

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI**

**AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES  
NAVIRES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées

PAR

**©HERITIER NTIKALA BOMPOLA**

**Septembre 2019**



**Composition du jury :**

**Mohamed Yasser Hayyani, PhD, Président du Jury, Université du Québec à Rimouski**

**Adrian Ilinca, ing, PhD, Directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Mohamed Naceur Zidi, ing,jr, M.Sc, Examineur externe, Innovation Maritime**

Dépôt initial le 31 juillet 2019

Dépôt final le 5 septembre 2019



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



## ***REMERCIEMENTS***

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, le Professeur **Adrian ILINCA**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'Université du Québec à Rimouski, tous les intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, **Virginie BAKILA SODI** et **Henri Benjamin NTIKALA BOOTO**, qui ont toujours été là pour moi.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à mes sœurs et mes frères pour le soutien et la confiance qu'ils m'ont témoignés au cours de mes années d'études.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les collègues qui m'ont apporté leur appui moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je remercie tous mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur assistance inconditionnelle et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À toutes ces personnes, je présente mes très sincères remerciements, mon immense respect et ma profonde gratitude.



## *AVANT-PROPOS*

Ce projet a été réalisé au laboratoire de recherche en énergie éolienne (LREE) à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Il est présenté sous la forme d'un mémoire.

L'augmentation des frais de transport maritime due aux prix du carburant ainsi que les restrictions croissantes imposées par les nouvelles politiques écologiques en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> et du NO<sub>x</sub>, ont poussé les entreprises maritimes à promouvoir l'intégration des technologies utilisant des sources d'énergies renouvelables sur leurs navires. Une de ces sources favorables, est l'utilisation des panneaux photovoltaïques (PV).

Toutefois, de nombreuses barrières persistent quant à leur intégration à bord des navires, caractérisés par la présence des zones restreintes empêchant ainsi la production d'une quantité suffisante de puissance, et leurs performances en climat froid et saline.

Dans le présent travail, l'amélioration de l'efficacité énergétique des navires s'exprime comme le facteur majeur de la protection de l'environnement (prévention de la pollution marine et atmosphérique due aux génératrices de navires qui fonctionnent 24 heures sur 24 dans un port).

Il est question dans la première partie du deuxième chapitre, de la compréhension de la construction navale en générale et, pour la deuxième partie, du secteur maritime.

Dans le troisième chapitre, il sera question d'exposer toutes les solutions pouvant être adoptées en vue de rendre les ports receveurs des navires aussi moins polluants que sécuritaires pour les riverains. Tous les règlements relatifs à la qualité et à la sécurité des ports ont été analysés dans ce chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous avons modélisé un système permettant de mettre à l'arrêt tous les générateurs des navires lorsque ces derniers sont accostés. Ce système a, par la suite, été modélisé sous Matlab/Simulink dans le cinquième chapitre et, par la suite, les résultats obtenus seront validés avec le logiciel RETScreen.



## **RÉSUMÉ**

**Mots clés** : Construction navale, transport maritime, énergie solaire, navire à propulsion hybride

Plus de 90% du commerce mondial se fait par le transport maritime mondial, avec plus de 90 000 navires. Tous les modes de transport utilisant des combustibles fossiles, sont les grandes causes des pollutions atmosphériques. Les NOx et SOx ont un impact sur la qualité d'air tandis que le CO2 a un impact global sur le climat. La quantité des gaz d'échappement émis par les moteurs marins dans l'atmosphère est directement liée à la consommation totale de carburant. Dans le domaine maritime, il y a 3 types de diesel :

- Marine Diesel Oil (MDO)
- HFO (Heavy fuel oil)
- IFO (Intermediate fuel oil).

Outre la détérioration du changement climatique, les émissions des navires ont été accusées de représenter un risque grave pour la santé humaine. Seules les émissions marines peuvent causer chaque année environ 60 000 décès cardiopulmonaires et cancéreux. Le secteur des transports maritimes est responsable d'une part importante du problème mondial du changement climatique.

Plus de trois pour cent des émissions mondiales de dioxyde de carbone peuvent être attribués aux navires de haute mer. Il s'agit d'un pourcentage comparable et l'industrie continue de croître à un rythme rapide. En fait, si le transport maritime mondial était un pays, il serait le sixième producteur de gaz à effet de serre en importance. Seuls les États-Unis, la Chine, la Russie, l'Inde et le Japon émettent plus de dioxyde de carbone que les autres flottes du monde [2].

L'Organisation maritime internationale (OMI) qui est l'institution spécialisée des Nations Unies chargée d'assurer la sécurité et la sûreté des transports maritimes et de prévenir la pollution des mers par les navires, a assumé la responsabilité des questions de pollution et a, par la suite, adopté au fil de nombreuses années une large gamme de mesures visant à prévenir et à maîtriser la pollution due aux navires et à atténuer les effets de tout dommage susceptible d'être provoqué par des activités et accidents maritimes.

Plusieurs technologies ont été introduites pour réduire le niveau d'émissions nocives dans le système d'échappement du moteur Diesel marin. Les méthodes pour réduire les émissions des oxydes d'azote (NOx) sont :

- Injection directe de l'eau : L'injection d'eau se fait directement dans la chambre de combustion à travers une buse
- La recirculation des gaz d'échappement : Le système de recirculation des gaz d'échappement (en anglais Exhaust Gas Recirculation EGR)
- Méthode de l'air humide
- Saturation de l'air de combustion

- Turbocompresseur à deux étages
- Les méthodes pour réduire les l'émission des oxydes de soufre (SOx)
- Le mazout à faible teneur en soufre
- Lubrification intelligente des cylindres

S'attaquer à la crise du changement climatique nécessite un effort concerté de toutes les industries, y compris du transport maritime. Bien que le transport maritime puisse être plus efficace que les avions ou les camions, il représente sans aucun doute une source très importante de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre. Cependant, comme tous les pays du monde doivent réduire leurs émissions, le secteur des transports maritimes devrait être associé à ce processus.

## *ABSTRACT*

Over 90 percent of world trade is made through the oceans of the world, with more than 90,000 vessels. As all modes of transport use fossil fuels, ships also produce significant CO<sub>2</sub> emissions, contributing to climate change and acidification of the oceans. In addition to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), ships release a multitude of other pollutants that also contribute to this problem. In the maritime domain, there are 3 types of diesel:

- Marine Diesel Oil (MDO)
- HFO (Heavy fuel oil)
- IFO (Intermediate Fuel Oil).

In addition to the deterioration of climate change, shipping emissions have been accused of posing a serious risk to human health. Emissions alone of shipping can account for about 60,000 cardiopulmonary and cancerous deaths every year.

The shipping industry is responsible for a significant proportion of the world's climate change problem. More than three percent of global carbon dioxide emissions can be attributed to seagoing ships. This is a comparable percentage and the industry is continuing to grow at a rapid pace. In fact, if global shipping was a country, it would be the sixth largest greenhouse gas producer. Only the United States, China, Russia, India and Japan emit more carbon dioxide than the rest of the world's fleets. Today, the emissions of carbon dioxide from seagoing ships are unchecked [2].

The International Maritime Organization (IMO), the United Nations specialized agency responsible for ensuring the safety and security of maritime transport and preventing marine pollution from ships, has assumed responsibility for pollution issues and has subsequently adopted over a number of years a wide range of measures to prevent and control ship-source pollution and to mitigate the effects of any damage that may be caused by maritime activities and accidents.

Several technologies have been introduced to reduce the level of harmful emissions in the marine diesel engine exhaust system. The methods to reduce emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) are:

- Direct injection of water: The injection of water is done directly in the combustion chamber through a nozzle
- Exhaust gas recirculation: The Exhaust Gas Recirculation (EGR) system
- Humid air method
- Saturation of the combustion air
- Two-stage turbocharger
- Methods to reduce the emission of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>)
- Low sulfur fuel oil
- Intelligent cylinder lubrication

Addressing the crisis of climate change requires a concerted effort by all industries, including maritime transport. While maritime transport can be more efficient than airplanes or trucks, they are undoubtedly a very important source of carbon dioxide and other greenhouse gases. However, just as all nations in the world must reduce their emissions, so the shipping industry should be included in this process.

***Keywords:*** Shipbuilding, shipping, solar energy, hybrid power ship

## *TABLE DES MATIÈRES*

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>VII</b>
<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>IX</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XIII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>XXI</b>
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>27</b>
<b>CHAPITRE 2 LA CONSTRUCTION NAVALE ET LE TRANSPORT</b>	
<b>MARITIME .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 LA CONSTRUCTION NAVALE.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.1. Construction, entretien et réparation des navires .....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.2. La construction navale et les impacts concomitants du secteur</b>	
<b>maritime sur l'environnement .....</b>	<b>43</b>
<b>2.2 LE TRANSPORT MARITIME MONDIAL.....</b>	<b>55</b>
<b>2.2.1. Le transport maritime au Québec .....</b>	<b>57</b>
<b>2.3 CONCLUSION .....</b>	<b>65</b>
<b>CHAPITRE 3 ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DES NAVIRES A QUAI.....</b>	<b>67</b>
<b>3.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>67</b>
<b>3.1.1. Les émissions polluantes des navires.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2. LES SOLUTIONS POUR REDUIRE EMISSIONS POLLUANTES DES NAVIRES AU</b>	
<b>PORT .....</b>	<b>74</b>
<b>3.2. 1. Le raccordement électrique des navires à quai.....</b>	<b>74</b>



5.3.1. Définition et but du logiciel RETScreen .....	147
5.3.2. Lieu du projet.....	147
5.3.3. Simulation.....	148
5.3.4. Résultats de la simulation.....	153
5.4 ÉVALUATION ECONOMIQUE.....	156
<b>CHAPITRE 6 CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>159</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>165</b>



## ***LISTE DES TABLEAUX***

Tableau 1 : Activités de transport maritime international .....	56
Tableau 2 : Comparaison de l'intensité des émissions de GES en 2010 .....	62
Tableau 3 : Facteurs d'émission de gaz d'échappement pour les générateurs à moteur diesel [33] .....	70
Tableau 4 : La demande de puissance de tous les types de navires au port [45] .....	78
Tableau 5 : Puissance électrique demandée par type de navire .....	79
Tableau 6 : Niveau de tension selon le type de navire.....	80
Tableau 7 : Fréquences et tension pour les navires .....	80
Tableau 8: Limites de teneur en soufre avec l'approche progressive (% wt).....	84
Tableau 9 : La puissance requise pour différents navires [54] .....	89
Tableau 10 : Les projets de l'alimentation électrique des navires à quai financés par le PAQP, par province (Crédit : Transports Canada) .....	92
Tableau 11 : Différences des coûts unitaires de l'énergie électrique entre nations [56] .....	94
Tableau 12 : Consommation moyenne pour 500 kW et 650 kW à différentes charges appliquées. ....	102
Tableau 13 : Estimation du coût annuel en carburant pendant le voyage.....	103
Tableau 14 : Estimation du coût annuel en carburant au port .....	103

Tableau 15 : Les performances électriques et les caractéristiques du module KC200GT.	115
Tableau 16 : Performances électriques du module PV .....	130
Tableau 17 : Caractéristiques et performances électriques du module KC200GT .....	131
Tableau 18 : Caractéristiques détaillées de la batterie BAT412201100 .....	132
Tableau 19 : Information sur le projet – RETScreen .....	153
Tableau 20 : Evaluation des ressources - RETScreen.....	153
Tableau 21 : Etude du module photovoltaïque - RETScreen.....	154
Tableau 22 : L'onduleur - RETScreen .....	155
Tableau 23 : Le sommaire – RETScreen .....	155

## ***LISTE DES FIGURES***

Figure 1 : Le soudage oxyacéthylique .....	36
Figure 2 : Le soudage par résistance.....	37
Figure 3 : Le soudage à l'arc électrique.....	38
Figure 4 : Le soudage Laser.....	39
Figure 5 : Le soudage Plasma .....	39
Figure 6 : Fourchette type d'efficacité des navires en termes de CO2 par rapport aux transports terrestres [1] .....	46
Figure 7 : Coût par option de la réduction moyenne marginale de CO2 – flotte marchande mondiale en 2030 [16] .....	48
Figure 8 : Le navire MS Beluga SkySails.....	49
Figure 9 : Le navire MV Auriga Leader .....	51
Figure 10 : Marées noires accidentelles de moyenne et grande envergure : moyenne annuelle de marées noires par décennie (1970-2009) .....	54
Figure 11 : Réseau Grands Lacs. Voie maritime [24] .....	59
Figure 12 : Réseau portuaire commercial stratégique du Québec [25].....	60
Figure 13 : Comparaison de l'efficacité énergétique – Flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010) [26] .....	61

Figure 14 : Comparaison des PCA pour la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010).....	64
Figure 15 : Typologie des navires selon leur profil de consommation d'électricité a quai .	67
Figure 16 : Répartition mondiale des émissions de CO2 du transport maritime en 2015 [35] .....	71
Figure 17 : Echancier de la réduction des SOx ( <i>Source : www.imo.org</i> ).....	73
Figure 18 : Exemple illustratif de l'alimentation électrique à quai [42] .....	75
Figure 19 : Séquences de connexion et déconnexion [27] .....	81
Figure 20 : Synchronisation Shore-Navire [28] .....	82
Figure 21 : Les modes de transport convenants au GNL .....	85
Figure 22 : NM F.-A.-Gauthier (Premier traversier à être propulsé au GNL en Amérique du Nord) [52].....	87
Figure 23 : Navire FERBEC .....	101
Figure 24 : Disposition des générateurs du navire FERBEC .....	104
Figure 25 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	105
Figure 26 : Courbe I-V à T=25 °C et un éclairement de 1000W/m <sup>2</sup> .....	108
Figure 27 : Schéma simplifié du système.....	109
Figure 28 : Implantation Simulink masquée du PVG .....	110
Figure 29 : Influence de la température et de l'ensoleillement G sur les courbes I-V et P-V .....	111
Figure 30 : Environnement Matlab .....	113

Figure 31 : Synoptique d'un générateur photovoltaïque autonome.....	114
Figure 32 : Caractéristique I-V et P-V du cellule PV idéal .....	115
Figure 33 : Le module PV KC200GT.....	117
Figure 34 : Les spécifications physiques du module PV KC200GT .....	117
Figure 35 : Le module PV sous Matlab/Simulink à T=25 °C et E=1000 W/m <sup>2</sup> .....	118
Figure 36 : Courbe I-V du module KC200GT T=25 °C et E=1000 W/m <sup>2</sup> .....	119
Figure 37 : Courbe P-V du module KC200GT T=25 °C et E=1000 W/m <sup>2</sup> .....	120
Figure 38 : Le module PV sous Matlab/Simulink à T=25 °C et E=800 W/m <sup>2</sup> .....	121
Figure 39 : Courbe I-V du module KC200GT T=25 °C et E=800 W/m <sup>2</sup> .....	121
Figure 40 : Figure 41 : Courbe P-V du module KC200GT T=25 °C et E=800 W/m <sup>2</sup> .....	122
Figure 42 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V .....	124
Figure 43 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V .....	125
Figure 44 : Graphe de la P-I pour un module PV .....	126
Figure 45 : Graphe de la P-I pour quatre modules PV.....	127
Figure 46 : Graphe de la P-V pour un module PV.....	128
Figure 47 : Graphe de la P-V pour quatre modules PV .....	129
Figure 48 : Diagramme de l'organigramme de calcule nombre de stockage.....	133
Figure 49 : Variation de la puissance en fonction de temps (hiver) .....	134
Figure 50 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (hiver).....	134
Figure 51 : Variation de la puissance en fonction de temps (printemps) .....	135

Figure 52 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (printemps) .....	135
Figure 53 : Variation de la puissance en fonction de temps (été) .....	136
Figure 54 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (été) .....	136
Figure 55 : Variation de la puissance en fonction de temps (automne) .....	137
Figure 56 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (automne)	137
Figure 57 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 100 % de charge	139
Figure 58 : Mesure de la tension à 100 % de charge.....	140
Figure 59 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 80 % de charge .	141
Figure 60 : Mesure de la tension à 80 % de charge.....	142
Figure 61 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 50 % de charge .	143
Figure 62 : Mesure de la tension à 50 % de charge.....	144
Figure 63 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 1000 \text{ m}^2$ .....	144
Figure 64 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 800 \text{ m}^2$ .....	145
Figure 65 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 900 \text{ m}^2$ .....	145
Figure 66 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 700 \text{ m}^2$ .....	146
Figure 67 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 600 \text{ m}^2$ .....	146
Figure 68 : Courbes I-V et P-V pour $\Psi= 500 \text{ m}^2$ .....	147
Figure 69 : Température mensuelle de l'air .....	149
Figure 70 : Humidité relative .....	149

Figure 71 : Rayonnement solaire quotidien.....	150
Figure 72 : Pression atmosphérique.....	150
Figure 73 : Vitesse du vent .....	151
Figure 74 : Température du sol.....	151
Figure 75 : Degrés-jours de chauffage.....	152
Figure 76 : Degrés-jours de climatisation.....	152



## **CHAPITRE 1**

### **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La flotte marchande mondiale a cru de 5,7 % en 2005 et va accroître de 75 % d'ici 2020. Cette flotte compte environ 100 000 navires qui consomment annuellement environ 250 millions de tonnes de combustible. Un seul vraquier utilise 40 tonnes ou plus de carburant par jour, ce qui se traduit par une consommation annuelle d'environ 10 400 tonnes et l'émission d'environ 32 988 tonnes de CO<sub>2</sub> et 959 tonnes de SO<sub>x</sub>. Juste pour un navire [3].

Le transport maritime constitue le principal pilier du commerce mondial et le principal moteur de la mondialisation. Les ports du monde entier gèrent environ 90% du commerce mondial et 70% en valeur. Il existe plus de 2 000 ports répartis dans le monde entier, qui constituent le principal centre de croissance économique et de pollution dans les zones de côtes [4]. Considéré comme l'un des moyens de transport les plus économiques au monde, le transport maritime a joué un rôle important dans le développement de l'économie mondiale. Cependant, avec l'expansion du volume du commerce mondial et l'augmentation de la demande d'énergie pour le transport maritime, divers les problèmes environnementaux causés par le secteur des transports maritimes sont également devenus de plus en plus importants [5].

Au 21<sup>ème</sup> siècle, l'énergie utilisée par les navires devrait être durable. Ces dernières années, des recherches approfondies ont été menées sur l'application d'énergies propres, telles que le gaz naturel liquéfié (GNL), les piles à combustible (par exemple, le Water-Go-Round), l'énergie éolienne (E-Ship 1) et l'énergie solaire (Race for Water) sur les navires, et de nombreux résultats remarquables ont été obtenus. Toutefois, en tant que sources d'énergie primaires, les énergies propres, telles que le GNL et l'énergie solaire, ne peuvent pas être directement appliquées aux équipements électriques des navires, mais doivent être converties

en énergie électrique ou en d'autres sources d'énergie secondaire au moyen de dispositifs de conversion de l'énergie. En outre, énergie propre [3]. Mais, il existe plusieurs bateaux qui utilisent des propulseurs électriques [3].

Les différentes sources doivent être considérées pour évaluer la pollution atmosphérique dans les zones portuaires. On peut identifier les navires, les camions, les services portuaires, les trains ou un autre équipement dédié au transport de la cargaison. La plupart d'entre eux utilisent des moteurs diesel pour se déplacer. Ainsi, ces véhicules ont un impact important sur la qualité de l'air en raison des gaz à effet de serre (GES) et des particules ou suies (PM) des gaz d'échappement. On peut noter certaines stratégies visant à réduire ou à éliminer la pollution atmosphérique dans les zones de côtes, les bassins ou les ports de terminaux. Par exemple, il existe des restrictions temporelles concernant le ralenti moteur des camions, l'utilisation de carburants de substitution, de mazouts à faible teneur en soufre, la conception écologique de nouveaux terminaux portuaires, les émissions de GES dans les zones portuaires ou l'alimentation électrique à terre [6].

Des études récentes estiment qu'environ 15% de la contribution des émissions mondiales de NOx sont causés par les navires. En revanche, les émissions de SO2 se situent entre 4 et 9% [7]. Dalsøren [8] a conclu que les navires représentaient 6% de la consommation de carburant aux stades de l'hôtellerie. Cette valeur comprend environ 11 millions de tonnes par an.

Aujourd'hui, il faut une consommation d'énergie considérable lors de l'amarrage des navires, principalement à partir de moteurs auxiliaires. Cette consommation est nécessaire pour charger et décharger la cargaison, le système de chauffage, le système d'éclairage, ainsi que pour d'autres activités nécessaires au maintien des opérations du navire au port. Cependant, la production d'énergie à bord provoque une pollution, principalement par les gaz d'échappement des générateurs diesel, le bruit ou les vibrations des machines. Comme cela a été exposé, ces machines auxiliaires, qui restent en service pendant l'hôtellerie, posent le principal problème environnemental dans les villes situées à proximité de terminaux

portuaires ou de bassins portuaires. La pollution atmosphérique touche principalement les travailleurs du port ou les personnes vivant à proximité du port [6].

Les sources d'énergie sont toutes des sources d'énergie de faible densité et l'application d'une seule source d'énergie propre est très limitée. Lorsque l'on considère les différences en termes de structure de navires, de zones de navigation et de caractéristiques d'exploitation, la technologie de navire hybride basée sur l'utilisation complète de sources d'énergie multiples a déclenché un nouveau cycle de recherche.

Il est donc possible d'établir un réseau de distribution local à partir du réseau local ou d'autres sources en tant que solution de remplacement appropriée de la production d'électricité à bord. Ainsi, les navires peuvent éviter ou réduire au minimum les effets de la pollution dans les terminaux portuaires au cours de la phase d'hôtellerie. Cette solution permet donc de réduire les émissions de GES des navires lors de leur amarrage.



## **CHAPITRE 2**

### **LA CONSTRUCTION NAVALE ET LE TRANSPORT MARITIME**

#### **2.1 LA CONSTRUCTION NAVALE**

L'impact le plus direct de la construction navale sur l'environnement provient naturellement de l'activité même des chantiers navals qui, hormis la construction des navires, comprend généralement aussi l'entretien des navires et les services de réparation. Chacun de ces processus est en soi une tâche très importante qui comprend de nombreuses opérations intermédiaires [9]. Dans le cas de la construction navale, il s'agit en particulier de :

- La manipulation de matières premières, la construction et le traitement de surface des pièces d'acier de base
- L'assemblage et le montage des éléments préfabriqués pour réaliser des modules
- Le montage des structures du navire moyennant l'ajustage et le soudage des modules
- Le montage des équipements électroniques du navire
- La préparation et l'installation des diverses parties préfabriquées qui ne sont pas des structures

Les opérations d'entretien et de réparation comprennent généralement :

- Le nettoyage et le traitement des surfaces
- Les opérations de transfert du mazout
- L'entretien des machines et autres équipements.

