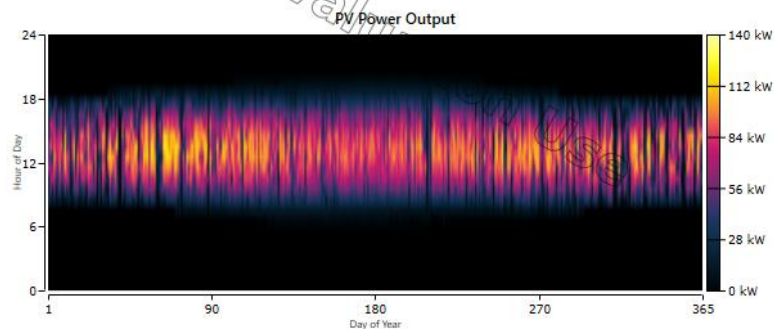


Figure 3-21 Production du champ photovoltaïque.

3.4.5 Résultats concernant le réseau

Les résultats concernant le réseau électrique sont représentés dans la figure "3-22". On peut constater que le réseau joue un rôle crucial en fournissant de l'électricité lorsque la production des panneaux solaires est limitée, notamment pendant la nuit ou lors de conditions météorologiques défavorables. En compensant les fluctuations de la production solaire, le réseau assure une alimentation continue en électricité. Il est aussi notable que la contribution du réseau est plus significative pendant les périodes de faible production solaire, répondant ainsi à la demande énergétique des consommateurs. Cette figure met en lumière la synergie entre la production solaire et le réseau électrique, assurant une alimentation électrique stable et fiable.

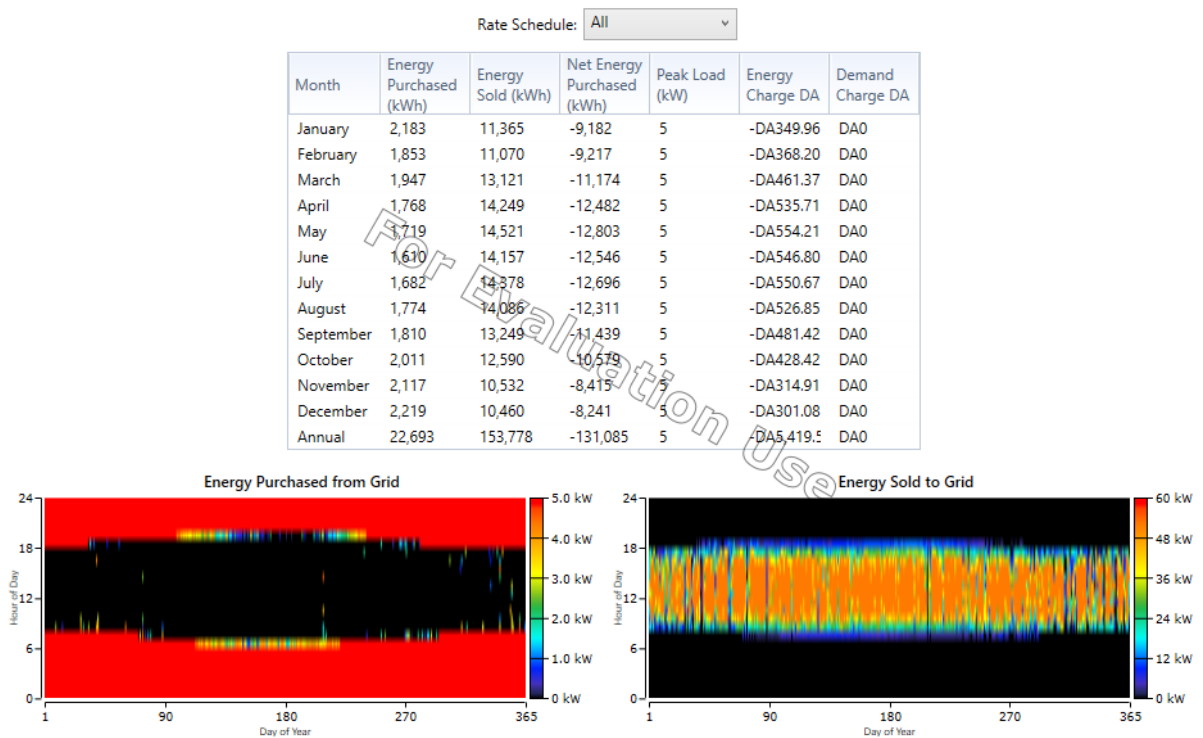


Figure 3-22 Bilan énergétique du réseau.