La construction navale est une industrie qui fabrique des produits (navires, structures offshore, installations flottantes, etc.). L'industrie est une grosse consommatrice d'énergie, essentiellement de l'électricité dont la production a ses propres impacts sur l'environnement et le changement climatique. Certains chantiers navals n'ont parfois guère le choix de leurs

sources d'électricité mais si des sources d'énergie renouvelables sont disponibles, les constructeurs de navires devraient envisager de les utiliser.

Les activités de construction, d'entretien et de réparation impliquent la production et la manipulation quotidienne de nombreux matériaux, vapeurs et fluides toxiques. Le travail des métaux et le traitement des surfaces par exemple occasionnent des émissions de matières particulaires et peuvent entraîner le rejet de composés toxiques dans le sol et dans l'eau. L'entretien courant produit des fluides de vidange des moteurs comme l'huile, les fluides hydrauliques, les lubrifiants et l'antigel. L'approvisionnement en combustible produit des liquides résiduaires et de la vapeur qui s'échappe dans l'air. Les cuves de stockage souterrain, amplement utilisées, comportent également un risque de rejet de polluants qui peuvent porter atteinte à la vie aquatique. Les eaux de cale et les eaux de ballast sont d'autres flux de déchets qui contiennent des hydrocarbures, des solvants et autres substances dangereuses. De plus, en raison de la taille des navires, seuls quelques chantiers navals sont en mesure de construire, d'entretenir et de réparer des navires dans un local couvert. Comme toutes les autres zones de construction en extérieur, les risques d'exposer l'environnement immédiat à d'éventuels polluants sont élevés. Mais pour les chantiers navals, ce risque est encore aggravé du fait que leurs activités se déroulent, sur l'eau, dans l'eau, sous l'eau ou à proximité ce qui augmente les occasions d'exposition des voies fluviales aux matières toxiques et dangereuses, soit directement, soit par des écoulements connus aussi sous le nom d'eaux pluviales [9].

La première étape du processus de construction navale est la formulation des exigences du produit par le client. Par exemple, une ligne maritime peut prévoir le besoin d'un moyen de transport de 250 000 automobiles par an entre le Japon et le Canada; une agence de transport publique peut avoir besoin de transporter 150 000 passagers par jour sur une voie navigable intérieure pendant 10 ans, avec une moyenne de 30 trajets par route; une société pétrolière peut être amenée à transporter 10 millions de tonnes de pétrole brut par an des Caraïbes au nord-est des États-Unis, ou les forces armées canadiennes peuvent avoir besoin d'un navire capable de livrer des fournitures pour soutenir un groupement tactique dans le monde entier sans préavis [9].

La construction navale et ses activités connexes sont extrêmement importantes pour le fonctionnement de l'économie mondiale puisque les navires interviennent à hauteur de 90 % (en volume) dans le transport des cargaisons échangées au niveau international [10] et constituent de ce fait l'épine dorsale du commerce mondial. En dépit de cette importance, la situation de l'industrie au regard de l'environnement est relativement inconnue du public et hormis quelques marées noires catastrophiques, son impact sur l'environnement n'a fait l'objet que de peu d'attention lorsqu'on le compare en particulier aux autres industries comme celles des transports aériens et terrestres.

Théoriquement, l'impact de la construction navale sur l'environnement n'est pas sans importance. La construction des navires suppose un grand nombre de processus qui représentent en eux-mêmes des risques importants de dommage pour l'environnement immédiat des chantiers navals et qui entraînent de fortes émissions de gaz à effet de serre (exemple du chantier naval Newport News Shipbuilding aux États-Unis). En outre, la construction navale emploie certains matériaux (acier, acier inoxydable, acier galvanisé, aluminium, alliage cuivre-nickel et autres alliages de cuivre) qui non seulement peuvent avoir des répercussions très préjudiciables pour l'environnement au cours de leur production et de leur utilisation dans la construction des navires mais aussi ultérieurement, lors des réparations, de l'exploitation des navires [9].

Parallèlement, il faut reconnaître que l'industrie de la construction navale propose l'un des modes de transport ayant le meilleur rendement énergétique. Par exemple, si l'on fait la comparaison avec d'autres formes de transport, ses émissions de CO<sub>2</sub> sont bien inférieures pour un même poids de marchandises transportées. C'est un aspect très important eu égard aux problèmes de changement climatique surtout si l'on tient compte du rôle essentiel des navires dans le commerce international.

Afin d'avoir une image plus nette de la situation et de disposer d'un point de départ pour réaliser une analyse plus détaillée et plus spécifique, ce chapitre vise à identifier et présenter les principaux problèmes d'environnement et de changement climatique dans la construction navale. Dans ce contexte, l'étude prend en compte une vue relativement globale

de l'industrie de la construction navale et va au-delà de la simple action de construire des navires. La raison en est que si la construction navale n'est pas directement responsable de l'impact de la production de matières premières, des transports maritimes ou du démantèlement et du recyclage des navires sur l'environnement, la construction des navires peut, dans une perspective environnementale, être liée de manière très complexe à ces activités qui vont de pair avec la construction des navires [9].

### **2.1.1. Construction, entretien et réparation des navires**

L'impact le plus direct de la construction navale sur l'environnement provient naturellement de l'activité même des chantiers navals qui, hormis la construction des navires, comprend généralement aussi l'entretien des navires et les services de réparation. Chacun de ces processus est en soi une tâche très importante qui comprend de nombreuses opérations intermédiaires. Dans le cas de la construction navale, il s'agit en particulier de :

- La manipulation de matières premières, la construction et le traitement de surface des pièces d'acier de base ;
- L'assemblage et le montage des éléments préfabriqués pour réaliser des modules ;
- Le montage des structures du navire moyennant l'ajustage et le soudage des modules ;
- Le montage des équipements électroniques du navire ; et
- La préparation et l'installation des diverses parties préfabriquées qui ne sont pas des structures

Les opérations d'entretien et de réparation comprennent généralement :

- Le nettoyage et le traitement des surfaces ;
- Les opérations de transfert du mazout ; et
- L'entretien des machines et autres équipements.

L'industrie est en outre grosse consommatrice d'énergie, essentiellement de l'électricité dont la production a ses propres impacts sur l'environnement et le changement climatique. Certains chantiers navals n'ont parfois guère le choix de leurs sources

d'électricité mais si des sources d'énergie renouvelables sont disponibles, les constructeurs de navires devraient envisager de les utiliser.

Les activités de construction, d'entretien et de réparation impliquent la production et la manipulation quotidienne de nombreux matériaux, vapeurs et fluides toxiques. Le travail des métaux et le traitement des surfaces par exemple occasionnent des émissions de matières particulaires et peuvent entraîner le rejet de composés toxiques dans le sol et dans l'eau. L'entretien courant produit des fluides de vidange des moteurs comme l'huile, les fluides hydrauliques, les lubrifiants et l'antigel. L'approvisionnement en combustible produit des liquides résiduaires et de la vapeur qui s'échappe dans l'air. Les cuves de stockage souterrain, amplement utilisées, comportent également un risque de rejet de polluants qui peuvent porter atteinte à la vie aquatique. Les eaux de cale et les eaux de ballast sont d'autres flux de déchets qui contiennent des hydrocarbures, des solvants et autres substances dangereuses [9].

Les activités de construction navale qui comportent le plus de risques directs pour l'environnement comprennent :

- Le travail des métaux et notamment le découpage thermique, le soudage et le meulage
- Le traitement des surfaces et notamment le décapage au sable, l'enrobage et la peinture
- Les opérations d'entretien et de réparation des navires comme le nettoyage des fonds de cale et des citernes
- Le bruit

#### **2.1.1.1. Le soudage**

Une fois les tôles d'acier découpées selon les formes et les tailles désirées, elles sont soudées ensemble pour construire la structure du navire. Sur un chantier naval, le soudage intervient pratiquement dans tous les espaces de travail. Des techniques avancées de soudure au laser sont en cours de développement afin d'augmenter l'exactitude, la profondeur et la gamme des soudures mais cette méthode n'est pas encore couramment employée [9].

Le soudage est un procédé consistant à réunir deux ou plusieurs parties d'un assemblage, afin d'en assurer la continuité soit par chauffage (avec ou sans fusion du matériau), soit par intervention de pression, soit par l'emploi ou non d'un métal d'apport dont la température de fusion est identique à celle du matériau de base. Ce procédé peut s'appliquer aux métaux, aux céramiques ainsi qu'aux plastiques.

### Les différents types de soudage

Il existe plusieurs types de soudures, parmi lesquels :

#### 1. Le soudage oxyacétylénique:

Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène - $C_2H_2$  avec un gaz comburant d'oxygène - $O_2$ . La température de la flamme peut atteindre les  $3200^\circ$  Celsius, lorsque le mélange  $C_2H_2$  et  $O_2$  est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de  $\varnothing 0,8$  mm à  $\varnothing 4,0$  mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bord à bord ».

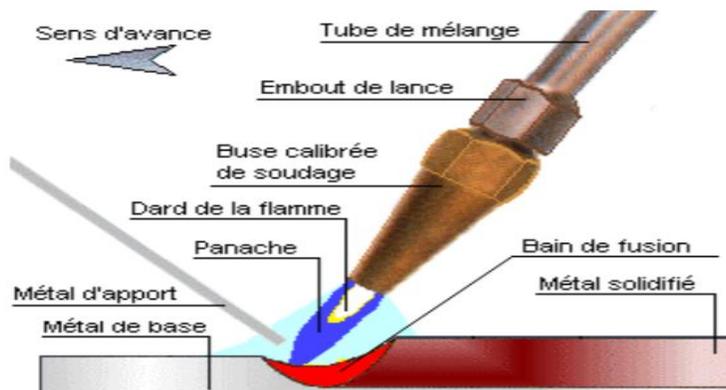


Figure 1 : Le soudage oxyacétylénique

#### 2. Le soudage par résistance

Le procédé de soudage par résistance est un procédé à chaud, sous pression et sans métal d'apport. Il consiste à échauffer localement les pièces par passage d'un courant électrique. La technique la plus utilisée est le soudage par résistance par points. Dans ce cas,

les pièces à souder sont superposées et serrées localement entre deux électrodes et l'ensemble est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température. L'échauffement provoque la fusion localisée des deux pièces dans la zone située entre les deux électrodes, suivi de la formation d'un noyau de métal recristallisé. Il existe plusieurs procédés dérivés, on peut citer le soudage à la molette, le soudage par bossage ou le soudage en bout, procédés qui seront également abordés dans cet article. Le point commun de ces procédés est qu'ils utilisent l'effet Joule, c'est-à-dire qu'ils exploitent le phénomène de l'échauffement d'un conducteur parcouru par un courant électrique.

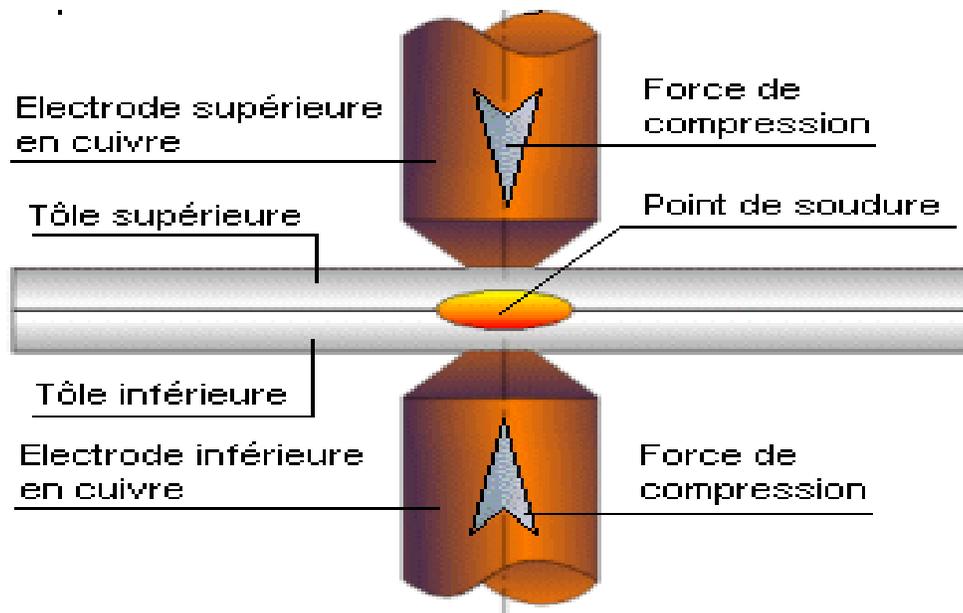


Figure 2 : Le soudage par résistance

### 3. Le soudage à l'arc électrique

La température de soudage est générée par l'arc électrique entre deux électrodes qui constituent la pièce à souder. L'apport de métal est souvent sous forme de baguettes.

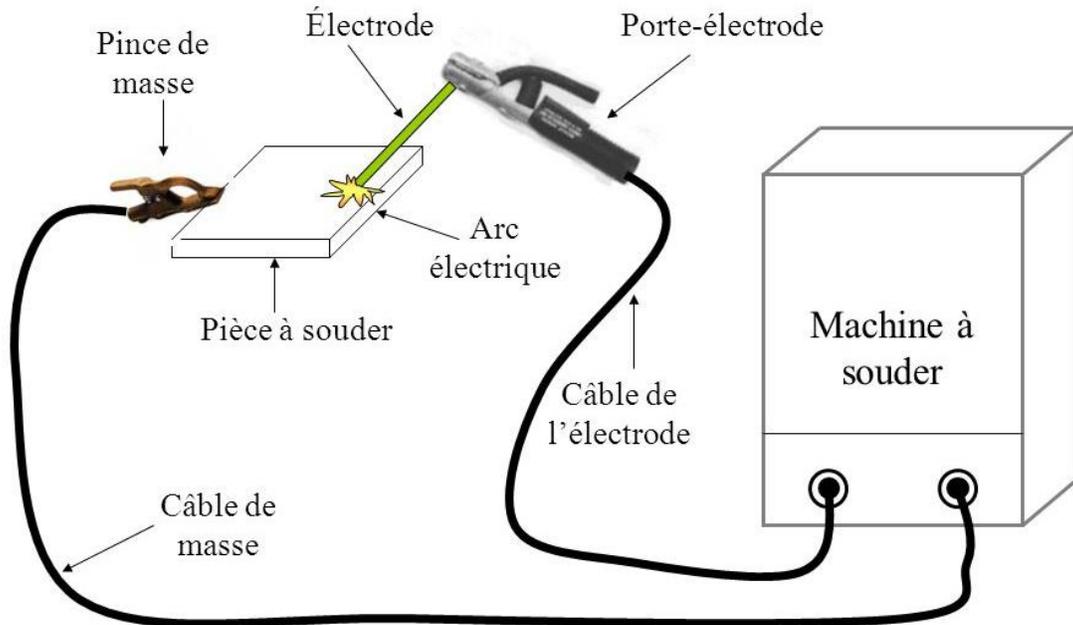


Figure 3 : Le soudage à l'arc électrique

#### 4. Le soudage Laser

Le Soudage au laser, tant pour des matériaux homogènes qu'hétérogènes, est un procédé de fusion qui ne nécessite aucun matériau d'apport. Contrairement à d'autres procédés de soudage en continu, le Laser permet un apport ponctuel très précis de la chaleur. Le recouvrement des points permet un soudage en continu (cordon). Le temps d'interaction est extrêmement bref et atteint seulement quelques millisecondes par points. En fonction de l'absorption spécifique au matériau, la zone de soudage subit un échauffement qui augmente jusqu'à atteindre la température de fusion. Lors de la diffusion de la chaleur, le matériau en fusion se solidifie pour former la soudure.

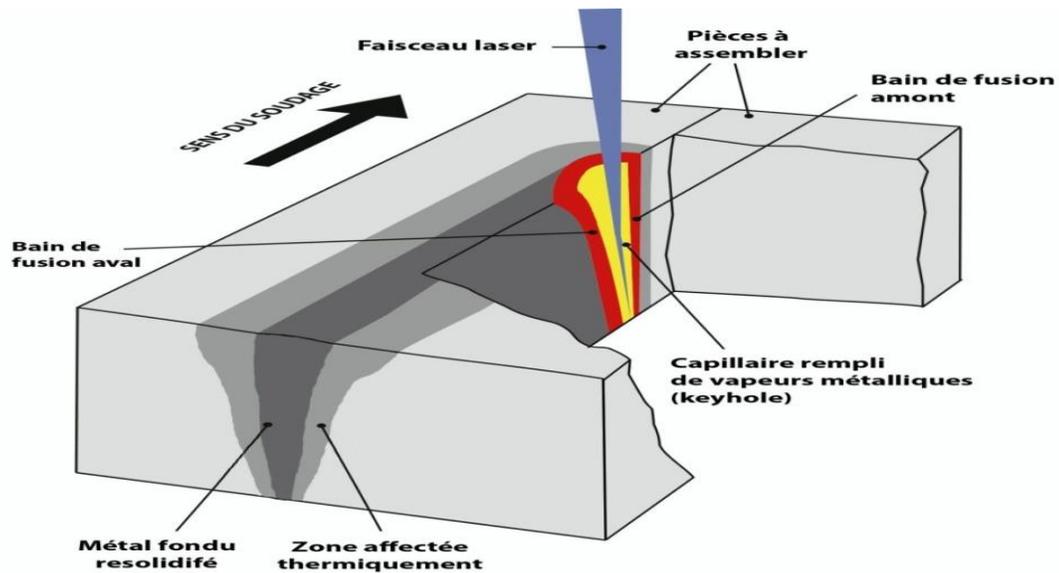


Figure 4 : Le soudage Laser

### 5. Le soudage Plasma

Le procédé plasma constitue l'évolution technologique majeure du procédé TIG. Plasma et micro-plasma sont des procédés de soudage à l'arc avec électrode infusible cousins du TIG, qu'ils suppléent dans le domaine des faibles et très faibles intensités. Il y a peu de déformation des pièces du fait d'une concentration énergétique dans la colonne de plasma

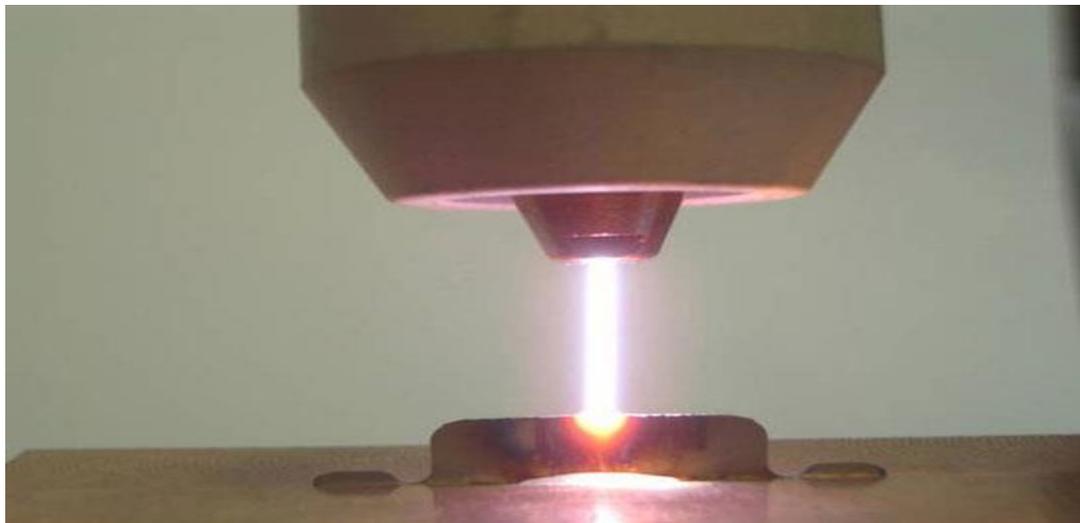


Figure 5 : Le soudage Plasma

Le procédé de soudage implique de lier ensemble des composants métalliques en chauffant les surfaces adjacentes à des températures extrêmement élevées et en les fondant ensemble avec le métal d'apport en fusion. Les surfaces adjacentes sont chauffées par un arc électrique ou une flamme de gaz et fondues ensemble avec le métal d'apport fondu sous la forme d'une électrode, d'un fil ou d'une tige. Parmi les nombreuses techniques de soudage utilisées dans la construction navale, le soudage électrique à l'arc est de loin le plus répandu et produit les plus grandes quantités de gaz nocifs [11].

Les émissions produites par le soudage comprennent des GES, des produits chimiques toxiques et des polluants atmosphériques qui incluent l'ozone (O<sub>3</sub>), les matières particulaires (PM), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et le plomb (Pb) [12].

À des températures élevées, le métal d'apport en fusion réagit avec l'oxygène et l'azote pour perdre son intensité. Afin d'assurer la résistance de la soudure, il est essentiel de séparer le métal en fusion de l'atmosphère au moyen d'une séparation d'arc. L'ajout d'un fondant ou de gaz ou d'une combinaison des deux facilite la soudure en supprimant l'oxydation des métaux à assembler. Au cours du processus, différents composés polluants sont libérés en fonction du type d'électrode, du matériau métallique de base, du voltage, du courant, de la longueur d'arc, de l'écran de gaz inerte, de la vitesse de déplacement et de l'angle de l'électrode de soudure [11].

La soudure est une source essentielle de polluants atmosphériques dangereux et pose un gros problème d'environnement. Les vapeurs toxiques attribuées avant tout aux travaux de soudure contiennent du manganèse et du chrome. D'autres métaux dangereux détectés dans les vapeurs de soudage incluent notamment le nickel, le cobalt, le plomb, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et l'ozone.

Un moyen de réduire le plus possible les vapeurs de soudage consistent à utiliser des systèmes de capture et de collecte. Les systèmes de capture servent à enfermer les vapeurs dès qu'elles se dégagent. Ces systèmes comprennent des cabines de soudage, des cloches à

air comprimé, des extracteurs de vapeur des torches, des gaines flexibles et des gaines portables. Après l'isolation des vapeurs, les systèmes de collecte recueillent les produits chimiques au moyen de filtres, de précipitateurs électrostatiques, de laveurs de particules et de filtres au charbon actif. En ce qui concerne les gaz à effet de serre, le soudage à l'arc électrique consomme beaucoup d'électricité et les chantiers navals peuvent donc réduire le plus possible leur empreinte de GES en se procurant dans la mesure du possible leur électricité à partir de sources d'énergie renouvelables ou de sources qui ne brûlent pas de combustibles fossiles.