3.4.6 Résultats concernant les émissions du CO2

Les résultats concernant les émissions (aspect écologique et environnemental) sont présentés dans la figure "3-23". On observe une diminution des émissions de CO2, attribuable à l'utilisation d'une source d'énergie propre. Cette baisse s'explique par l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque, qui ne génère pas de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité. Comparativement aux sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles, l'utilisation de l'énergie solaire contribue à réduire l'empreinte carbone et à atténuer l'impact sur le changement climatique. Cette figure souligne l'importance de promouvoir les énergies renouvelables pour diminuer les émissions de CO2 et préserver l'environnement.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	14,054	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	60.9	kg/yr
Nitrogen Oxides	29.8	kg/yr

Figure 3-23 Les émissions CO2 du système.

3.4.7 Etude économique

Dans le cadre de la transition énergétique, l'utilisation de panneaux photovoltaïques (PV) pour alimenter un système de propulsion hybride constitue une alternative durable aux sources d'énergie conventionnelles. Cette étude économique, réalisée à l'aide du logiciel Homer PRO, examine les coûts et les avantages d'un système intégrant des panneaux PV, des onduleurs, des batteries et le réseau électrique. L'objectif est d'évaluer la viabilité économique de cette solution en analysant les coûts d'installation, d'entretien et les économies potentielles sur le long terme grâce à la réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂.

Le système étudié comprend les principaux composants suivants :

- Panneaux photovoltaïques (PV)
- Onduleurs
- Batteries
- Réseau électrique est utilisé en cas de faible production des panneaux photovoltaïques

- **Analyse des Coûts**

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

Tableau 4 Prix unitaire et total des principaux composants.

Composant	Prix unitaire en DA	Total en DA
Panneau photovoltaïque	30,000	3,600,000.00
Batterie	50,000	161,776.72
Onduleur	90,000	2,419,958.18

- **Résultat économique avec HOMER Pro**

Les résultats économiques obtenus à partir de la simulation avec Homer PRO sont présentés dans la figure "3-24" ci-dessous.

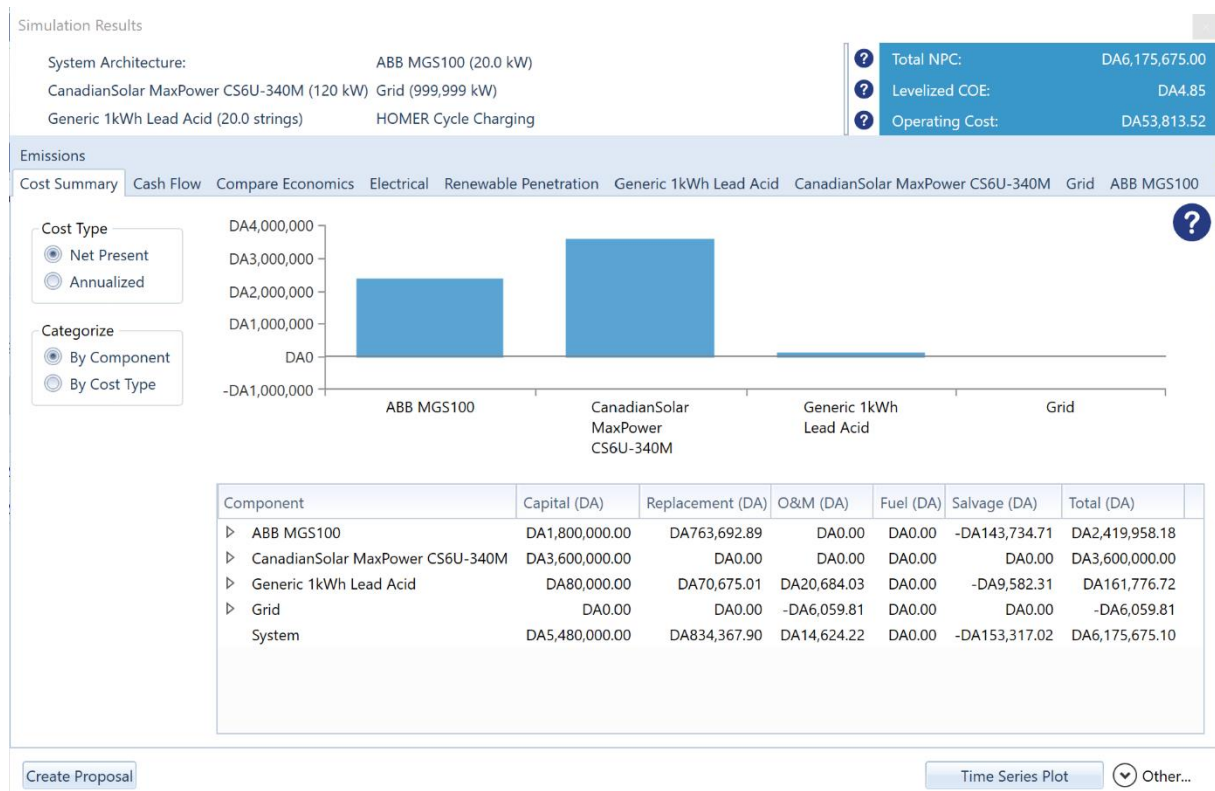


Figure 3-24 Résultats économiques avec HOMER Pro.

Le cout total de l’installation est estimé à 6,175,675.10 DA

Cette analyse économique a révélé que l'utilisation de systèmes photovoltaïques pour alimenter système de propulsion hybride diesel-électrique représente une solution durable et rentable. Les résultats indiquent que, bien que les coûts d'installation initiaux soient élevés, les économies à long terme et la diminution des émissions de CO₂ rendent cette option viable et avantageuse pour l'industrie maritime.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude s'est plongée dans les complexités de la propulsion maritime, soulignant l'urgence de solutions durables pour répondre aux défis environnementaux. Au cœur de notre investigation, nous avons examiné en profondeur l'efficacité d'un système de propulsion hybride, incluant des panneaux solaires, dans le but de proposer des alternatives respectueuses de l'environnement tout en maintenant l'efficacité opérationnelle des flottes maritimes.

Dans le premier volet de notre recherche, nous avons mené une analyse exhaustive des principes de fonctionnement des panneaux photovoltaïques dans le contexte naval. Cette exploration a impliqué une évaluation minutieuse de leurs applications potentielles, mettant en balance leurs avantages et inconvénients, tout en prenant en compte les connaissances antérieures.

Le deuxième volet de notre étude s'est concentré sur la sélection et les caractéristiques des moteurs pour les systèmes hybrides. Nous avons mis en lumière les avantages spécifiques des moteurs hybrides diesel-électrique, tout en nous appuyant sur des études existantes pour définir les critères de sélection adaptés aux besoins variés des navires.

Le troisième volet de notre recherche a constitué une étape essentielle où nous avons procédé à des simulations détaillées pour évaluer les performances du système de propulsion hybride. Cette analyse a inclus une évaluation approfondie de l'efficacité énergétique ainsi que des réductions potentielles des émissions de CO₂. Nos conclusions ont été étayées par des comparaisons avec d'autres systèmes de propulsion, et nos recommandations d'amélioration ont été formulées en tenant compte des recherches antérieures.

Nos résultats montrent que les panneaux photovoltaïques et le réseau électrique peuvent conjointement alimenter les batteries, qui à leur tour fournissent de l'énergie au moteur électrique du système de propulsion hybride. Plus précisément, les panneaux photovoltaïques peuvent contribuer à hauteur de 90 % de l'énergie nécessaire, tandis que le réseau électrique ne fournirait que 10 %, ce dernier étant plus coûteux. Le système inclut 160 batteries, soutenues par un onduleur de 60 kW. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, notre système de propulsion hybride a permis de réduire les émissions de CO₂ à seulement 14 kg par an, illustrant ainsi son faible impact environnemental.

En résumé, notre étude met en lumière l'importance cruciale des solutions de propulsion hybride pour une navigation maritime plus durable. Nous appelons à une collaboration continue entre les acteurs de l'industrie maritime, les chercheurs et les décideurs politiques pour encourager

Conclusion générale

l'adoption de telles solutions, tout en respectant les contributions préexistantes, dans le but de promouvoir un environnement maritime plus propre et plus durable.