#### **2.1.1.2. Le meulage des métaux**

Le meulage des métaux est un procédé d'usinage qui utilise un outil abrasif pour poncer une surface métallique. Ce procédé rejette des matières particulaires polluantes dans l'atmosphère provenant aussi bien de l'outil de meulage que du support en cours de ponçage. Les polluants sont sous forme d'émissions atmosphériques fugitives de poussière métallique et de vapeurs, de déchets solides et de poussière et de copeaux métalliques des déchets des outils de meulage. Pour le ponçage des métaux, on utilise de l'électricité qui provient généralement de combustible fossile et est donc associée à des émissions de GES.

Le meulage se fait soit dans l'atelier, soit dans les espaces de travail extérieurs à l'aide de meuleuses portatives. Les particules sont libérées au cours du processus d'abrasion et à l'instar d'autres activités du chantier naval réalisées en extérieur, ces opérations de ponçage constituent le plus gros potentiel d'émissions de polluants dans l'environnement, directement dans l'atmosphère et dans le sol ainsi que dans les voies navigables par l'intermédiaire du ruissellement des eaux pluviales.

Des polluants nocifs sont présents à diverses concentrations dans les outils abrasifs et les supports. Les supports peuvent être des polluants notables notamment s'ils ont un revêtement. Les matériels servant au meulage des métaux comme les disques de meulage et les meules sont fabriqués de façon caractéristique en attachant un élément abrasif à un support avec des liants chimiques. Les matériaux couramment utilisés pour les abrasifs de ces outils sont l'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium et l'oxyde de zirconium. Les

composants moins courants sont les composés du manganèse, la silice cristallisée et les composés du zinc [13].

Divers systèmes de capture et de collecte contribuent à minimiser l'exposition de l'environnement en réduisant la charge polluante au cours des opérations de meulage des métaux. Il s'agit des aspirateurs de poussières, de l'isolation de l'espace (en particulier des bâches de sol et des séparations écran) et de la ventilation de la zone/des dépoussiéreurs.

### **2.1.1.3. Impacts sur l'environnement à l'échelle de l'ensemble de l'industrie**

Les effets environnementaux directs des activités mondiales de construction navale comme ceux qui résultent des procédés décrits dans les sections ci-dessus, sont évidemment importants. En général cependant, il y a pénurie d'informations sur la question et il est difficile par conséquent de donner même une évaluation indicative de l'ampleur de l'impact de l'industrie sur l'environnement. C'est un fait notable compte tenu en particulier du très grand intérêt international porté au changement climatique et il est donc très souhaitable de renforcer l'ouverture et la transparence des chantiers navals relativement à leurs performances en matière d'environnement.

On peut donner des indications sur les émissions de l'industrie en ce qui concerne certains polluants atmosphériques en s'appuyant sur les études par pays mais étant donné que quelques-unes seulement ont été entreprises, elles ne donnent qu'une vague idée de l'ampleur du problème.

Par exemple, selon l'Agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis, les émissions de CAP par l'industrie de la construction navale aux États-Unis s'élevaient à 6 000 tonnes en 2002 dont 44 % pouvaient être attribuées aux émissions se rapportant à l'énergie. En supposant que les émissions soient restées stables proportionnellement à la production et que des quantités proportionnées analogues de CAP soient émises en moyenne par les chantiers navals du monde, un rapide calcul très approximatif placerait la totalité des émissions de CAP de la construction navale aux alentours de 984 000 tonnes en 2009 [9].

### **2.1.2. La construction navale et les impacts concomitants du secteur maritime sur l'environnement**

En dehors des impacts environnementaux dus aux activités internes des chantiers navals et des effets que l'on peut attribuer aux matières premières utilisées dans les processus de construction, l'industrie de la construction navale devrait jouer un rôle qui pourrait être plus important en vue de parvenir à améliorer les performances environnementales du fonctionnement des navires.

Le secteur maritime a eu tendance à se considérer comme une activité autonome et totalement indépendante n'ayant aucun rôle important à jouer en dehors de ses responsabilités immédiates. En suivant ce raisonnement, si l'industrie de la construction navale est responsable de ce qui se passe dans ses chantiers navals, elle n'est pas responsable de ce qu'il advient après la livraison du navire. Par conséquent, si un armateur passe commande d'un navire en précisant (par exemple) qu'il veut un système de propulsion utilisant du fuel de soute lourd, c'est une décision sur laquelle le chantier naval ne peut agir et il ne devrait donc pas être tenu responsable [9].

Cet argument possède une logique mais proportionnellement il s'agit d'un point de vue très restrictif des imbrications existant (ainsi qu'on l'a indiqué dans la section antérieure traitant de l'approche fondée sur le cycle de vie) dans la production, l'exploitation et la démolition finale des navires de commerce et autres.

Il ne s'agit pas d'insinuer que les chantiers navals devraient porter le fardeau concernant les atteintes à l'environnement et autres impacts des navires, depuis leur conception jusqu'à leur démantèlement mais que s'il existait une approche plus coordonnée, on assisterait alors à une plus grande prise de conscience des problèmes, on prendrait de meilleures décisions et il serait plus facile d'introduire des innovations. Qui plus est, il y aurait une meilleure réceptivité aux questions d'environnement, de changement climatique et de croissance verte ce qui placerait le secteur maritime (dans son contexte le plus large) au tout premier rang de la responsabilité en matière d'environnement [9].

Il est suggéré que si le secteur de la construction navale réussissait à prendre une initiative de ce genre, elle serait alors en mesure de prendre des décisions de manière ordonnée et mesurée afin de réduire le plus possible les coûts potentiels en aval de l'adaptation aux contraintes environnementales. Sinon, à en juger par l'expérience d'autres secteurs industriels, il apparaît que lorsque les pouvoirs publics et l'opinion s'intéressent à un secteur, ce dernier peut devenir la cible de mesures draconiennes et peut-être très déplaisantes.

Le meilleur indicateur probable des possibilités importantes qui s'offrent à l'industrie de la construction navale d'influer sur les performances environnementales de l'ensemble du secteur maritime – par exemple en adoptant et en favorisant des conceptions et des technologies de propulsion des navires meilleures et plus efficaces – est la taille de la flotte marchande mondiale qui selon comprenait plus de 102 000 navires immatriculés en 2009 [9]. Le moment venu, ces navires devront être remplacés et si l'on s'attachait à reconnaître dès maintenant les atteintes à l'environnement et autres impacts de la navigation commerciale et apparentée, cela permettrait aux navires qui les remplaceront de respecter davantage l'environnement et d'être plus écologiques.

Les problèmes d'environnement les plus importants associés au secteur maritime concernent les marées noires consécutives aux accidents, le dysfonctionnement des équipements ou les décisions opérationnelles (comme le déversement des vidanges de cale). Il y a cependant d'autres opérations essentielles et notamment le chargement, le déchargement et les tâches de soutien et les services associés qui peuvent avoir une incidence sur l'environnement et d'autres impacts et qui sont examinés ici dans la perspective d'évaluer tout d'abord dans quelle mesure l'industrie de la construction navale pourrait jouer un rôle positif en adoptant une approche fondée sur le cycle de vie.

Par rapport aux transports aériens et terrestres, l'impact environnemental du secteur maritime a fait l'objet de peu d'attention (hormis les marées noires qui font beaucoup de bruit). La raison principale tient au fait que le transport maritime est généralement considéré (à juste titre) plus économe en énergie que d'autres moyens de transport et c'est cela qui l'a

partiellement protégé en évitant d'attirer davantage l'attention sur ses activités essentielles. Le transport maritime par exemple produit beaucoup moins d'émissions de CO2 par tonne/km que d'autres modes de transport.

Toutefois, on peut aussi attribuer cette discrétion au fait que les politiques et le public sont moins conscients de l'importance du transport maritime et du rôle qu'il joue dans leur vie quotidienne. Après tout, la plupart des gens connaissent mieux les transports aériens et terrestres et de nombreuses compagnies aériennes sont des noms de marques bien connues dans la plupart des foyers au même titre que certains biens de consommation traditionnels.

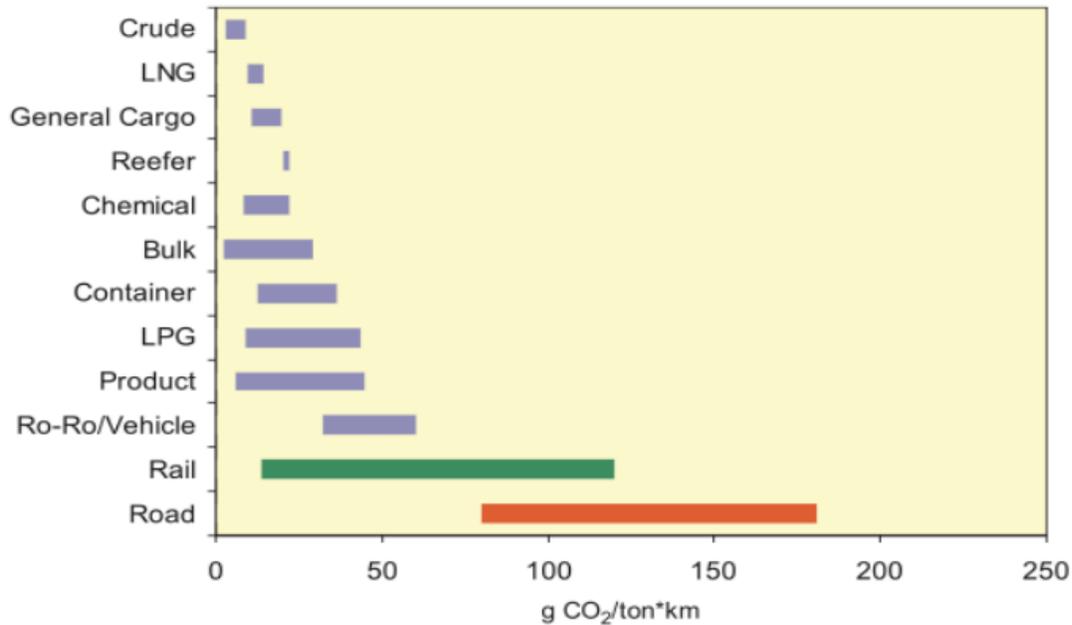


Figure 6 : Fourchette type d'efficacité des navires en termes de CO<sub>2</sub> par rapport aux transports terrestres [1]

Le chiffre indique la fourchette moyenne d'efficacité en termes de CO<sub>2</sub> de différents types de navires par rapport à d'autres modes de transport. L'efficacité est exprimée en tant que masse des émissions de CO<sub>2</sub> par « tonne/kilomètre ».

Cependant, les préoccupations de plus en plus vives en matière d'environnement et notamment de changement climatique, renforceront vraisemblablement l'attention portée au transport maritime au cours des prochaines années et qui risque en particulier de s'étendre car ces problèmes continuent d'attirer de plus en plus l'attention dans les secteurs des transports aériens et terrestres.

### 2.1.2.1. Énergie et propulsion

Si le carburant est un composant essentiel du transport maritime, il est aussi l'une des principales sources de pollution atmosphérique dans l'industrie. En fonction des estimations et des types de navires, le carburant peut représenter jusqu'à 40 % de la totalité des frais d'exploitation d'un navire [14], et dans une industrie déjà farouchement compétitive, la

faiblesse des prix du carburant est un facteur extrêmement important pour avoir un avantage sur les concurrents. Il s'agit là d'un obstacle majeur qui s'oppose à la transition vers des carburants moins polluants qui sont aussi généralement plus coûteux. Cette transition est rendue encore plus difficile par la surcapacité actuelle de l'industrie et par une situation économique difficile.

#### **2.1.2.2. Technologies moins polluantes**

Jusqu'à présent, le développement et l'application de nouvelles technologies dans la construction navale ont été relativement lents mais de nouvelles idées et solutions novatrices pour réduire les impacts des navires sur l'environnement pendant leur période d'exploitation commencent à apparaître alors que des technologies existent déjà. Un grand nombre d'entre elles visent précisément à réduire les émissions du trafic maritime en améliorant encore davantage l'efficacité énergétique des navires [15].

Les initiatives couvrent un large éventail qui va des petits changements comme la diminution de la vitesse, l'application de filtres sur l'échappement, l'utilisation des courants pour la vitesse ou le mélange de combustible de soute classique avec du biogazole, à des applications de plus grande envergure comme l'utilisation de panneaux photovoltaïques et de voiles pour la propulsion, la diminution de la friction grâce à la lubrification à l'air des coques des navires ou la modification profonde de la conception des coques de navires [15].

Alors que certaines de ces technologies en sont encore au stade expérimental, un grand nombre d'entre elles ont atteint le stade de la commercialisation. Il faut mentionner également que si certaines initiatives peuvent ne comporter que de petites modifications, leur effet sur l'amélioration des performances environnementales peut être à la fois important et extrêmement rentable sur le plan économique. Par exemple, si les réductions des émissions du transport maritime au moyen de l'emploi de filtres pour les matières particulaires étaient comparables aux réductions obtenues par ce type de filtre sur les véhicules terrestres, la réduction des émissions de carbone noir du transport maritime pourrait atteindre 90 % [15].

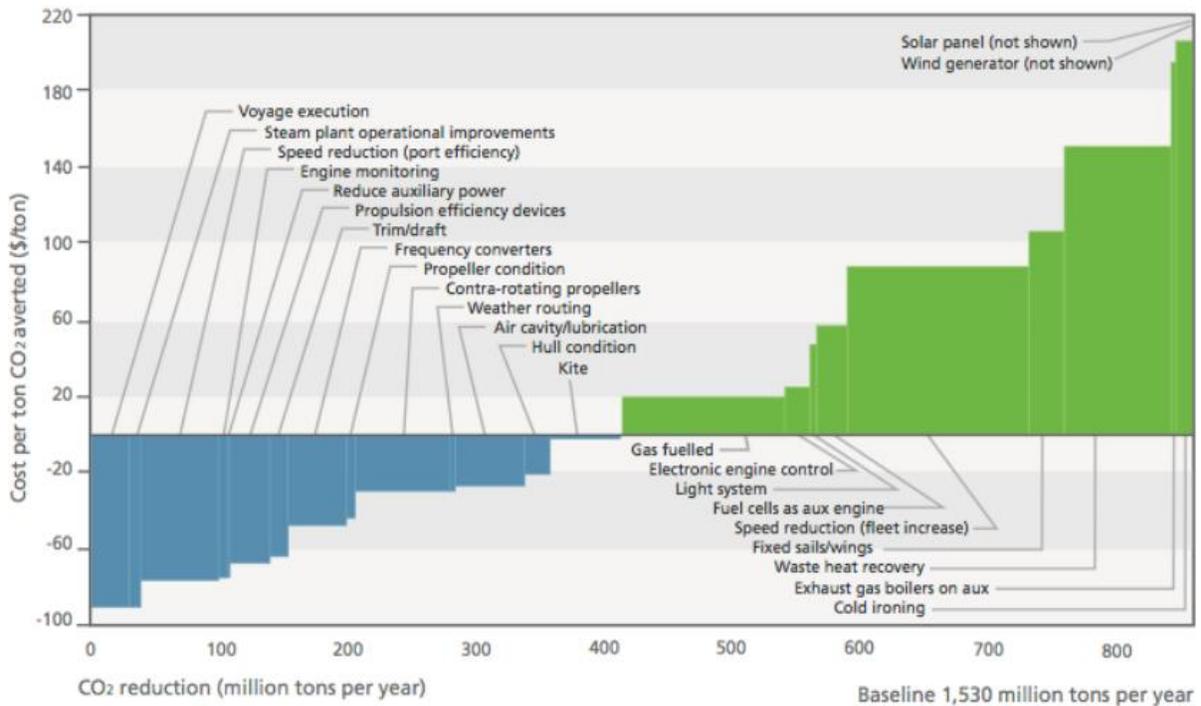


Figure 7 : Coût par option de la réduction moyenne marginale de CO2 – flotte marchande mondiale en 2030 [16]

#### 2.1.2.4. Puissance éolienne et solaire

Une éolienne transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous l'effet de la force du vent. La mise en rotation des pales fait tourner une génératrice. La puissance délivrée est proportionnelle à la vitesse de rotation. Quel que soit le mois de l'année l'éolienne apporte une énergie significative (25 Ampères heure par jour au minimum pour juin en moyenne). La production est naturellement supérieure pendant les mois d'hiver lorsqu'il y a plus de vent. Les puissances des éoliennes marines que l'on trouve sur le marché varient de 60 à 400 Watts (maximum) soit une production de plusieurs dizaines d'ampères c'est à dire l'équivalent d'un chargeur de quai. Par contre, un panneau solaire fonctionne par un effet photovoltaïque c'est à dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide. Un panneau est un assemblage en série de

ces microcellules permettant d'obtenir une tension de 12 Volts. La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques. Ils sont un moyen efficace et silencieux pour disposer d'énergie à bord particulièrement l'été. Par contre, en fonction de la saison et du lieu de navigation, la production varie du simple au triple. Les puissances annoncées par les constructeurs sont calculées par convention sur la base d'un niveau d'ensoleillement sur une surface plane horizontale de 1000 W/m<sup>2</sup> [17].

Les bateaux à voile existent depuis des siècles mais de nouvelles technologies pour domestiquer l'énergie éolienne pourraient relancer la navigation à voile. L'idée d'utiliser des voiles géantes ou « cerfs-volants » qui ne sont pas sans ressembler à un parapente, pour propulser de grands navires de commerce circule depuis quelque temps mais on ne la considère habituellement que comme une idée. Cependant, des projets testant la viabilité de la technologie ont démontré des possibilités importantes de réduction de la consommation de carburant ; même sur de plus grands navires [9].



Figure 8 : Le navire MS Beluga SkySails

L'énergie solaire dans le secteur naval, est une forme de propulsion des navires relativement nouvelle et potentiellement prometteuse. La technologie est nouvelle et même s'il existe déjà des navires de commerce en partie propulsés par l'énergie solaire, ils sont de

petite taille et relativement peu nombreux. Des essais de grande envergure de panneaux photovoltaïques sont néanmoins en cours de réalisation sur de plus grands cargos mais il faudra du temps avant que cette technologie puisse avoir une incidence significative sur la réduction de consommation de carburant, à plus forte raison pour être utilisée comme l'unique source d'énergie pour la propulsion [9].

Le premier exemple de panneaux solaires sur un grand cargo est celui de l'installation de 328 panneaux solaires sur le transporteur de voitures de Toyota, le MV Auriga Leader, de 60 000 tonnes, qui est exploité par la plus grande compagnie maritime du Japon, Nippon Yusen Kaisha (NYK Line), et co-développé avec Nippon Oil. L'installation des panneaux solaires entre dans le cadre d'un projet de 2 ans qui a débuté début 2009. Les panneaux solaires du MV Auriga Leader peuvent produire 10 % de l'énergie lorsque le navire est à quai. Lorsqu'il est en mer, l'énergie solaire produite peut fournir 0.05 % de la puissance de propulsion du navire et 1 % de l'électricité utilisée à bord du navire. Ces effets ne sont pas en mesure de réduire la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> de façon significative mais le but consiste aussi à tester l'endurance des panneaux solaires dans les rudes conditions de la mer [18].



Figure 9 : Le navire MV Auriga Leader

#### **2.1.2.5. Gaz naturel liquéfié**

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est un combustible plus propre que le gasoil. De plus, les moteurs à GNL associés à une propulsion diesel électrique sont également plus silencieux, plus efficaces et produisent moins de vibrations.

Le Gaz Naturel Liquéfié est issu d'un processus via lequel un liquide est créé à partir d'un gaz naturel. Il est refroidi à  $-162^{\circ}$  Celsius, ce qui permet de le condenser en GNL en réduisant son volume d'un facteur de près de 600. Le liquide ainsi obtenu est incolore et inodore et de nombreux voitures et véhicules utilitaires actuellement en circulation roulent déjà au GNL. Le processus de combustion est plus efficace que la combustion d'énergies fossiles traditionnelles et représente une réduction de 25% de dioxyde de carbone. De plus, il permet également de supprimer les émissions de soufre et de réduire de façon drastique les rejets d'oxyde d'azote et de particules fines. A la différence du gasoil ou du fuel lourd, sa combustion n'émet pas de suie.

Le gaz naturel liquéfié (GNL) promet d'être un moyen efficace de réduire les émissions pour le trafic à courte distance et la navigation intérieure. En effet, le brûlage du GNL peut

éliminer toutes les émissions d'oxydes de soufre et réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> d'au moins 20 % et 80 % respectivement [19]. Selon Det Norske Veritas, le GNL est actuellement l'un des moyens au coût les plus avantageux pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>. De plus étant donné la grande volatilité et l'incertitude des prix du pétrole, le GNL est à même d'offrir une solution économiquement avantageuse pour limiter ces émissions.

Cependant, l'un des principaux obstacles à l'utilisation du gaz naturel à bord des navires est le stockage. Même dans son état liquéfié que l'on obtient en refroidissant le gaz, le volume de la citerne nécessaire au stockage de GNL représente plus du double du volume de la citerne nécessaire au stockage du combustible liquide classique ayant le même rendement énergétique [19]. Par conséquent, dans la plupart des cas l'installation a posteriori d'un système énergétique au GNL à bord des navires est une tâche importante qui peut réduire l'espace réservé à la cargaison. Une autre difficulté de taille est celle de la construction, dans les ports, d'une infrastructure pour l'approvisionnement en GNL.

Sans être impossible, l'emploi du GNL convient probablement mieux lors de la construction de nouveaux navires où les espaces nécessaires peuvent être conçus comme il convient et les chantiers navals novateurs pourront peut-être tirer parti de la viabilité de cette opportunité commerciale.

#### **2.1.2.6. Lubrification à l'air**

Le Système de cavité d'air est un système de lubrification à l'air inventé par le Groupe DK (Pays-Bas). Le système peut réduire à hauteur de 15 % la consommation de carburant alors qu'il a besoin d'utiliser de 0.5 à 1 % de la puissance de propulsion pour faire fonctionner le compresseur d'air. Le système consiste à réduire la résistance de friction de la coque du navire dans l'eau, en soufflant de l'air sous la coque du navire dont le maître couple et l'avant du navire ont été remplacés par une surface à fond plat.