Bibliographies

- [1] "World Energy Outlook" par International Energy Agency (IEA)
- [2] "Production & Technique" par Eoliennes de Provence
- [3] S. GARCIA. (2022). "Biomass"
- [4] Culture Orinox. (2017). "Orinox visite la centrale thermique EDF de Cordemais"
- [5] BoilingWaterReactor : Wikipedia. (2011). "Schéma d'un Réacteur à Eau Bouillante"
- [6] Salima Ouali. (2015). "Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie"
- [7] Rim Ouadday. (2013). "Étude des structures sandwichs verre/époxy de grandes épaisseurs utilisées comme extension d'avant directrices de turbines hydroélectriques"
- [8] 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 ,2020.
- [9] : Glodi Mbwama Binamen. (2019). "Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour l'alimentation d'un quartier résidentiel"
- [10] B. RAZIKA HAMZA CHERIF NADIR "Proposition d'un système de détection des pannes des cages flottantes" 2023
- [11] 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
- [12] : BOUCHAKOUR ABDELHAK, "Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque", thèse de doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes. 2018.
- [13] 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.
- [14] Parretta, A., et al. 2019. "Performance of Photovoltaic Systems in Marine Environments. Renewable Energy".
- [15] Emma ROBIC. (2024). "Le démantèlement et le recyclage des panneaux solaires"

Bibliographies

- [16] "SYSTÈME DE MONTAGE SOLAIRE" par PREFA
- [17] "Panneau solaire souple sur bimini" par HISSE ET OH
- [18] "Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, basé sur la modélisation par les flux de puissance" Par Florian Dupriez-Robin
- [19] Vincent, F. (2015). *Les embarcations maritimes : Classification et Utilisation*. Marseille, France : Presses Universitaires Maritimes.
- [20] Solène, canal reporter. (2018). "Osez la croisière en voilier !"
- [21] ARTHUR DEVRIENDT. (2022) "Amphitrite fusionne les données satellite et ouvre la voie au routage intelligent des navires"
- [22] J.GUIVARCHI, Defense zone. (2023) "Les plus grandes marines du monde"
- [23] "FERRETTI 580" par Ferretti Yachts
- [24] 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"
- [25] Rama, Wikipedia. (2005) "Turbine haute pression Sulzer"
- [26] "Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines" par Doug Woodyard
- [27] : "Modélisation et Simulation d'un système de distribution d'énergie du type diesel-électrique pour un navire marchand" par Kaouter EL JAMALI
- [28] Bosch, K., et al. (2019). "Hybrid Propulsion Solutions for Ships". In Proceedings of the International Conference on Marine Engineering and Technology.
- [29] "Définition et critères de l'hybridation dans la propulsion des véhicules" Scordia, J. (2004)
- [30] L'Organisation Maritime Internationale (OMI)
- [31] Slah Farhani. (2019). "Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques"
- [32] Ikeda, Y. (2013). "Hybrid Electric Propulsion System for Ships". In Marine Technology and Engineering (pp. 207-215). Springer, Tokyo.
- [33] Hybride voiture. (2012) "Les montages hybrides"

Bibliographies

- [34] Alf Kåre Ådnanes, "*Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion*", document de ABB AS Marine, 22-04-2003.
- [35] Bosch, K., et al. (2019). "*Hybrid Propulsion Solutions for Ships*". In Proceedings of the International Conference on Marine Engineering and Technology.
- [36] "*Hybrid Electric Propulsion Systems for Ships: A Review*" S.N. Trivedi, N.H. Ravikumar, A.K. Singh "*Journal of Marine Engineering & Technology*" 2020
- [37] Cleary, J. (2016). "*Hybrid Electric Propulsion for Marine Vessels: Advantages and Challenges*". *Journal of Marine Engineering & Technology*, 15(3), 145-156
- [38] Julie Delahaye. (2019) "*New cruise ship entirely powered by batteries takes to sea for first time*"
- [39] Espace des Sciences (2015). "*Quel impact sur la vie marine ?*" Disponible sur : Espace des Sciences (Espace des Sciences).
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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
- [43] Semantic Scholar. (2011). "*Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls*"
- [44] 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.
- [45] Loumi Maya, Hamitouche Salma, "*Étude et simulation d'un jumelage éolien-diesel sous HOMER*", Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.