En s'appuyant sur les chiffres du Groupe DK, l'application du Système de cavité d'air sur la flotte mondiale de navires concernée par cette technologie (les navires de commerce de haute

mer de plus de 275 mètres de long) pourrait réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de la marine marchande mondiale d'environ 3.5 %.

#### **2.1.2.7. Hydrocarbures et mazout**

Le transport maritime est à lui tout seul à l'origine des plus gros rejets d'hydrocarbures et de mazout dans les océans, avec plus de 68 % du total mondial [20]. Les rejets d'hydrocarbures et de mazout peuvent soit se produire accidentellement ou être provoqués délibérément. Les rejets accidentels peuvent se produire à l'occasion d'accidents impliquant des navires, ou bien pendant les opérations d'approvisionnement en carburant ou encore pendant le chargement et le déchargement de la cargaison. Le rejet intentionnel se fait généralement sous forme de « déversement volontaire opérationnel ». Contrairement à ce que l'on croit, à peu près deux tiers de tous les rejets d'hydrocarbures et de mazout de la marine marchande ne sont pas accidentels mais dus à des déversements opérationnels [20] ; essentiellement à l'occasion des rejets d'eau de cale.

La forme la plus généralement connue de rejet d'hydrocarbures pour lequel les statistiques sont disponibles, est le rejet accidentel. Ces rejets sont habituellement provoqués par les collisions de navires, les incendies et les explosions à bord ou par le naufrage du navire. La plus grosse marée noire ayant jamais eu lieu s'est produite en 1979 lorsque l'Atlantic Empress, pétrolier de 288 000 TPL est entré en collision avec un autre grand navire dans la Mer des Caraïbes. L'Atlantic Empress a finalement sombré après avoir brûlé pendant 14 jours en provoquant le déversement de 287 000 tonnes métriques de pétrole [20].

L'International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) conserve des données sur les déversements accidentels d'hydrocarbures des pétroliers et des barges depuis 1970. Il est rarement possible de procéder à une analyse statistique détaillée de ces déversements et les données mettent donc l'accent sur les incidents et les tendances et non pas sur les quantités. D'après la Figure 11, il est clair que la tendance aux marées noires de grande ampleur (plus de 700 tonnes) a fortement régressé au cours des 40 dernières années avec un nombre moyen d'incidents entraînant des marées noires de grande envergure, entre 2000 et

2009 tombant à 3 par an. Le nombre moyen de marées noires de moyenne importance (entre 7 et 700 tonnes) a également diminué.

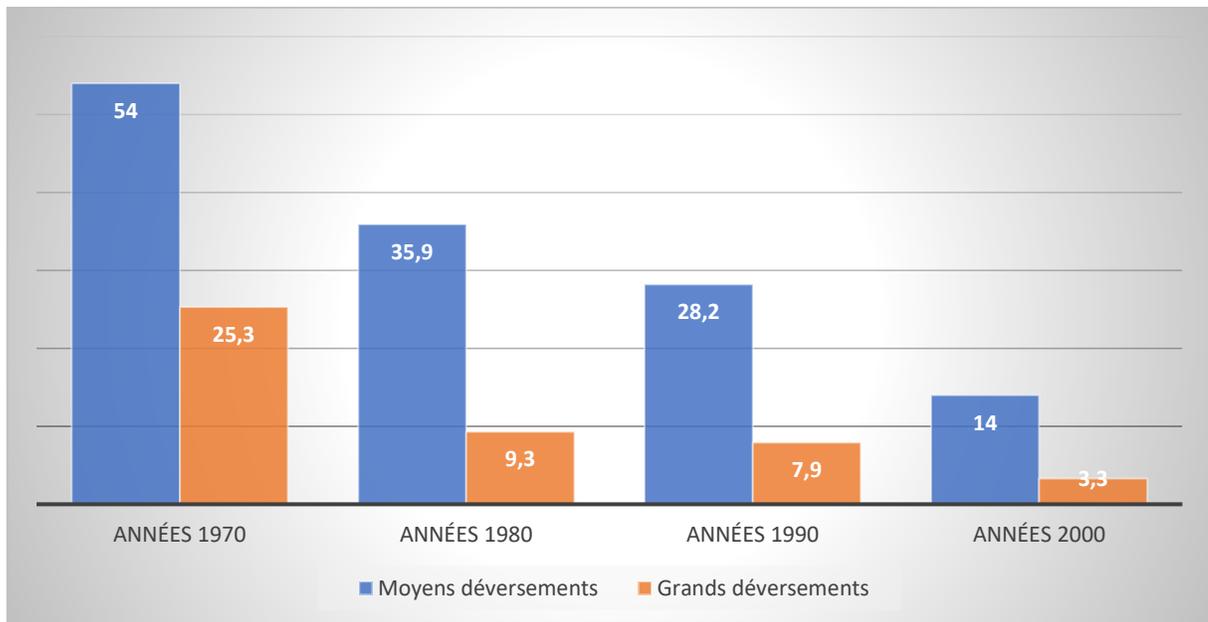


Figure 10 : Marées noires accidentelles de moyenne et grande envergure : moyenne annuelle de marées noires par décennie (1970-2009)

#### 2.1.2.8. Construire des navires plus écologiques

On estime que dans un scénario fondé sur le cycle de vie, l'industrie de la construction navale se trouve au cœur des améliorations à apporter aux performances du secteur maritime en matière économique et environnementale et tout donne à penser que l'on déploie déjà des efforts à cet effet. Un exemple précis est celui du projet japonais NYK Super Eco Ship qui cherche à construire un navire ne produisant aucune émission ni rejet moyennant l'association de nombreuses techniques à haut rendement énergétique. Il s'agit d'un projet qui répond en partie aux objectifs ambitieux fixés par le Japon en matière d'émissions.

Le NYK Super Eco Ship est un concept de 2030 pour un navire porte-conteneurs qui vise à recenser les technologies qu'il faudrait développer ainsi que les moyens de les mettre en application afin d'améliorer les performances économiques et environnementales des transports maritimes. Ce concept prévoit pour 2030 une réduction de 70 % des émissions de

CO<sub>2</sub> par rapport à des navires de taille similaire, réduction qui atteindra 100 % en 2050. Les émissions de NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> seraient également réduites [9].

La réduction des émissions découle de plusieurs facteurs. Par exemple, on réduit le poids en utilisant des aciers ultralégers à haute résistance mais aussi en modifiant la structure du navire et en utilisant des piles à combustible à GNL comme principale source d'énergie à la place de moteurs diesel. La propulsion est en outre aidée par l'énergie solaire et l'énergie éolienne puisque des cellules solaires couvrent la totalité de la zone de containers supérieure. Elles sont fixées également sur le flanc du navire et sur les 8 surfaces portantes du navire. Elles couvrent au total une superficie de 31 000 m<sup>2</sup> avec une production maximum d'énergie allant jusqu'à 9 MW. Les voiles, qui sont fixées sur des mâts télescopiques rétractables, ont une forme triangulaire afin d'accroître leur efficacité selon le régime des vents. La résistance de friction du navire est par ailleurs réduite au moyen du système à cavité d'air [9].

## **2.2 LE TRANSPORT MARITIME MONDIAL**

En 2014, le transport maritime mondial a augmenté de 3,96% par rapport à 2013, ce qui a porté le total à 52,4 milliards de tonnes. Sur la même période, l'activité de transport de pétrole brut a diminué de 1,8%, principalement en raison de la baisse des importations de pétrole brut aux États-Unis. En outre, le trafic de fret de produits pétroliers a augmenté de 3,9%, tandis que le gaz naturel est tombé à 1,4% [21].

Le tableau 1 récapitule les activités de transport maritime international pour la période 2000-2014 [21].

Tableau 1 : Activités de transport maritime international

<b>Année</b>	<b>Transport maritime mondial (en milliards de tonnes)</b>
2000	30,648
2001	30,804
2002	30,958
200	32,908
2004	35,451
2005	36,830
2006	39,401
2007	40,830
2008	41,818
2009	39,719
2010	44,057
2011	46,579
2012	48,750
2013	50,500
2014	52,418
<b>MOYENNE</b>	<b>40,11</b>

### **2.2.1. Le transport maritime au Québec**

Le transport maritime et portuaire du Québec est représenté par un ensemble d'établissements et d'organismes qui participent étroitement à la chaîne de réception, d'expédition et de distribution des produits industriels et qui assurent le déplacement des passagers. On situe habituellement l'importance de ce système en faisant référence au trafic de navires, aux tonnages entrant et sortant ou au nombre de passagers transportés sur le Saint-Laurent et ses affluents et, plus rarement, à sa contribution à l'économie d'une région [22].

Le transport maritime au Québec constitue un maillon essentiel d'une chaîne de transport diversifiée. Il s'intègre dans un ensemble d'activités économiques d'importation, d'exportation, de circulation interne de marchandises qui transitent entre les expéditeurs et les destinataires finaux. Outre le transport de marchandises, le transport maritime comprend un volet transport de passagers avec d'importantes activités de tourisme fluvial, dont les croisières internationales, les croisières d'excursions, les activités nautiques, les services de traversier et de desserte pour les collectivités éloignées. L'activité générée par le secteur maritime contribue considérablement au développement économique du Québec. Le chiffre d'affaires total des entreprises québécoises des secteurs maritime et portuaire, y compris le tourisme fluvial, s'élève à plus de 3,1 milliards de dollars. Ces entreprises créent plus de 18 000 emplois directs ou indirects se partageant une masse salariale annuelle de 1 milliard de dollars. Le gouvernement du Québec et le gouvernement du Canada tirent de ces activités des revenus fiscaux et parafiscaux annuels qui se chiffrent respectivement à 204,6 millions et à 140,7 millions de dollars [22].

Le transport maritime a aussi des retombées économiques importantes sur les régions riveraines du Saint-Laurent. En effet, le transport maritime soutient des secteurs-clés de l'économie québécoise, tels que les papetières, les alumineries, les élévateurs à grains, les terminaux de conteneurs, les sidérurgies et les raffineries de pétrole, dans leur approvisionnement ou leurs expéditions.

Annuellement, les transbordements dans les ports du Québec représentent environ 110 millions de tonnes de marchandises. Le trafic international (exportations et importations)

représente 75 % du trafic global des ports commerciaux du Québec et le trafic intérieur (trafic entre ports canadiens et comprenant dans ce cas-ci au moins un port du Québec) constitue le quart restant [22].

Depuis plus de 200 ans, l'industrie du transport maritime fait partie intégrante de l'économie de la région des Grands Lacs. Les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent forme le plus long réseau de navigation en eau profonde au monde, s'étendant sur 3700 kilomètres (2300 milles) au cœur de l'Amérique du Nord. Le réseau comprend les cinq Grands Lacs et leurs voies inter lacustres ainsi que le fleuve Saint-Laurent jusqu'au golfe Saint-Laurent [23].

Une série d'écluses soulèvent ou abaissent les navires pour franchir les changements d'élévation :

- Sept écluses dans la section Montréal-Lac Ontario (MLO) de la Voie maritime du Saint-Laurent soulèvent ou abaissent les navires de 68,8 mètres ;
- Huit écluses dans la section du canal Welland de la Voie maritime du Saint-Laurent soulèvent ou abaissent les navires de 99,4 mètres ;
- Une écluse à Sault Ste. Marie (Michigan) abaisse ou soulève les navires de 9,2 m

Trois groupes distincts d'exploitants de navires desservent la voie navigable. Des transporteurs intérieurs américains et canadiens acheminent des cargaisons entre les ports du réseau, et des exploitants de navires océaniques relient les ports du réseau à des ports outre-mer [23].



Figure 11 : Réseau Grands Lacs. Voie maritime [24]

### 2.2.1.1. Profil du transport maritime au Québec

Le système de navigation du Québec s'étend le long du fleuve Saint-Laurent et de son golfe, il comprend également la rivière Saguenay et la partie de la Voie maritime du Saint-Laurent située entre les écluses de Saint-Lambert et la frontière de l'Ontario. Le réseau portuaire du Saint-Laurent joue un rôle clé dans le commerce international du Canada en donnant accès d'une part aux marchés outre-mer et d'autre part à la région des Grands Lacs qui constitue le cœur industriel de l'Amérique du Nord. Les quelque vingt ports qui composent ce système relèvent de compétences différentes. Certains sont des administrations portuaires canadiennes, d'autres appartiennent à Transports Canada, au gouvernement du Québec ou sont des ports privés ou municipaux. Les cinq administrations portuaires canadiennes du Québec, nommément Montréal, Québec, Saguenay, Sept-Îles et Trois-Rivières sont des organismes fédéraux autonomes qui exploitent les infrastructures portuaires. Notons, par ailleurs, que certains ports ont plus d'un propriétaire qui exploite

chacun leurs propres quais et que ces derniers ne sont pas nécessairement illustrés dans la Figure 12 [22].

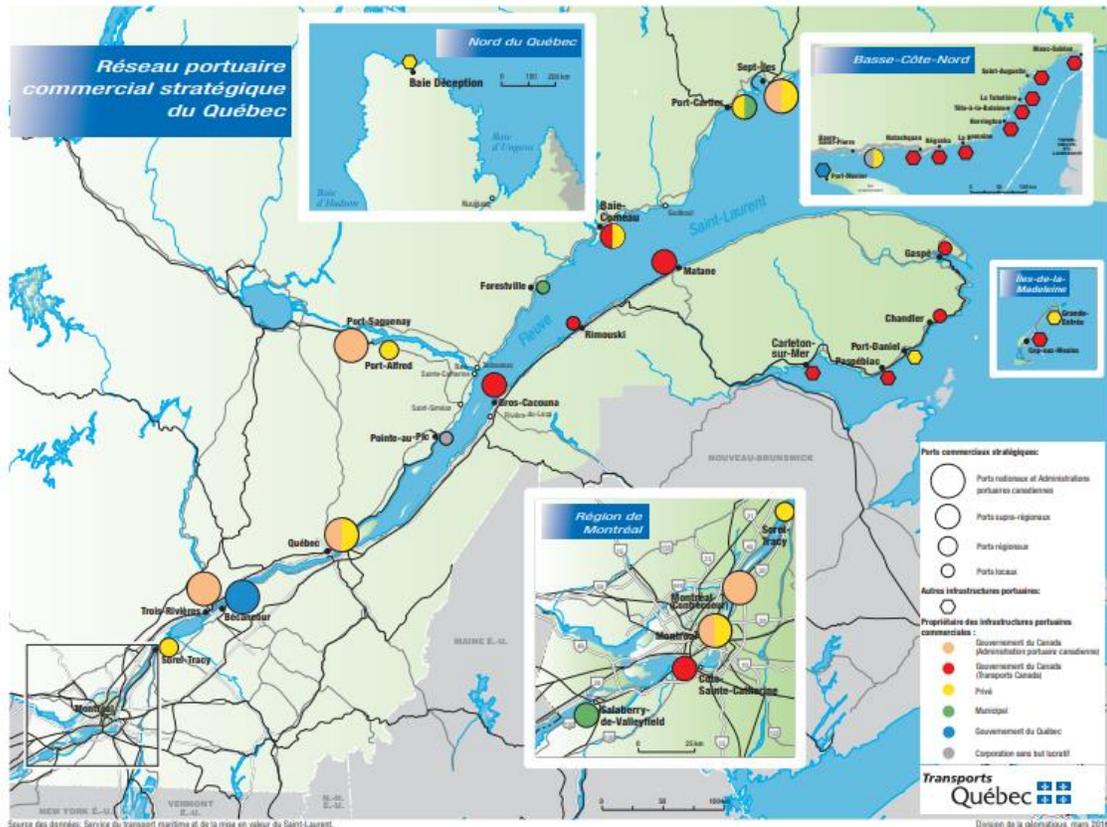


Figure 12 : Réseau portuaire commercial stratégique du Québec [25]

### 2.2.1.2. Efficacité énergétique dans le secteur maritime au Québec

Une analyse [26] comparative du carburant consommé et des moteurs utilisés en 2010 par chacun des modes a démontré que les navires sont capables de transporter une tonne de marchandises sensiblement plus loin avec un litre de carburant que le train ou le camion. L'analyse de l'efficacité énergétique de chaque groupe de navires donne les résultats suivants par rapport au mode ferroviaire et au mode routier :

- La flotte des navires aux dimensions de la Voie maritime peut transporter sa cargaison 24 % plus loin que le train (ou a un rendement du carburant supérieur de 24 %), et 531 % plus loin que le camion (rendement supérieur de 531 %).

- La flotte américaine peut transporter sa cargaison 11 % plus loin que le train (ou a un rendement de carburant supérieur de 11 %), et 592 % plus loin que le camion (rendement supérieur de 592 %).

- La flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime peut transporter sa cargaison 14 % plus loin que le train (ou a un rendement de carburant supérieur de 14 %), et 594 % plus loin que le camion (rendement supérieur de 594 %) (voir la Figure 13) [23].



Figure 13 : Comparaison de l'efficacité énergétique – Flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010) [26]

### 2.2.1.3. Émissions de gaz à effet de serre (GES)

Les résultats de l'analyse de RTG sur les émissions de gaz à effet de serre, indiquent que le mode maritime produit moins d'émissions de GES par tonne métrique-km (ou millier de tonnes courtes de marchandises par mille) que le mode ferroviaire ou le mode routier.

- En comparaison de la flotte des navires aux dimensions de la Voie maritime transportant 1 tonne métrique de marchandises sur 1 km, le mode ferroviaire émettrait 22 % de GES de plus que le mode maritime, et le mode routier, 450 % de plus.
- En comparaison de la flotte américaine transportant 1 tonne courte de marchandises sur 1 mille, le mode ferroviaire émettrait 15 % de GES de plus que le mode maritime, et le mode routier, 534 % de plus.

- En comparaison de la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime transportant 1 tonne métrique de marchandises sur 1 km, le mode ferroviaire émettrait 19 % de GES de plus que le mode maritime, et le mode routier, 533 % de plus.

Le Tableau 2 présente des données plus détaillées et comprend une colonne indiquant l'intensité relative par rapport au mode maritime. La colonne des indices indique les émissions que chaque mode produit en comparaison du mode maritime. Par exemple, pour chaque tonne métrique d'émissions de GES de la flotte des navires aux dimensions de la Voie maritime dans le transport d'une tonne métrique de marchandises de la Voie maritime sur 1 km en 2010, le mode ferroviaire produirait 1,22 tonne métrique d'émissions de GES, et les camions, 5,5 tonnes métriques.

Tableau 2 : Comparaison de l'intensité des émissions de GES en 2010

<b>Intensité des émissions de GES par rapport à la flotte des navires aux dimensions de la Voie maritime</b>			
Transport	g/TMK	Ib/kTMM	Indice
<b>Maritime</b>	11.5	37.0	1.0
<b>Ferroviaire</b>	14.1	45.1	1.22
<b>Routier</b>	63.4	203.5	5.50
<b>Intensité des émissions de GES par rapport à la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime</b>			
Transport	g/TMK	Ib/kTMM	Indice
<b>Maritime</b>	11.9	38.3	1.0
<b>Ferroviaire</b>	14.2	45.5	1.19
<b>Routier</b>	75.5	242.4	6.33

*g/TMK = grammes émis par tonne métrique de marchandises par kilomètre. lb/kTMM = livres émises par millier de tonnes courtes de marchandises par mille.*

*Source: Research and Traffic Group*

#### **2.2.1.4. Émissions de principaux contaminants atmosphériques (PCA)**

Les principaux contaminants atmosphériques (PCA) sont un ensemble de polluants atmosphériques qui causent du smog, des pluies acides et d'autres risques pour la santé. Dans l'industrie des transports, ces émissions sont fonction de la combustion de carburant par les moteurs principaux et les moteurs auxiliaires [23].

La réglementation des émissions a visé le secteur maritime plus récemment que les autres modes. Des règlements sur les principaux contaminants atmosphériques (PCA) ont d'abord été édictés pour le mode routier, puis le mode ferroviaire, et seulement maintenant pour le mode maritime. Le mode routier a été soumis à des normes réglementaires le plus tôt, et aucun changement à la réglementation de 2010 sur les PCA n'a été annoncé. Le parc de camions grand routiers est renouvelé plus fréquemment que l'équipement des autres modes, de sorte que les modifications aux règlements produisent rapidement des effets sur le rendement du réseau [23].

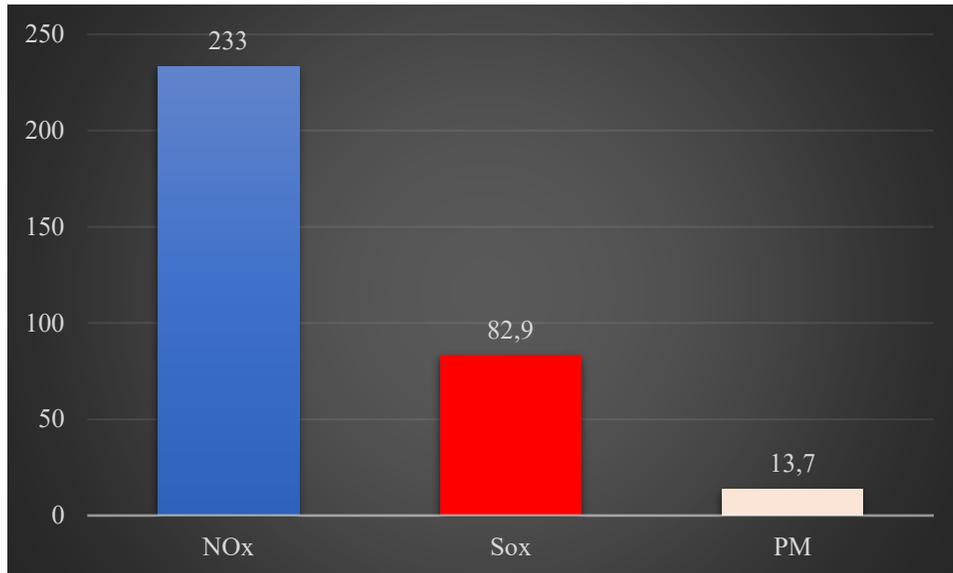


Figure 14 : Comparaison des PCA pour la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime (2010)

*g/kTMK = grammes émis par mille tonnes métriques de marchandises par kilomètre.*

*Source : Research and Traffic Group*

En 2010, le mode maritime était dans l'ensemble celui qui émettait le moins de NO<sub>x</sub>, mais il produisait davantage d'oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) et de PM que les autres modes. À l'avenir toutefois, les flottes naviguant dans le réseau Grands Lacs-Voie maritime du Saint-Laurent réduiront sensiblement leurs émissions de PCA. Après s'être adaptée aux nouvelles conditions réglementaires en recourant à la nouvelle technologie qui pourra être mise en œuvre de façon économique entre 2012 et 2025, la flotte combinée du réseau Grands Lacs-Voie maritime réduirait les émissions comme suit :

- Réduction de 86 % des NO<sub>x</sub> ;
- Réduction de 99,9 % des SO<sub>x</sub> ;
- Réduction de 85 % des PM [23].

## 2.3 CONCLUSION

En ce qui concerne les données ci-dessus résultant des mesures des polluants atmosphériques et de la pollution marine, il est considéré que des actions correctives sont nécessaires. Selon les résultats, tous les polluants, la pollution marine, les accidents maritimes et les pertes en vies humaines commencent et diminuent à un degré satisfaisant pour la communauté mondiale du transport maritime. Celles-ci sont très encourageantes car les mesures prises ont permis d'améliorer les performances de la marine marchande. L'important est que les exigences continuent de croître et que de nouvelles normes de sécurité soient mises en place. Néanmoins, il ne faut pas oublier que les cargaisons transportées par les navires sont énormes (en transport, comme l'indiquent les tableaux de la CNUCED), eu égard aux dommages causés à l'environnement.

L'EMSA<sup>1</sup> et l'OMI<sup>2</sup> ont largement contribué à l'amélioration de la qualité de la navigation grâce à des programmes visant à améliorer la protection de l'environnement marin, mais également à l'adoption des règlements pertinents, à la qualité et à la fiabilité des transports maritimes dans le monde.

---

<sup>1</sup> European Maritime Safety Agency

<sup>2</sup> Organisation Maritime Internationale



# CHAPITRE 3

## ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DES NAVIRES A QUAÏ

### 3.1. INTRODUCTION

Le transport maritime représente 90% des échanges mondiaux des marchandises. Il est responsable de 3% des émissions globales de CO2 [27]. Cette pollution vient s'ajouter à d'autres émissions de gaz comme l'oxydes d'azote et NOx et l'oxydes de soufre SOx qui représentent un réel danger pour l'environnement en général et pour les riverains en particulier [27].

Le secteur maritime compte à ce jour plus de 100 000 navires commerciaux en service [27]. Généralement, un navire en escale dans un port, fait en moyenne 48 heures pour charger ou décharger les marchandises. Pendant cette période, si bien courte qu'elle soit, le navire profite de 100% de l'énergie fournie par ses générateurs. Ces derniers fonctionnent donc sans arrêt.

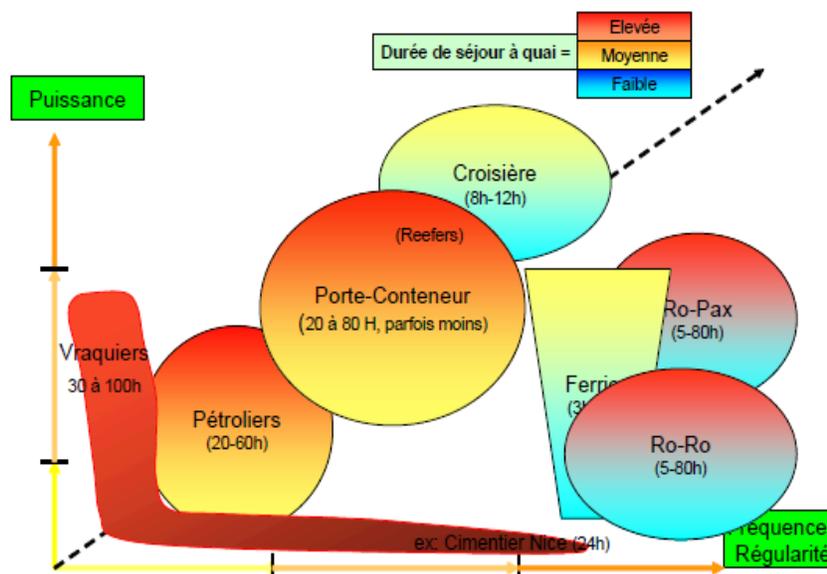


Figure 15 : Typologie des navires selon leur profil de consommation d'électricité à quai

La réglementation internationale et les associations spécialisées telles que l'OMI exigent des navires qu'ils réduisent profondément leur pollution lors de l'accostage. Dans ce contexte, la technologie de connexion à terre apporte une solution intéressante évitant aux navires de faire fonctionner leurs moteurs auxiliaires à quai en fournissant de l'énergie électrique directement à partir du système de distribution électrique terrestre [28].

Le branchement des navires aux réseaux d'alimentation électrique terrestres permet d'assurer l'ensemble des besoins énergétiques des navires à quai : principalement l'éclairage, le chauffage, l'air conditionné, l'eau chaude, mais aussi dans certains cas, la température contrôlée des conteneurs ou des autres marchandises, les pompes de ballastage, les équipements de manutention, chaudières et treuils d'amarrage [29].

Toutefois, le branchement direct à quai impose des investissements à la fois de l'armateur et des autorités portuaires ou opérateurs de terminaux qui doivent soit modifier les infrastructures existantes, soit en construire de nouvelles [5].

La technologie est disponible et suscite une attention croissante au vu du potentiel de réduction des émissions polluantes et de l'imminence de sa normalisation. Les réglementations se multiplient et le courant quai fait l'objet de débats accrus dans l'Union européenne (UE), aux États-Unis et au sein de l'OMI, institution spécialisée de l'ONU. Cette technologie est bien implantée et déjà disponible dans plusieurs ports, notamment aux États-Unis, en Belgique, en Chine, au Canada, en Allemagne, en Suède, en Finlande et aux Pays-Bas. Une nouvelle série de normes électriques internationales en passe d'être ratifiée devrait accélérer son développement pour tous les principaux types de navires et de ports à travers le monde [5].

Au Canada, le gouvernement fédéral a instauré un programme de financement pour aider les ports à défrayer le coût de l'installation de ce type de système sur leur territoire. Le Programme d'alimentation à quai pour les ports (PAQP) s'inscrit dans les initiatives du gouvernement du Canada visant à limiter la pollution atmosphérique et les gaz à effet de serre

au Canada et à améliorer la qualité de l'air dans les secteurs portuaires près des grandes villes [30].

Dans le Saint-Laurent, les ports de Québec et de Montréal ont pu bénéficier de l'aide financière du gouvernement. Le Port de Montréal a ainsi installé un système d'alimentation à la fois pour les navires hivernant et les navires à son nouveau terminal de croisière. Cet important projet devrait permettre une réduction des émissions de GES de 2 800 tonnes par année [30].

### **3.1.1. Les émissions polluantes des navires**

La pollution de l'air résulte principalement des activités humaines. À long terme, les émissions atmosphériques sont susceptibles de causer des déséquilibres dans l'atmosphère en raison de leur continuité et de leur caractère cumulable, que ce soit à l'échelle locale ou planétaire. Certains phénomènes naturels, comme les éruptions volcaniques et les incendies de forêt, peuvent aussi causer des perturbations importantes dans le milieu atmosphérique. Néanmoins, celles-ci sont généralement de courte durée [31].

Le transport maritime, bien qu'efficace sur le plan énergétique, émet en grande quantité certains polluants (SO<sub>x</sub>, No<sub>x</sub>) et représente, selon l'Organisation maritime internationale (OMI), environ 3% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, les experts prévoient que ces émissions devraient plus que doubler d'ici 2050 si aucune mesure de réduction n'est prise. Les projections actuelles montrent que sans nouvelle réglementation, le secteur maritime émettra davantage de SO<sub>x</sub> et de No<sub>x</sub> que toutes les sources terrestres réunies d'ici 2020 [32].

Tableau 3 : Facteurs d'émission de gaz d'échappement pour les générateurs à moteur diesel [33]

No :	Composant de gaz	Unité	AE-1	AE-2	AE-3
1	NOx	g/kWh	12.29	12.33	13.49
2	CO2	g/kWh	1.05	1.09	1.19
3	HC	g/kWh	0.81	0.83	0.90
4	SOx	g/kWh	6.31	6.34	6.34

Le CO2 a un effet direct sur le changement et le réchauffement climatiques. Les oxydes de soufre (SOx) et les oxydes d'azote (NOx) accroissent les processus d'eutrophisation et d'acidification des mers et des océans avec une accentuation en mers semi-fermées. Les particules fines sont notamment impliquées dans certains cancers. Finalement, les émissions de gaz par les navires ont des implications très nettes en termes de politique de santé publique et de politique environnementale [34].

Les navires à quai engendrent avant tout une pollution locale, dont les effets sont sensibles dans un périmètre géographique généralement limité. De ce fait, les quais situés à proximité des centres-villes sont particulièrement exposés au problème de la pollution [27].

#### Dioxyde de carbone (CO2)

Les émissions totales de CO2 du transport maritime sont passées de 910 millions de tonnes à 932 millions de tonnes (+2,4%) de 2013 à 2015. En 2015, les transports maritimes globaux ont représenté environ 2,6% des émissions mondiales de CO2, la majorité (87%) des émissions de CO2 des transports maritimes étant imputables aux activités de transport maritime international. Le transport maritime intérieur a représenté environ 9% des émissions totales de CO2 du transport maritime et la pêche, environ 4% en 2015. Même si elles sont restées inférieures au sommet de 2008, les émissions du transport maritime international

pourraient être en train de rebondir par rapport au minimum de 2010, alors que l'économie mondiale se remettrait de la récession de 2008 [35].

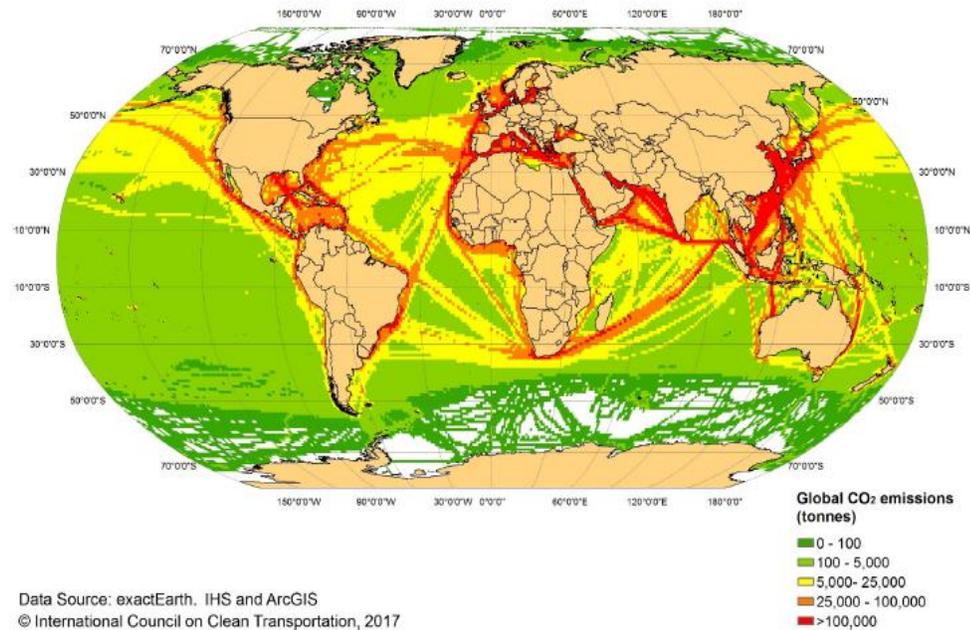


Figure 16 : Répartition mondiale des émissions de CO<sub>2</sub> du transport maritime en 2015 [35]

### Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Les oxydes de d'azote sont également réglementés par l'IMO dans le cadre de l'Annexe VI de MARPOL (Convention internationale pour la prévention de la pollution marine par les navires). Cependant, les limites des émissions des NO<sub>x</sub> ne concernent que les navires récents en fonction de leur date de construction et de la vitesse nominale du moteur.

Il existe trois niveaux de limite [2] :

- Niveau I : les navires construits entre 2000 et 2011 doivent être conformes aux émissions de NO<sub>x</sub> à une vitesse maximale du moteur d'environ 9,8 - 17 g/kWh
- Niveau II : ceux construits après 2011 doivent être conformes à 7,7 - 14,4 g/kWh

- Niveau III : les navires opérant après 2016 dans les zones de contrôle des émissions de NOx (NECA) doivent être conformes aux émissions de 2,0 - 3,4 g/kWh.

À l'heure actuelle, aucune NECA n'existe en Europe. Du fait d'un manque de NECA et de limites d'émissions des NOx se référant uniquement à de nouveaux navires, l'impact de la réglementation de l'IMO sur les NOx semble être limité [36].

### Oxydes de soufre (SOx)

La plupart des pluies acides sont causées par le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote en suspension dans l'air. Le dioxyde de soufre provient en majeure partie des centrales électriques au charbon et au fioul, tandis que les oxydes de soufre proviennent des gaz d'échappement des voitures, des camions et des navires. Cette problématique est traitée par les navires dans la convention MARPOL. Cette dernière introduit des limites d'émission pour les principaux polluants atmosphériques provenant des gaz d'échappement des navires, dont les oxydes de soufre (SOx). Aujourd'hui le taux maximum de SOx autorisé dans les gaz d'échappement des moteurs des navires est fixé à 3,5% dans le monde entier, sauf dans les zones d'émissions contrôlées de soufre, appelées zones SECA (Sulphur Emission Control Area). Dans ces zones, le taux maximum de SOx rejeté est fixé à 0,1%. Ainsi, la plupart des navires qui sont exploités tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de ces zones de contrôle des émissions utilisent différents fuel-oils, en vue de respecter les limites respectives. En pareil cas, avant l'entrée dans une telle zone, les navires doivent avoir procédé au changement de combustible afin d'utiliser le fuel-oil conforme aux limites en vigueur dans la zone de contrôle des émissions. Ils doivent disposer à bord d'une procédure écrite indiquant comment doit se faire le changement de fuel-oil. De la même manière, l'opération de changement de fuel-oil conforme aux limites en vigueur dans la zone de contrôle des émissions ne doit être entamée qu'après la sortie d'une telle zone [37].

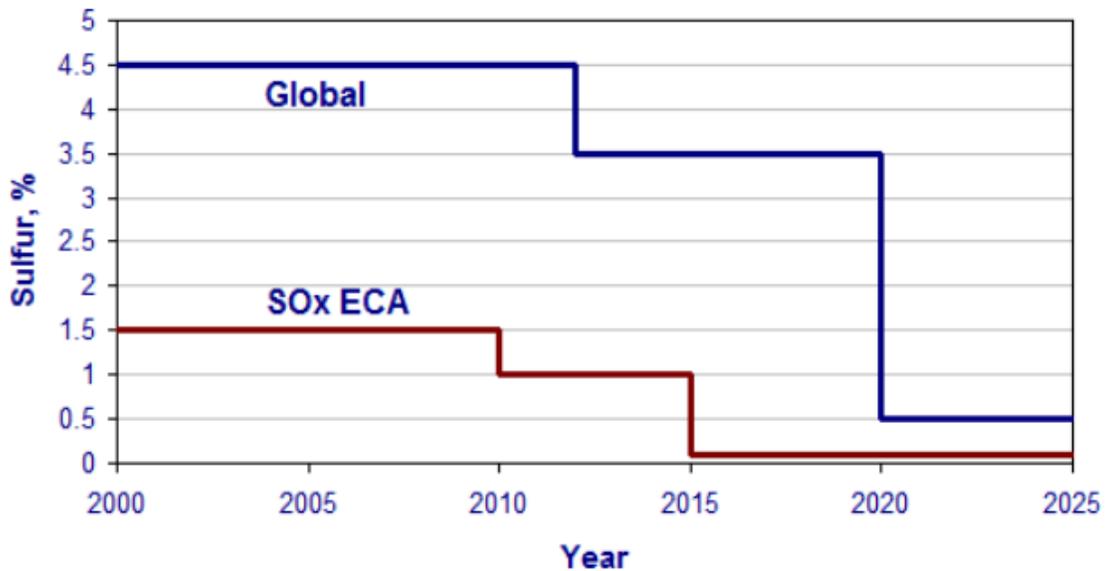


Figure 17 : Echancier de la réduction des SOx (Source : [www.imo.org](http://www.imo.org))

### Équivalent dioxyde de carbone (CO2 éq.)

Les estimations des émissions de CO2 éq. fournissent une méthode pratique pour présenter la somme du potentiel de réchauffement planétaire (PRP) des constituants des GES émis par la combustion de carburants (CO2, CH4 et N2O). En présentant les GES de la façon proposée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le méthane est considéré comme ayant un potentiel de réchauffement planétaire de 25 et le N2O de 298 (en relation avec le CO2 qui a un potentiel de réchauffement planétaire de 1). La notion de CO2 éq. incorpore les GES en une mesure indicative de l'effet de réchauffement potentiel global de toutes les émissions de GES provenant des moteurs qui consomment du carburant.

Les prévisions concernant les émissions de CO2 éq. doivent être interprétées avec prudence, puisque des améliorations sur l'efficacité de la consommation de carburant pour les équipements de manutention du fret et des moteurs de navires ont été notées récemment.

Par contre, ces améliorations ne sont pas encore documentées et ne peuvent être utilisées dans les prévisions de l'inventaire des émissions [38].

Les NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et MP sont des polluants primaires et représentent, au Canada, 93 % des coûts en matière de santé humaine et d'impacts des émissions des moyens de transport sur l'agriculture et l'environnement. L'exposition aux NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et MP est liée à l'augmentation du taux de morbidité humaine, d'asthme, d'emphysème et de bronchite et peut aggraver les maladies existantes du cœur et des poumons. Ces polluants contribuent également à la formation du smog et à l'acidification du sol et des eaux qui influence négativement la vie animale et végétale. Les matières particulaires les plus petites (2,5 microns) contribuent de façon importante à la formation du smog et à la visibilité médiocre [39].

### **3.2. LES SOLUTIONS POUR REDUIRE EMISSIONS POLLUANTES DES NAVIRES AU PORT**

Face à la pollution croissante dans les régions portuaires, une prise de conscience mondiale s'est faite à ce jour, pour développer un plan de diminution du taux d'émissions nocives des navires [27].

Il existe actuellement plusieurs moyens de réduire la pollution causée par le transport maritime, parmi lesquels les quatre principaux sont :

- Le raccordement électrique des navires à quai,
- L'utilisation des laveurs à gaz,
- L'utilisation des carburants à faible teneur en soufre,
- L'utilisation des carburants à base de gaz naturel liquéfié (GNL).

#### **3.2. 1. Le raccordement électrique des navires à quai**

Il s'agit de fournir de l'électricité à bord des navires par le réseau électrique du port au lieu de produire de l'électricité par les générateurs diesel des navires. Cela suppose d'arrêter les groupes internes des navires et d'alimenter leur réseau de bord en le raccordant au réseau électrique du port, permettant ainsi l'élimination d'émissions des navires pendant leur

période à quai. Cette solution permet en outre de réduire la consommation de diesel et nous épargne des nuisances sonores des moteurs diesel [12].

La technologie d'alimentation électrique à terre est un moyen approprié de réduire la pollution de l'air des navires [40]. C'est aussi l'une des stratégies recommandées par l'initiative mondiale sur le climat portuaire pour réduire l'impact environnemental des navires de mer dans les ports [41]. Cette technologie peut être appliquée avec de l'énergie renouvelable afin d'éliminer les émissions de GES (Gaz à effet de serre) et d'autres gaz polluants.

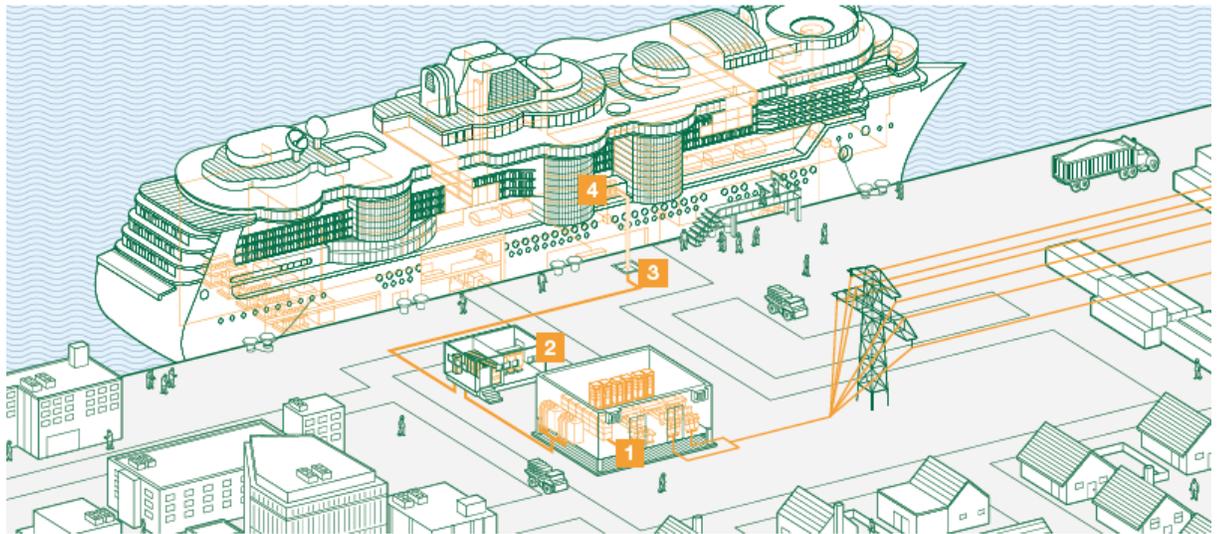


Figure 18 : Exemple illustratif de l'alimentation électrique à quai [42]

*1. Sous-station ; 2. Convertisseurs de fréquence ; 3. Terminal du quai ; et 4. Puissance électronique.*

En effet l'alimentation électrique au quai est l'une des solutions de réduction des émissions polluantes des navires. Le raccordement électrique des navires à quai : il s'agit de fournir de l'électricité à bord des navires par le réseau électrique du port au lieu de produire de l'électricité par les générateurs diesel des navires. Cela suppose d'arrêter les groupes internes des navires et d'alimenter leur réseau de bord en le raccordant au réseau électrique du port, permettant ainsi l'élimination d'émissions des navires pendant leur période à quai.

Cette solution permet en outre de réduire la consommation de carburant d'origine fossile et nous épargne des nuisances sonores des moteurs diesel [27].

Déjà vers les années 1980, les navires commerciaux avec la propulsion électrique, utilisaient ce système d'alimentation électrique à terre. Les traversiers sont les premiers navires à être connectés à OPS (Onshore Power Supply). La raison en était qu'ils étaient toujours ancrés dans la même position, facilitant ainsi la connexion [43].

La tension nominale du réseau n'est néanmoins pas aussi importante que sa fréquence. En Europe, en Asie et en Afrique, la tension du réseau électrique est de 50 Hz et en Amérique du Nord de 60 Hz. Compte tenu de cet aspect du système électrique du navire, les niveaux de tension et de fréquence sont essentiels. La tension nominale du système électrique du navire varie selon la classe de navire, sa taille et ses conditions d'exploitation régionales [44].

La fréquence de la tension du système électrique du navire, de 60 Hz (environ 70%), prévaut dans la marine marchande mondiale, alors qu'il existe au moins cinq niveaux de tension inférieurs à 1 kV et trois supérieurs à 1 kV. La majorité des navires en cours de navigation disposent d'un champ séparé dans son tableau de commutation principal, permettant la connexion du système d'alimentation électrique du navire à un réseau électrique terrestre. Le panneau de « connexion à terre » est uniquement équipé de l'installation de connexion et du contrôle séquentiel des phases. Le navire peut également être connecté à terre si une source de tension à terre est disponible avec la tension nominale du système électrique du navire. À l'heure actuelle, le principal obstacle est l'incompatibilité électrique. Par conséquent, l'alimentation du système électrique du navire au moyen d'un réseau électrique terrestre est relativement rare.

La méthode permettant de passer du système électrique autonome de son navire à une connexion à terre est l'un des aspects importants de l'apparition d'une panne totale. Dans une automatisation moderne de la salle des machines et des systèmes de contrôle des navires, cela est inacceptable. Dans les conditions économiques et organisationnelles actuelles, ainsi que l'infrastructure technique du transport maritime mettant l'accent sur la sécurité, la manière de

changer la source d'énergie électrique en cas de panne d'électricité ne peut pas être envisagée. Comme mentionné ci-dessus, le principal problème lors de la conception du raccordement du système d'alimentation électrique du navire à un réseau électrique terrestre consiste à « adapter » le réseau électrique terrestre à divers systèmes de navires autonomes [33].

### **3.2.1. 1. La production d'énergie**

Tandis que le OPS (Onshore Power Supply) élimine les émissions des navires à quai, il faut prendre en considération les émissions associées à la production d'électricité en tant que telle, car la source de cette énergie aura une influence majeure sur la réduction globale des émissions atteinte.

En particulier, si l'énergie renouvelable est utilisée, des émissions des GES et tous les autres types de polluants pourraient être proches de zéro. Des études démontrent que les émissions moyennes de dioxyde de carbone du mélange énergétique de l'UE<sup>3</sup> sont inférieures d'environ 50% aux émissions des moteurs diesel. Alors que les centrales au charbon émettent plus de CO<sub>2</sub>, elles émettent moins d'oxydes d'azote (comparées à celles associées à la combustion de diesel avec une teneur en soufre de 0,1 ou 2,7%), aux particules (ditto) et aux oxydes de soufre une teneur en soufre de 2,7%) [41].

#### La puissance requise au port

Les exigences de puissance ont un impact significatif sur les coûts d'un système OPS (Onshore Power Supply) et il est donc important de poursuivre les options de réduction d'énergie et d'évaluer à l'avance la demande maximale [45].

---

<sup>3</sup> UE : Union Européenne

Tableau 4 : La demande de puissance de tous les types de navires au port [45]

Type de navires	Puissance moyenne demandée (KW)	Puissance maximale demandée (KW)
Porte-Conteneurs (< 140 m)	170	1000
Porte-Conteneurs (> 140 m)	1200	8000
Porte-Conteneurs total	800	2000
Ro-Ro & Porte-Véhicules	1500	2000
Pétrolier	1400	2700
Navires de croisière (< 200 m)	4100	7300
Navires de croisière (> 200 m)	7500	11000

La plus élevée demande de puissance est réalisée par les navires de croisière (jusqu'à 20 MVA). Ce type de navire est caractérisé par un temps court d'accostage avec une forte demande de puissance. D'un autre côté, les ferries ont des systèmes de faible puissance, très souvent en basse tension. Leurs escales sont régulières et fréquentes, accostent au même quai ; Les porte-conteneurs détiennent une puissance élevée, n'ayant pas un emplacement au même quai lors de leurs escales ; Les navires Ro-Ro ont un temps d'escale long (24h et plus) ; Les pétroliers et les vraquiers ont une faible fréquence d'escale dans un même port [46].

### Le niveau de puissance demandé à quai

La puissance installée varie en fonction du type de navire de quelques kVA pour les petits bateaux jusqu'à 15-20 MVA pour les grands navires de croisière. Ci-dessous, le Tableau 3 indique une estimation approximative de la puissance électrique demandée par chaque type de navire en moyenne.

Tableau 5 : Puissance électrique demandée par type de navire

<b>Type de navire</b>	<b>Puissance demandée</b>
Navire de croisière	10 – 20 MVA
Porte-conteneurs	5 – 7 MVA
Roulier (Ro-Ro)	1 – 6 MVA
Ferry	1 – 6 MVA
Vraquier	5 – 10 MVA
Pétrolier	5 – 7 MVA

### Le niveau de tension de distribution du navire

La majorité des navires opère à une tension de distribution de 440V, 6,6 kV ou de 11 kV dépendant de la puissance des générateurs et des charges du navire. Le Tableau 4 donne la répartition du niveau de tension base ou moyenne selon le type de navire

Tableau 6 : Niveau de tension selon le type de navire

Type de navire	Basse tension	Moyenne tension
Navire de croisière		x
Ferry	x	x
Porte-conteneurs	x	x
Pétrolier	x	

La fréquence du système électrique du navire

La majorité des navires fonctionnent à une fréquence de 60 Hz. Néanmoins, un pourcentage non-négligeable des navires disposent des générateurs qui fonctionnent à 50Hz (Tableau 5). Par exemple, la quasi-totalité des navires effectuant des trajets transocéaniques sont alimentés en 60 Hz (c'est le cas pour 94% des navires transocéaniques faisant escale au port de Rotterdam). A contrario, la proportion du 60 Hz n'est que de 37% à Rotterdam pour les navires de transport maritime courte distance et de 50% pour une sélection aléatoire de 300 navires faisant escale dans ce port [29].

Tableau 7 : Fréquences et tension pour les navires

Type de navire	Basse tension	Moyenne tension	50 Hz	60 Hz
Porte-conteneurs < 140 m	100 %	0 %	63 %	37 %
Porte-conteneurs > 140 m	88 %	12 %	6 %	94 %
Roulier	100 %	0 %	30 %	70 %
Pétrolier	100 %	0 %	20 %	80 %
Navire de croisière < 200 m	100 %	0 %	36 %	64 %
Navire de croisière > 200 m	12 %	88 %	0 %	100 %

### 3.2.1.2. Mode de fonctionnement

La fonction d'un système Shore est d'alimenter un navire lorsqu'il est à quai, ce qui implique la connexion via un câble mobile moyenne tension. Pour cela, des séquences de connexion et de déconnexion bien définies permettant la manutention du câble moyenne tension en toute sécurité ainsi que le basculement de source, des générateurs du navire au système Shore et vice versa, sans coupure pour les charges du navire [27].

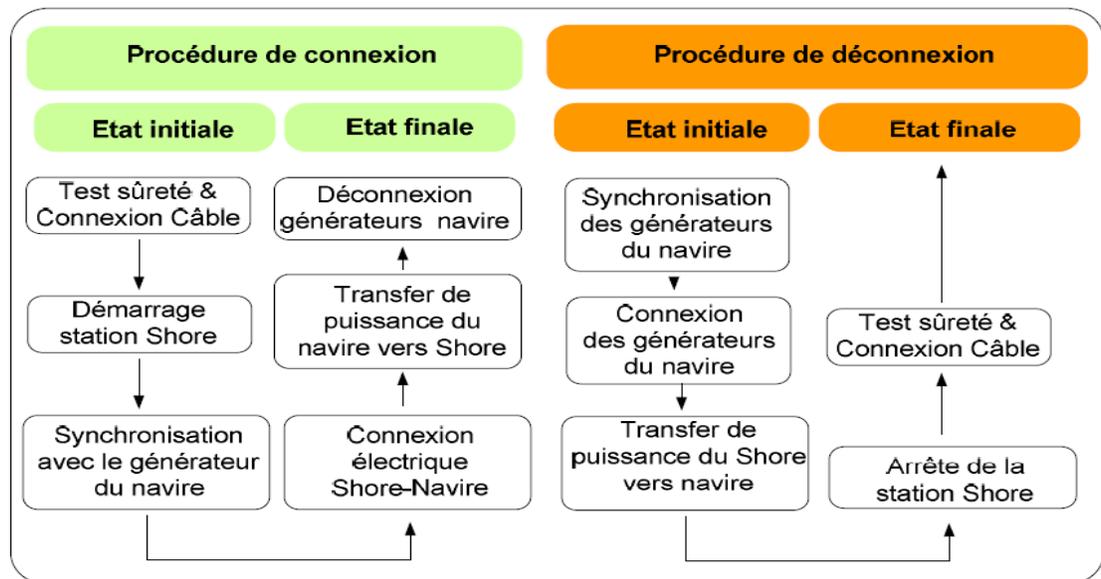


Figure 19 : Séquences de connexion et déconnexion [27]

La connexion du système embarqué d'un navire avec l'installation Shore est effectuée sans interruption par la synchronisation et le fonctionnement en parallèle de la station Shore avec le générateur du navire. Les points clé d'une séquence de connexion sont :

- Consignation du câble MT et de la prise MT pendant les phases de manutention des équipements MT (câble MT et prise MT) en sectionnant ;
- Une fois la connexion du câble effectué ainsi que la déconsignation de ce dernier, le démarrage de la station Shore est effectué pour énergiser le câble MT ;

- Avec le câble énergisé, le navire est capable de synchroniser la tension de ses générateurs à celle de la station Shore [27].

La synchronisation est effectuée manuellement ou automatiquement, de la façon suivante :

- L'amplitude de la tension est réglée via le courant d'excitation du générateur de bord
- La fréquence et la phase sont réglées par ajustement de la vitesse de rotation de ce même générateur
- Couplage Shore-Navire
- Transfer de charges des générateurs vers la station Shore [28], puis déconnexion des générateurs lorsqu'ils ne débitent qu'un faible courant

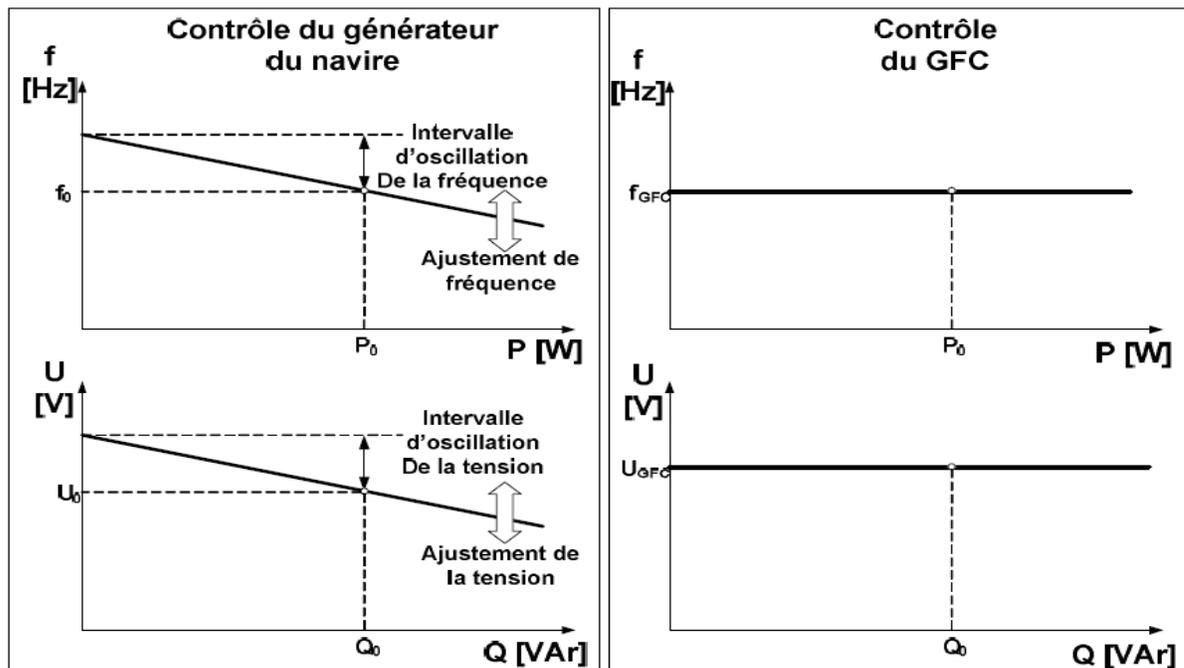


Figure 20 : Synchronisation Shore-Navire [28]

Les étapes suivantes démontrent la séquence complète pour connecter ou déconnecter un navire à l'alimentation électrique à quai :

1. Le navire arrive au port,
2. Les câbles d'alimentation et les câbles de contrôle sont connectés,
3. Le dernier moteur en marche est synchronisé avec le rivage réseau électrique,
4. Après la fermeture du disjoncteur de connexion à quai, la génératrice est déchargée et le moteur est arrêté,
5. Avant que le navire quitte le port, le premier moteur est démarré et synchronisé avec le réseau électrique à quai,
6. Une fois la charge transférée au générateur, la connexion d'OPS s'ouvre,
7. Les câbles d'alimentation et de contrôle sont déconnectés et le bateau est prêt pour le départ [47].

### **3.2.2. Utilisation des dispositifs d'épuration des gaz d'échappement (les scrubbers)**

Il s'agit de dispositifs permettent de filtrer les gaz d'échappement des moteurs et donc de réduire les quantités de soufre rejetées, quelle que soit la teneur en soufre du combustible utilisé. Cette technologie est encore en phase d'expérimentation à bord des navires, il n'y a pas encore suffisamment de systèmes testés, approuvés, pour garantir un résultat fiable [48].

### **3.2.3. Utilisation des carburants à faible teneur en soufre**

Ce sont des combustibles plus coûteux - le risque aujourd'hui est de provoquer un report modal de la mer vers la terre, c'est-à-dire un retour vers la route ou d'autres moyens de transport plus polluants [48].

Tableau 8: Limites de teneur en soufre avec l'approche progressive (% wt)

<b>Année de construction du navire (date de commission de la quille<sup>4</sup>)</b>	<b>1,5 % (Mazout léger ou HFO)</b>	<b>1,0 % (Mazout ou HFO)</b>	<b>0,5 % (Mazout léger)</b>	<b>0,1 % (Mazout léger)</b>
Avant le 1 <sup>er</sup> janvier 1990	2012	S.O.	2016	2020
Du 1 <sup>er</sup> janvier 1990 au 31 décembre 1994	S.O.	2012	S.O.	2018
1 <sup>er</sup> janvier 1995 ou plus tard	S.O.	2012	S.O.	2015

\*S.O. = sans objet. La limite d'émission de soufre indiquée n'est pas pertinente parce qu'une autre limite s'applique déjà

Le contenu en soufre augmente considérablement dans les combustibles moins raffinés. En ce qui concerne ce qui était disponible au Canada, entre 2004 et 2007, le contenu annuel moyen en soufre du mazout marin a été réduit de 0,21 % en 2004 à 0,07 % en 2007 ; pour la même période, le contenu en soufre du combustible résiduel a été réduit de 1,7 % en 2004 à 1,6 % en 2007. Le contenu moyen en soufre du combustible disponible dans la zone des Grands Lacs variait entre 1,5 et 2 % de 2004 à 2007. Selon l'Association des armateurs canadiens, la plupart de ses membres utilisent du combustible dont la teneur en soufre varie entre 1,5 % et 3 %, pour une moyenne de 1,7 % pour 79 navires.

Selon Ressources naturelles Canada et Environnement Canada, il n'existe aucune nouvelle méthode de raffinage en développement au Canada pour réduire la teneur en soufre du combustible résiduel parce que ces méthodes de raffinage ne sont actuellement pas viables

---

<sup>4</sup> La date de commission de la quille marque le début de la construction et est généralement accepté pour déterminer l'âge

sur le plan commercial. Cela pose un problème qui est exacerbé par le déclin de l'approvisionnement en pétrole brut à faible teneur en soufre pour les raffineurs canadiens. Vu la situation dans l'industrie du raffinage, les propriétaires et les exploitants de navires peuvent être plus susceptibles d'opter pour une technologie de remplacement pour se conformer aux normes d'émission ZCE les plus strictes, puis à utiliser le mazout léger pour les flottes vieillissantes et moins efficaces. Le coût du mazout léger est plus élevé que celui du combustible résiduel, et des coûts plus élevés ont un impact direct sur les coûts d'exploitation pour les propriétaires et les exploitants de navires et leurs clients [49].

### 3.2.4. Utilisation des carburants à base de gaz naturel liquéfié (GNL)

Le gaz naturel est un carburant propre qui produit un minimum de NO<sub>x</sub>, de SO<sub>x</sub> et de matières particulaires. Lorsqu'il est utilisé comme carburant de transport, le gaz naturel est soit comprimé, soit liquéfié afin d'accroître sa densité énergétique, de permettre le stockage d'une quantité suffisante à bord et de donner aux moyens de transport une distance d'autonomie acceptable [50]. La Figure 21 illustre quels modes de transport conviennent le mieux à l'utilisation du GNL.



Figure 21 : Les modes de transport convenants au GNL

Un carburant d'avenir pour le transport maritime car il ne produit quasiment aucune émission d'oxyde de soufre et de particules, CO<sub>2</sub> et très peu d'oxydes d'azotes. Le développement de cette solution est actuellement freiné par les difficultés liées à :

- La capacité énergétique du gaz (à la moitié de celle du fuel) ;
- Le stockage à bord des navires nécessite une attention particulière, l'infrastructure de l'approvisionnement est sous-développée ;
- Le recours au GNL implique de modifier significativement les navires existants ou de renouveler les flottes [48].

Le GNL refroidit à l'état liquide à  $-162\text{ °C}$  pour en réduire le volume 620 fois comparativement au gaz naturel à la pression normale et est idéal pour les traversiers, les navires, les véhicules ferroviaires, les camions long courrier, les applications minières et industrielles [50].

#### **3.2.4.1. Avantages et inconvénients liés au GNL pour alimenter les navires**

Les principaux avantages du GNL, par opposition au carburant à base de pétrole, sont clairs :

- Le GNL dégage considérablement moins de SO<sub>x</sub>, c'est-à-dire entre 90 et 95 pour cent. Les émissions de NO<sub>x</sub> diminuent d'environ 80 % si l'on utilise le GNL comme carburant. Le GNL réduit également les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans une proportion d'environ 20 à 25 pour cent, selon le type de moteur et de mesures appliquées pour réduire l'échappement de méthane non utilisé et l'émission de particules.
- En cas de fuite, le GNL s'évapore dans l'air ou à la surface de l'eau. Le risque de pollution marine est donc substantiellement réduit en cas de rejet. Cette caractéristique est avantageuse, surtout à la lumière des préoccupations croissantes pour la protection de l'environnement marin fragile de l'Arctique, étant donné que cette région a connu une augmentation du transport et que des routes maritimes y ont été ouvertes.

- Les prix du GNL en font le carburant le plus abordable pour les propriétaires de navires, du fait qu'il coûte manifestement moins cher que le diesel, et cela donne au GNL l'attrait commercial nécessaire qui lui manquait auparavant [51].



Figure 22 : NM F.-A.-Gauthier (Premier traversier à être propulsé au GNL en Amérique du Nord) [52]

Avec l'actuelle réglementation internationale rigoureuse de l'OMI, le GNL offre un plafond d'émissions facile à respecter pour les navires et il peut être présenté sur le marché comme un choix écologique – aspect à ne pas négliger dans un contexte mondialisé, où les consommateurs sont de plus en plus conscients des changements climatiques et demandent des comptes aux sociétés au sujet des actions qu'elles posent afin de contribuer à la réalisation des solutions envisagées [51].

Les avantages comparatifs du raccordement électrique des navires à quai et des technologies antipollution concurrentielles font débat sur plusieurs aspects : le profil d'exploitation du navire (la puissance installée, le temps passé à quai, la fréquence de passage), la fluctuation du prix du fioul par rapport à l'énergie électrique fournie par le réseau terrestre, le taux de réduction de la pollution régionale etc. [27]

### 3.2.2. Aspect technique

Les conditions électriques et de l'infrastructure à terre comprennent un poste industriel pour recevoir l'énergie transmise depuis le réseau local, normalement de 34,5 kilovolts (kV) et un transformateur pour amener la tension vers le bas pour être compatible avec les caractéristiques électriques du navire (par exemple, 6,6 kV ou 11,0 kV 3 phases, 60 Hz). Une liste non exhaustive d'exigences en matière d'infrastructure terrestre comprend :

- Les appareillages de distribution,
- Les circuits,
- Les disjoncteurs, la mise à la terre de sécurité, les gaines de câbles souterraines,
- Les coffres forts électriques ainsi que les prises et fiches d'alimentation et de communication.

Un poste à quai existant doit être modifié pour permettre l'installation de câbles et d'accessoires d'alimentation à quai. Pour la construction d'un nouveau poste d'amarrage, les exigences techniques et les spécifications électriques et d'infrastructure côté mer peuvent être incluses dans la phase de conception [53].

Les navires participant à un programme d'électrification de l'alimentation à quai nécessiteront l'installation de prises de câble d'alimentation à quai et d'un système de gestion électrique associé. Des adaptations peuvent être apportées à la flotte existante sans la capacité d'alimentation à quai. Pour les nouvelles constructions, l'armateur peut demander l'inclusion d'un système prêt à l'alimentation à quai dans la conception du système électrique du navire. Un système d'alimentation à bord comprend des panneaux de prises, un tableau de commutation de tension, des disjoncteurs et un système de contrôle et de surveillance. En fonction de la fréquence et de la tension de l'alimentation électrique de quai et des systèmes électriques d'un navire, un second transformateur pour amener la tension plus basse du système d'alimentation à terre et / ou un convertisseur de fréquence électrique (par exemple, 50 Hz à 60 Hz ou vice versa) peut être nécessaire [53].

Outre les systèmes côtiers et maritimes, il existe d'énormes variations de puissance, de tension et de fréquences dans différentes régions du monde. Les systèmes à basse tension (généralement de 400 à 480 V) appliqués auparavant nécessitaient de nombreux câbles de connexion, tandis que les systèmes à haute tension (6,6 à 11 kV) étaient plus faciles à manipuler. La différence de fréquence électrique entre l'Amérique du Nord et certaines parties du Japon par rapport au reste du monde est également un facteur à prendre en compte. De plus, la fréquence et la tension des systèmes électriques embarqués peuvent différer selon les tailles et les catégories de navires. Navires océaniques (OGV) faisant escale dans les ports européens tendent à avoir plus de systèmes électriques à 60 Hz à bord, tandis que les petits navires ont des systèmes à 50 Hz. Ces derniers sont principalement des navires plus petits ne naviguant pas vers d'autres continents. La demande de puissance moyenne et la demande de pointe de divers types et tailles de navires diffèrent également. En effet, ils varient considérablement. La différence a un impact significatif sur le coût du système d'alimentation à quai. Il est donc important de rechercher des options de réduction de l'énergie et d'évaluer la demande de pointe en énergie à l'avance [53].

Tableau 9 : La puissance requise pour différents navires [54]

Type de navires	Puissance moyenne demandée (MW)	Puissance maximale demandée (MW)	Puissance demandée pour 95% des navires (MW)
Porte-Conteneurs (< 140 m)	0.17	1	0.8
Porte-Conteneurs (> 140 m)	1.2	8	5
Porte-Conteneurs total	0.8	8	4
Ro-Ro & Porte-Véhicules	1.5	2	1.8

Pétroliers	1.4	2.7	2.5
Navires de croisière (< 200 m)	4.1	7.3	6.7
Navires de croisière (> 200 m)	7.5	11	9.5
Navires de croisière (> 300 m)	10	20	12.5

L'infrastructure d'alimentation à terre varie également selon le type de navire. Pour les navires tels que les pétroliers, les navires de croisière et les navires rouliers (Ro-Ro) qui accostent généralement au même quai et n'utilisent pas de grues, la connexion à terre est plus facile. Aux terminaux de conteneurs où les navires ne sont pas toujours amarrés au même endroit, un nombre accru de points de connexion est nécessaire. La Commission électrotechnique internationale (IEC), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) publient conjointement une norme volontaire pour les systèmes d'alimentation à quai. La norme IEC/ISO/IEEE 80005-1, couvre les équipements de connexion et d'interface onshore, on board et shore-to-ship. Il décrit comment concevoir, installer et tester les systèmes d'alimentation à quai à haute tension, traite des aspects de sécurité tels que les arrêts d'urgence et impose des exigences supplémentaires aux navires à passagers, navires de croisière, navires porte-conteneurs, pétroliers et méthaniers. Notamment, il ne traite pas des problèmes de fréquence et des systèmes à basse tension [53].

En dépit de tout cité ci-haut, il reste quand-même deux grands challenges techniques de la connexion des navires électriques à quai, qui sont :

- 1) La compatibilité des systèmes Shore et Navire, c'est-à-dire que le système Shore et Navire peuvent être connectés et fonctionnent correctement ;
- 2) Et l'interopérabilité des systèmes, c'est-à-dire qu'un navire puisse se connecter dans différents ports et qu'une installation Shore puisse se connecter à différents navires.

Pour garantir la compatibilité ainsi que l'interopérabilité, la norme IEC/ISO/IEEE 80005- [IEC 05] définit, pour chacun des systèmes électriques Shore et Navire, des exigences techniques à satisfaire. Une de ces exigences concerne la sélectivité des protections : la norme stipule que l'installation Shore soit capable de faire déclencher la protection de la plus grande charge sur le navire. Dans le cas d'un système Shore avec conversion de fréquence, le courant de court-circuit en aval de la station Shore est limité par les convertisseurs statiques en amplitude et en temps. Ainsi une attention particulière doit être accordée aux protections à maximum de courant de phase (code ANSI 50/51 [ANS 50]). Pour la protection ANSI 50/51, la grandeur mesurée est le courant, ce type de protection étant utilisée pour détecter les surintensités monophasées, biphasées ou triphasées. Lorsqu'un, deux ou trois des courants concernés dépassent la consigne correspondant au seuil, la protection devient active et déclenche [30].

### **3.2.3. Aspect économique**

Bien que le système d'alimentation à quai semble simple à première vue, il ne s'agit pas seulement de brancher un fil dans une prise. Plusieurs contraintes rendent l'installation du système complexe et coûteuse : la configuration des installations terrestres d'alimentation à quai, l'emplacement et les limites des installations de raccordement à l'alimentation à quai du navire (s'il en possède) et la disponibilité de l'énergie électrique à fournir [30].

Le Programme d'alimentation à quai pour les ports (PAQP) s'inscrit dans les initiatives du gouvernement du Canada visant à limiter la pollution atmosphérique et les gaz à effet de serre au Canada et à améliorer la qualité de l'air dans les secteurs portuaires près des grandes villes [55].

Le tableau 10 illustre les projets financés par le Programme d'alimentation à quai pour les ports (PAQP) au Canada

Tableau 10 : Les projets de l'alimentation électrique des navires à quai financés par le PAQP, par province (Crédit : Transports Canada)

<b>Province</b>	<b>Port</b>	<b>Projet</b>	<b>Financement</b>
Colombie-Britannique	Seaspan Ferries Corporation	Projet d'alimentation quai au terminal de Swartz Bay	88 346,00 \$
Colombie-Britannique	Administration portuaire de Vancouver-Fraser	Projet d'alimentation à quai au Port de Vancouver pour mettre à niveau et améliorations au terminal de croisière situé à la Place du Canada	347 477,00 \$
Colombie-Britannique	Traversiers de la Colombie-Britannique	Projet d'alimentation à quai de BC Ferries	2 022 590,00 \$
Colombie-Britannique	Administration portuaire de Vancouver-Fraser	Projet d'alimentation à quai au terminal de conteneurs Centerm	3 500 000,00 \$
Colombie-Britannique	Administration portuaire de Vancouver-Fraser	Projet d'alimentation au troisième poste à	3 550 000,00 \$

		quai du terminal de conteneurs Deltaport	
Nouvelle-Écosse	Administration portuaire d'Halifax	Projet d'alimentation à quai du Port d'Halifax	5 000 000,00 \$
Québec	Administration portuaire de Montréal	Projet d'alimentation électrique à la jetée Alexandra du Port de Montréal	5 000 000,00 \$

Le programme aide à diminuer les émissions en réduisant la durée de la marche au ralenti des navires à quai. Il s'agit d'une des façons dont le Canada donne suite à son engagement de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 17 % d'ici 2020, par rapport aux niveaux de 2005. Le programme fournira jusqu'à 50 % du financement pour la mise en œuvre de la technologie d'alimentation à quai des navires dans les ports canadiens. Cette technologie permet aux navires de couper leurs moteurs diesel auxiliaires lorsqu'ils sont amarrés et de se brancher à une source d'alimentation électrique [55].

D'après les statistiques des Transports Canada, on peut souligner ce qui suit :

- Depuis 2009, les installations d'alimentation à quai du terminal de croisière du Port de Vancouver ont permis d'éviter l'émission de 524 tonnes de polluants atmosphériques et de 18 264 tonnes de gaz à effet de serre,
- Le Programme d'alimentation à quai pour les ports du Canada a fourni plus de 19,5 millions de dollars aux administrations portuaires, aux exploitants de terminaux et aux exploitants de traversiers canadiens afin d'appuyer le déploiement de la technologie d'alimentation à quai.

Toujours dans ce contexte économique, les Transports Canada ont lancé, en 2018 dernier, un plan stratégique pour l'avenir des transports au Canada (Transports 2030) qui vise à favoriser la croissance économique et la création d'emplois et à répondre aux besoins de la classe moyenne du Canada.

Pour le secteur maritime :

- 3) Les navires étrangers sont désormais autorisés à transporter leurs conteneurs vides entre différents endroits au Canada sans un permis spécial, ce qui répondra à la pénurie actuelle de conteneurs disponibles pour l'exportation et pourra entraîner une réduction de coûts des échanges commerciaux.
- 4) Les autorités portuaires canadiennes ont désormais accès au financement de la Banque de l'infrastructure du Canada.
- 5) Par conséquent, ces ports auront davantage d'options de financement permettant d'améliorer leur équipement et leurs infrastructures maritimes (par exemple, les quais, les embarcadères, les terminaux).

### Coût de l'électricité aux ports

La comparaison des coûts unitaires de l'énergie électrique entre les mazouts marins et l'énergie côtière lorsque le navire se trouve à quai de 31 nations maritimes différentes est donnée au tableau 11 [56].

Tableau 11 : Différences des coûts unitaires de l'énergie électrique entre nations [56]

<b>Ports</b>	<b>Pays</b>	<b>Prix de l'électricité (USD/KWh)</b>
Shanghai	Chine	0.10
Singapour	Singapour	0.35
Busan	Corée du Sud	0.10
Jebel Ali	Émirats arabes unis	0.06

Rotterdam	Pays-Bas	0.12
Port Klang	Malaisie	0.11
Hambourg	Allemagne	0.21
Anvers	Belgique	0.13
Los Angeles	États-Unis	0.10
Keihin Ports	Japon	0.22
Tanjung Priok	Indonésie	0.07
Laem Chabang	Thaïlande	0.14
Ho Chi Minh	Vietnam	0.06
Valencia	Espagne	0.16
Colombo	Sri Lanka	0.20
Jawaharlal Nehru	Inde	0.09
Felixstowe	Royaume Uni	0.15
Port Said	Egypte	0.05
Manilla	Philippines	0.23
Salalah	Oman	0.03
Colon	Panama	0.17
Santos	Brésil	0.35
Ambarli	Turquie	0.11
Gioia Tauro	Italie	0.23
Metro Vancouver	Canada	0.09
Melbourne	Australie	0.15
Durban	Afrique du Sud	0.10
Saleef	Yémen	0.08
Novorossiysk	Russie	0.07
Jubail	Arabie saoudite	0.10
Aqaba	Jordanie	0.22

### Importance de combiner le OPS avec les sources d'énergie renouvelables au port

L'alimentation électrique à terre (OPS) peut aider à réduire de façon significative des émissions de polluants. Mais, la combinaison de OPS avec d'autres solutions peut permettre d'éliminer les polluants des navires quand ils sont amarrés. Par exemple, la combinaison de OPS avec des sources d'énergie renouvelables est présentée comme un meilleur moyen d'éliminer les émissions de GES des ports et des villes portuaires [40].

Lorsque les moteurs des navires sont en marche, leurs gaz d'échappement polluent les ports et zones côtières. Ces gaz peuvent être retirés si l'énergie utilisée dans les navires provient de sources d'énergies renouvelables.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables dans les installations de OPS dépend des emplacements du port, des facteurs économiques ou juridiques. L'énergie éolienne peut être la principale source d'énergie renouvelable dans les ports situés dans des pays qui ont beaucoup de vent. À l'inverse, l'énergie solaire peut être la principale source des ports méditerranéens. L'emplacement permet d'installer des parcs éolien et solaire pour alimenter les navires au port en électricité [40].

### **3.3. CONCLUSION**

Ce chapitre sur l'alimentation électrique des navires à quai des navires, a eu pour but la familiarisation du lecteur avec ce nouveau concept d'alimenter les navires via le réseau de distribution portuaire. Tout d'abord, les contraintes existantes pour l'implémentation de ces systèmes, d'une part, créés par l'émission des gazes nocives et d'autre part par les normes techniques internationales, ont été présentés. La qualité d'air dans les régions portuaires est le principal aspect qu'intervient dans la proposition du concept de l'alimentation à quai de navires. Le niveau très élevé de l'émission toxique éliminée par les génératrices électriques

des navires pendant l'accostage a été mis en discussion dans la dernière période par les organismes internationaux. L'alimentation à quai des navires vient donc comme une solution viable pour diminuer la pollution dans les grands ports.

La technologie d'alimentation électrique à terre est un moyen approprié de réduire la pollution de l'air par les navires. Cependant, cette technologie peut être appliquée avec des énergies renouvelables afin d'éliminer les émissions de GES et autres gaz polluants. Il convient toutefois de noter que le niveau de mise en œuvre de cette technologie est actuellement très faible. Pour atteindre un plus haut niveau de mise en œuvre, il est nécessaire de développer deux clés importantes. D'une part, la conception des installations de production d'énergie à partir de sources renouvelables. D'autre part, l'adaptation de l'installation nécessaire sur le navire pour recevoir l'énergie électrique du rivage. En outre, il est possible de souligner que l'expérience des ports actuellement dotés d'OPS a été satisfaisante.

Avant d'analyser les solutions d'augmentation du courant de court-circuit, le chapitre suivant est dédié à la modélisation d'un système de génération de l'énergie solaire sur un navire.



## **CHAPITRE 4**

### **MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE GÉNÉRATION DE L'ÉNERGIE (CAS PARTICULIER)**

#### **4.1 INTRODUCTION**

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production [57].

La production d'électricité est donc forcément, malgré une apparence anodine, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un mode de production accentue fortement l'effet nuisible qui lui est associé et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir. Cependant, ceci doit s'inscrire dans une politique de développement durable, dans laquelle de nombreuses nations s'engagent aujourd'hui plus ou moins timidement. C'est pourquoi le système de production centralisé, associé à une part croissante de dispositifs de production décentralisés, semble représenter une réponse raisonnable à cette exigence. Cette solution permet à la fois l'exploitation des ressources locales et, contrairement aux systèmes autonomes, leur mutualisation grâce à l'interconnexion par le réseau existant. Mais à plus long terme, il ne semble pas raisonnable de considérer l'extension d'une telle décentralisation sans y adjoindre des moyens de stockage d'énergie [57].

Depuis plusieurs années, de nombreuses équipes cherchent à dimensionner des systèmes à base d'énergies renouvelables pour diminuer le coût financier et/ou le coût en

énergie grise sur leurs cycles de vie. Pour cela, à partir de base de données météorologiques, il faut développer des modélisations énergétiques couplées à des modèles de coût d'énergie grise et ensuite utiliser des algorithmes d'optimisation. Pour des dimensionnements sur cycle de vie, il est nécessaire de prendre en compte les conditions météorologiques réparties au moins sur une année. Cela mène à un volume de base de données de grande taille. Ainsi, la mise en œuvre des algorithmes d'optimisation nécessite un temps de convergence très long (plusieurs jours). Par ailleurs, depuis de nombreuses années, beaucoup de métamodèles à base de plan d'expériences ont été développés dans de nombreux domaines. Récemment cette approche de modélisation à base de modèle de substitution a été appliquée avec succès à un système de production d'énergie électrique à base de sources renouvelables et un groupe électrogène, et aussi sur un système couplé à une production d'eau potable avec un stockage hydraulique [58].

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer.

## **4.2 DESCRIPTION DU NAVIRE FERBEC**

FERBEC est un navire vraquier construit en 2002 et destiné au transport de marchandises solides en vrac. Il peut s'agir de sable, de granulats, de céréales mais aussi de matériaux denses comme les minéraux.



Figure 23 : Navire FERBEC

Pour assurer la production d'énergie électrique, FERBEC dispose de quatre générateurs diesel comprenant 3 générateurs de 500 kW et 1 générateur de 650 kW avec une tension de sortie de 480 Volts. Il convient de mentionner que seul le générateur principal (1 x 500 kW) fonctionne 24 heures par jour pendant 300 jours au cours d'une année. Le deuxième générateur (1 x 500 kW) prend le relais lorsque le navire navigue dans la zone confiée, tandis que le troisième et le quatrième générateur ne fonctionnent que pendant le chargement ou le déchargement du navire à quai.

Le tableau 12 montre la consommation moyenne pour 500 kW et 650 kW de générateurs diesel à différentes charges appliquées.

Tableau 12 : Consommation moyenne pour 500 kW et 650 kW à différentes charges appliquées.

<b>Puissance du générateur (kW)</b>	<b>¼ du chargement (gal/hr)*</b>	<b>½ du chargement (gal/hr)</b>	<b>¾ du chargement (gal/hr)</b>	<b>Full chargement (gal/hr)</b>
500	11	18.5	26.4	35.7
600	-	25.7	35.8	46.2

\* 1 gallon = 3,78 litres

FERBEC navigue 43 semaines par an. Pour calculer le coût total du carburant consommé, il est nécessaire de définir un itinéraire pour le navire. Pour cela, a été choisi le trajet entre le port de Sorel-Tracy (coordonnées GPS position : N46 ° 2'51.05 W73 ° 6'55.79) et le port de Saint Johns (position GPS : N47 ° 33'41.49 W52 ° 41'49.72). Le temps requis pour effectuer le trajet entre les deux ports est de 6 jours et demi. Pendant ces jours de navigation, le navire navigue pendant 36 heures dans une zone confiée (dans le fleuve Saint-Laurent, entre Les Méchins et Sorel-Tracy), ce qui nécessite le démarrage du deuxième générateur diesel de 500kW (le deuxième générateur est toujours en mode veille lorsque le navire navigue dans une zone confiée). La charge générale appliquée pendant le voyage est estimée à 50% -55%. Une fois que le navire a atteint sa destination pour charger ou décharger la cargaison, les quatre générateurs fonctionnent à 100% pendant 12 heures au maximum.

#### 4.3 ESTIMATION DU COUT ANNUEL EN CARBURANT

- Chaque semaine, le navire fait 6 jours et demi de navigation et une demi-journée au port ;
- Chaque semaine, le navire fait 36 heures de navigation dans une zone confiée nécessitant le démarrage du deuxième générateur ;
- Chaque semaine, les quatrièmes générateurs fonctionnent à 100% pendant 12 heures.

Selon les informations mentionnées ci-dessus, et compte tenu du prix d'un litre de diesel à 1,23 \$ CAD, la consommation totale estimée est décrite dans les tableaux 13 et 14.

Tableau 13 : Estimation du coût annuel en carburant pendant le voyage

<b>PENDANT LE VOYAGE</b>					
GENERATEURS	Nombre d'heures de fonctionnement/semaine	Nombre d'heures de fonctionnement/43 semaines	Charge appliquée	Consommation du carburant	Coût CAS\$/année
Principal 500 kW	156	6708	50 %	469 090	576 980 \$
Deuxième 500 kW	36	1548	11,5%	26 331	32 387 \$
Troisième 500 kW	-	-	-	-	-
Quatrième 650 kW	-	-	-	-	-
<b>TOTAL EN \$ CAD</b>					<b>609 367 \$</b>

Tableau 14 : Estimation du coût annuel en carburant au port

<b>PENDANT LE CHARGEMENT OU DECHARGEMENT DE LA CARGAISON</b>					
GENERATEURS	Nombre d'heures de fonctionnement/semaine	Nombre d'heures de fonctionnement/43 semaines	Charge appliquée	Consommation du carburant	Coût CAS\$/année
Principal 500 kW	12	516	100 %	69 632	85 647 \$
Deuxième 500 kW	12	516	100 %	69 632	85 647 \$
Troisième 500 kW	12	516	100 %	69 632	85 647 \$
Quatrième 650 kW	12	516	100 %	87 040	107 059 \$
<b>TOTAL EN \$ CAD</b>					<b>364 000 \$</b>

#### 4.4 MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Dans cette partie du chapitre, le but est de modéliser un système de stockage d'énergie pouvant être utile à quai pendant les chargements et déchargements des marchandises par les navires. La charge considérée est le système de chauffage ou de climatisation, l'éclairage, les appareils électroniques et électroménagers, etc. L'énergie électrique qui sera générée grâce aux panneaux solaires installés sur le navire et à son stockage dans des batteries, sera utilisée une fois que le navire est à quai pour diverses opérations (déchargement, chargement, etc.).

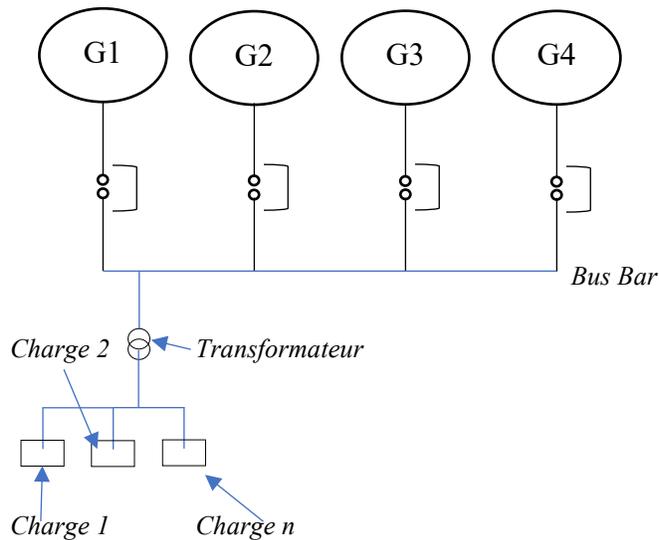


Figure 24 : Disposition des générateurs du navire FERBEC

#### 4.5 LES CELLULES SOLAIRES

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est

constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallel à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [59].

Ainsi la caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure 18. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle (shunt)  $R_{sh}$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

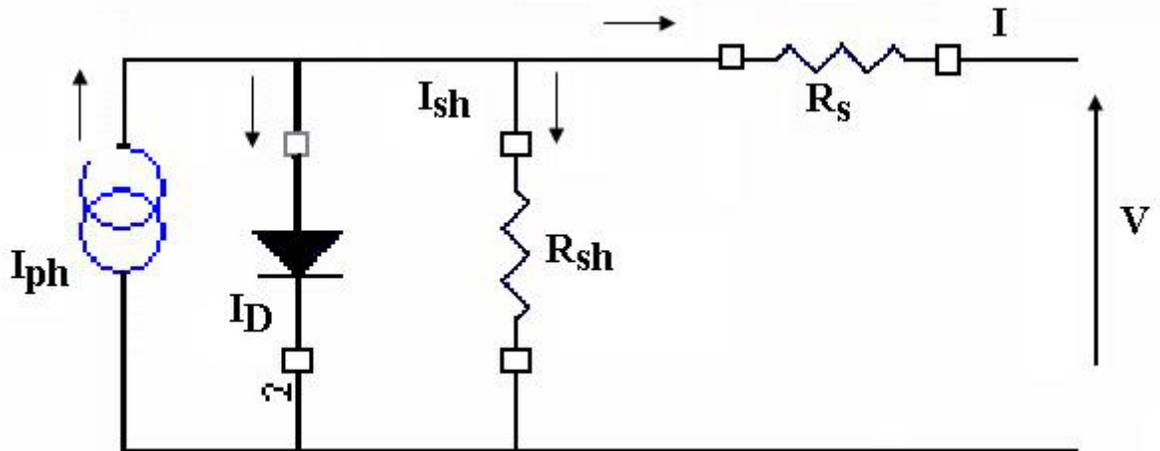


Figure 25 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde). Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [1, 4, 5].

L'équation reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de  $N_s$  cellules et la tension à ses bornes est donnée par [60]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+I.R_s}{V_T}} \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (4.1)$$

Où :

$$I_{ph}, I_0, V_T = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q}$$

$I_{ph}$  : Le photo-courant,

$I_0$  : Le courant de saturation inverse de la diode et

$V_T$  : La tension thermique, avec:  $n$  le facteur d'idéalité de la diode,

$q$  : La charge de l'électron,

$k$  : La constante de Boltzman,

$T$  : La température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire :

$$T - T_a = \left( \frac{T_{fn} - 20}{800} \right) \cdot \Psi \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4.2)$$

Où

$T_{fn}$  : La température de fonctionnement normale des cellules PV (°C) dans les conditions suivantes [60] :

- Un ensoleillement de 800 W/m<sup>2</sup>,
- Une température ambiante de 20 °C et
- Une masse d'air optique AM égale à 1,5.

La valeur de  $T_{fn}$  est généralement donnée par le constructeur,  $T_a$  est la température ambiante, et  $\Psi$  (W/m<sup>2</sup>) est l'irradiation solaire globale du lieu considéré et reçue par le module PV.

A partir de cette équation, une méthodologie simple a été développée pour la détermination des caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. On introduit les deux paramètres externes de la cellule, tels que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , pour en déduire l'expression mathématique implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque, ainsi que sa caractéristique I-V [60].

#### 4.5.1. Calcul du courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle. Son expression approchée est donnée par [61]:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1+R_s/R_{sh}} \quad (4.3)$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux  $\Psi$  ( $W/m^2$ ). Dans le cas idéal, il correspond au courant de court-circuit qui peut alors simplement s'écrire :

$$I_{cc} = I_{cc0} \cdot \left( \frac{\Psi}{1000} \right) \quad (4.4)$$

Où :

$I_{cc0}$  : Le courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de  $1000 W/m^2$ .

#### 4.5.2. Calcul de la tension de court-circuit

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule. Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à [61]:

$$V_{co} = V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.5)$$

En utilisant les équations (4.3) à (4.5), l'équation (4.1) devient :

$$I = I_{cc} \cdot \left[ \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{co} + R_s I)} \right) \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

Avec  $\alpha = \Psi/1000$ ,  $\beta = 1 + (R_s/R_{sh})$  et  $y = 1/V_T$

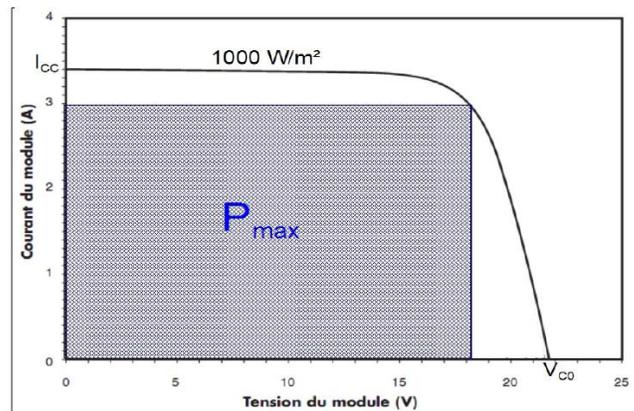


Figure 26 : Courbe I-V à T=25 °C et un éclairement de 1000W/m²

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. En se basant sur le modèle donné par Sukamong [62], on peut l'intégrer dans l'équation (4.6):

$$I = I_{cc} \cdot \left[ \alpha - \beta \left( e^{y(V - V_{co} + R_s I)} \right) \right] + \lambda(T - T_{ref}) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

Où :

$\lambda$  est un coefficient caractérisant la variation de puissance en fonction de la température et  $T_{ref}$  est la température du module dans les conditions standards.

Pour un système PV fonctionnant en mode de tension fixe, la tension aux bornes du champ de modules est identique à la tension de fonctionnement du système, c'est-à-dire celle des batteries. L'équation de la caractéristique relative à un champ de modules formé par la mise

en série de  $M_s$  modules et de  $M_p$  modules est extrapolée de celle d'un module, et elle est donnée par :

$$I_G = I_{cc} \cdot M_p \cdot \left[ \alpha - \beta \left( e^{\frac{\gamma}{M_p} \left( M_s(V - V_{co}) + \frac{M_s R_{s1}}{M_p} \right)} \right) \right] - \left( \frac{M_s \cdot V + \frac{M_s R_{s1}}{M_p}}{\frac{R_{sh} M_s}{M_p}} \right) \quad (4.8)$$

Cette relation n'est valable que si tous les modules, constituant le générateur PV, sont identiques et reçoivent la même irradiation (ayant la même caractéristique I-V).

#### 4.5.3. Description du système étudié

La méthode adoptée pour ce cas étudié est la suivante :

- La simulation les caractéristiques du panneau KC200GT,
- La simulation de fonctionnement du système durant une journée type pour chaque saison,
- L'élaboration des courbes déterminant la capacité du stockage.

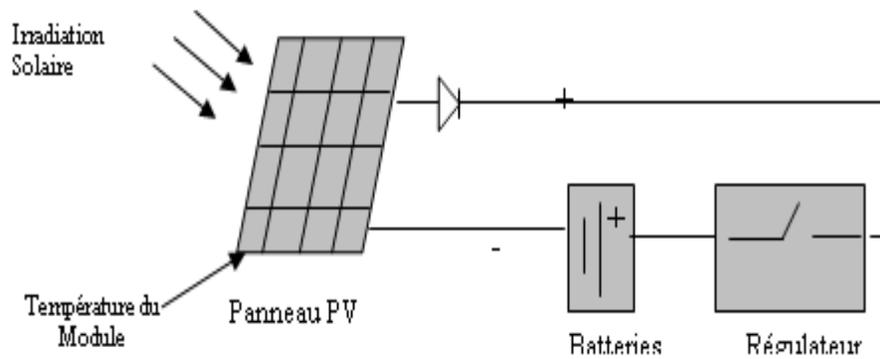


Figure 27 : Schéma simplifié du système

#### 4.5.3.1. Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0.5 et 1.5 selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [63].

#### 4.5.3.2. Influence de l'éclairement et de la température

La figure 28, montre la représentation du PVG dans l'environnement Simulink. Les résultats de la caractéristique I - V et P-V du module KC200GT sont :

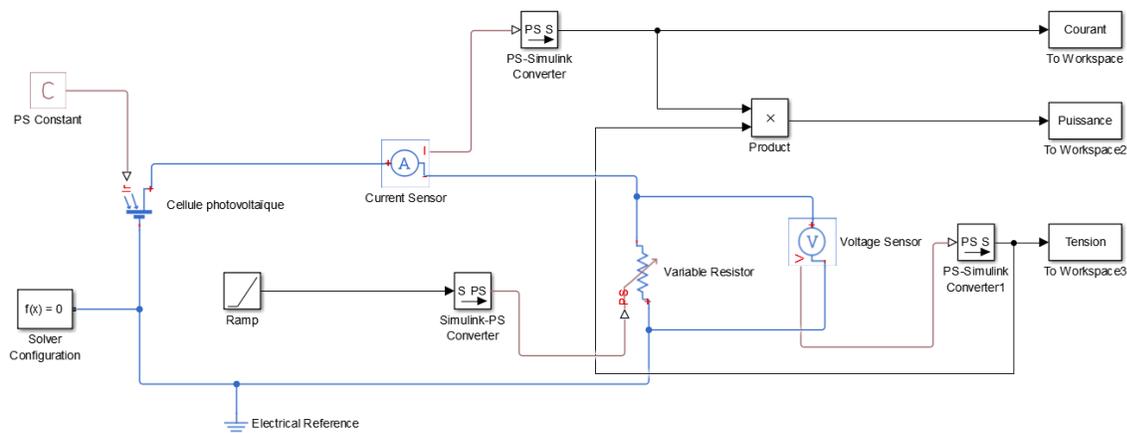


Figure 28 : Implantation Simulink masquée du PVG

Le courant produit par le module PV est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire  $G$ . Par contre, la tension  $V$  aux bornes de module varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction P - N du matériau lui-même [64]. La tension de circuit

ouvert ne diminuera que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que la puissance optimale de module ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

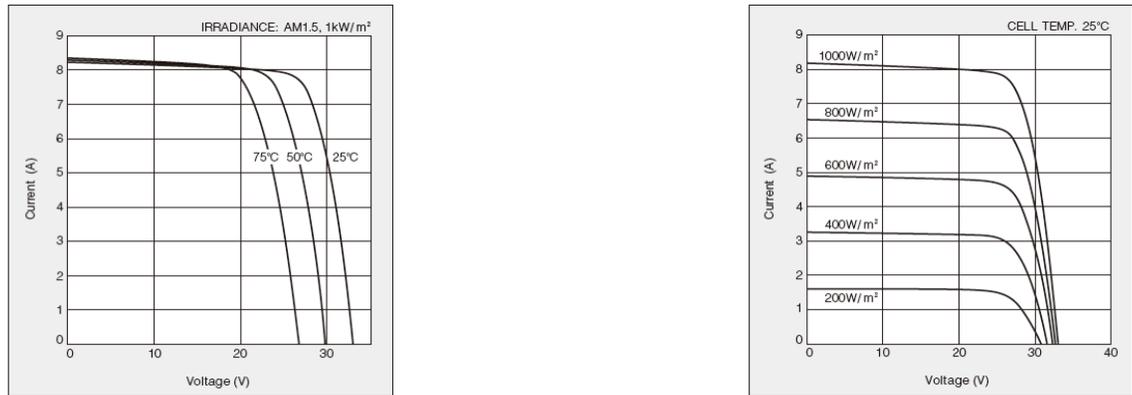


Figure 29 : Influence de la température et de l'ensoleillement G sur les courbes I-V et P-V

Source : Kyocera « Caractéristiques électrique du panneau KC200GT »

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement [64].

#### 4.6 CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite.



## CHAPITRE 5

### RESULTATS DE LA SIMULATION ET VALIDATION DU MODÈLE

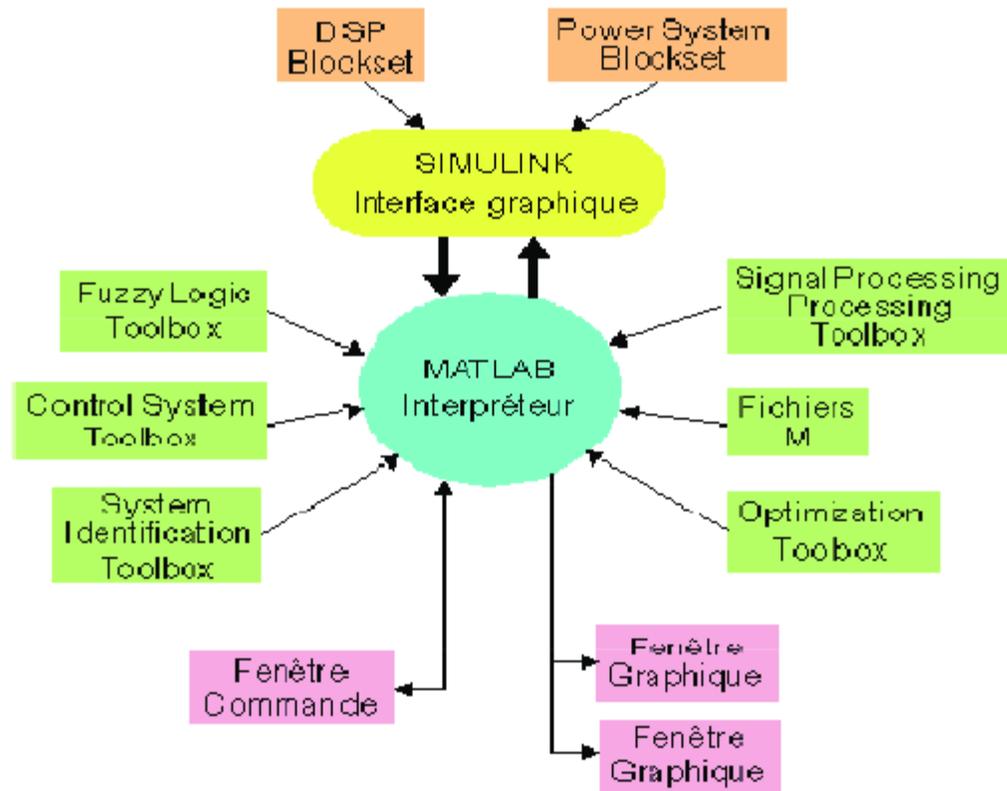


Figure 30 : Environnement Matlab

Dans notre projet, on utilise le programme du Matlab 2016a pour simuler les composants suivants :

- Cellule solaire,
- Module PV,
- Batteries.

## 5.1 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Un générateur photovoltaïque est constitué de modules photovoltaïques (assemblage de cellules photovoltaïques) et d'un onduleur. Le générateur produit de l'électricité sous forme de courant continu transformé en courant alternatif par l'onduleur. Ce courant alternatif est identique à celui du réseau dans lequel il peut être injecté ou utilisé.

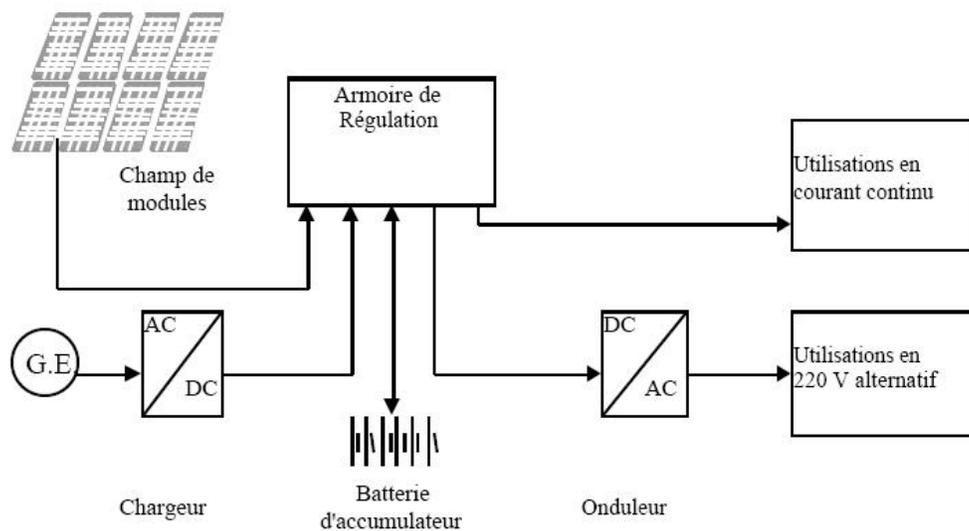


Figure 31 : Synoptique d'un générateur photovoltaïque autonome

### 5.1.1. Cellule photovoltaïque

L'élément fondamental dans un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque qui convertit l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique.

D'après les conditions initiales : ( $\Psi = 1000\text{W/m}^2$ ,  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ). On trouve les résultats de simulation suivants :

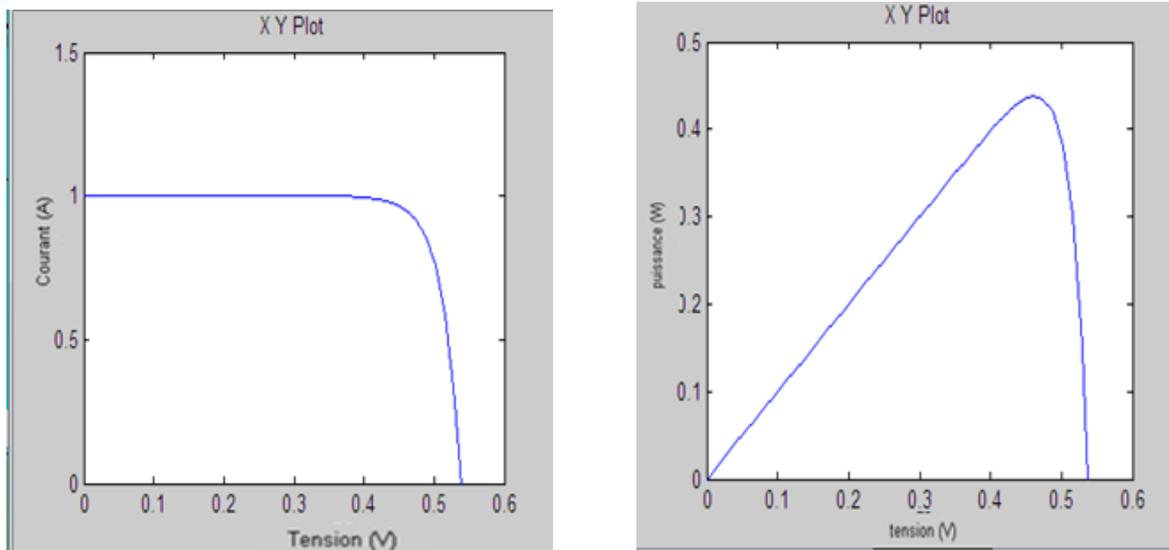


Figure 32 : Caractéristique I-V et P-V du cellule PV idéal

En se basant sur les interprétations des courbes, nous constatons qu'à une température de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , le courant  $I_{cc}$  est à  $1\text{ A}$  et la puissance  $P$  est à  $0,45\text{ W}$ , tandis que la tension  $V_{cc}$   $0,55\text{ V}$

### 5.1.2. Module photovoltaïque

Pour ce présent projet, le choix s'est porté sur un module photovoltaïque de type multi-Crystal à haute efficacité poly cristallin KC200GT de Kyocera.

Tableau 15 : Les performances électriques et les caractéristiques du module KC200GT.

<b>Performances électriques dans des conditions de test standard</b>	
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	200W (+10%/-5%)
Tension d'alimentation maximale ( $V_{mpp}$ )	26.3V
Courant de puissance maximum ( $I_{mpp}$ )	7.61A

Tension de circuit ouvert (Voc)	32.9V
Courant de court-circuit (Icc)	8.21A
Tension maximale du système	600V
Coefficient de température de Voc	$-1.23 \times 10^{-1} \text{ V/}^\circ\text{C}$
Coefficient de température de Icc	$3.18 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
<b>Performances électriques à 800W/m<sup>2</sup></b>	
Puissance maximale (Pmax)	142W
Tension d'alimentation maximale (Vmpp)	23.2V
Courant de puissance maximum (Impp)	6.13A
Tension de circuit ouvert (Voc)	29.9V
Courant de court-circuit (Icc)	6.62A
<b>Cellules</b>	
Nombre par module	54
<b>Caractéristiques du module</b>	
Longueur x largeur x profondeur	1425mm x 990mm x 36mm
Poids	18.5kg
Câble	(+) 720mm, (-) 1800mm
<b>Caractéristiques de la boîte de jonction</b>	
Longueur x largeur x profondeur	113.6mm x 76mm x 9mm
IP Code	IP65

Réduction de l'efficacité sous faible éclairage énergétique	
Réduction	7.8%

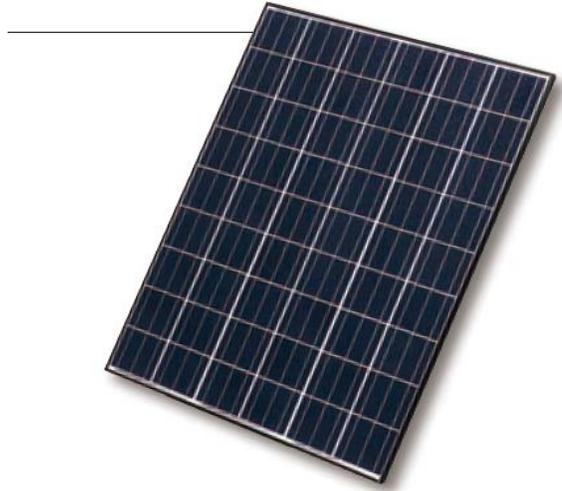


Figure 33 : Le module PV KC200GT

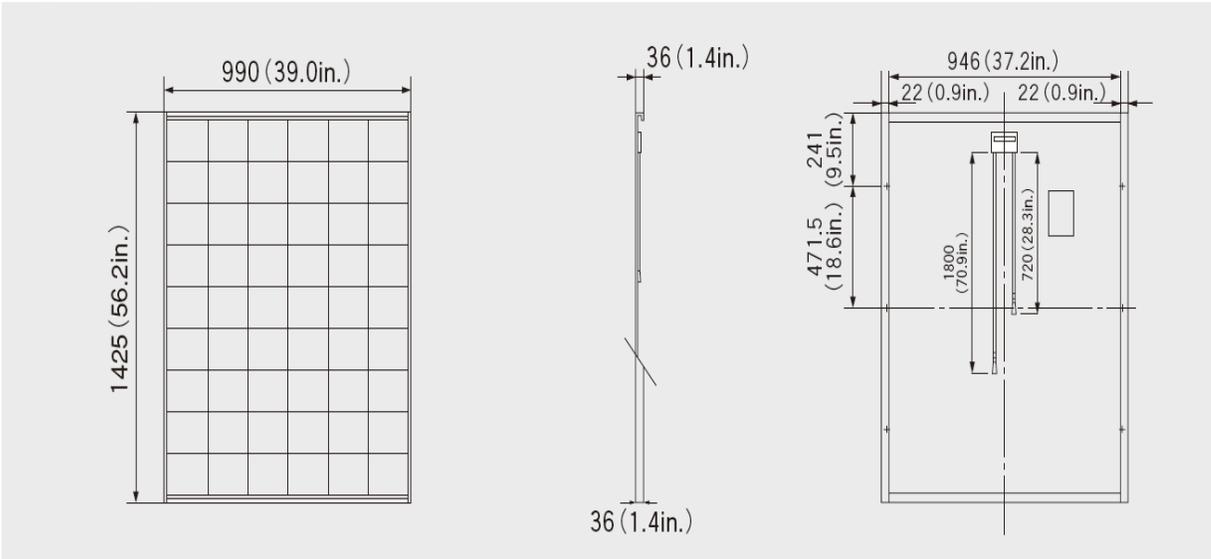


Figure 34 : Les spécifications physiques du module PV KC200GT

### 5.1.3. Résultats du module PV KC200GT sur Matlab/Simulink

Les résultats obtenus pendant la simulation sous le logiciel Matlab/Simulink peuvent être représentés comme suit :

- a) Pour une température de 25 °C et un flux lumineux de 1000 W/m<sup>2</sup>

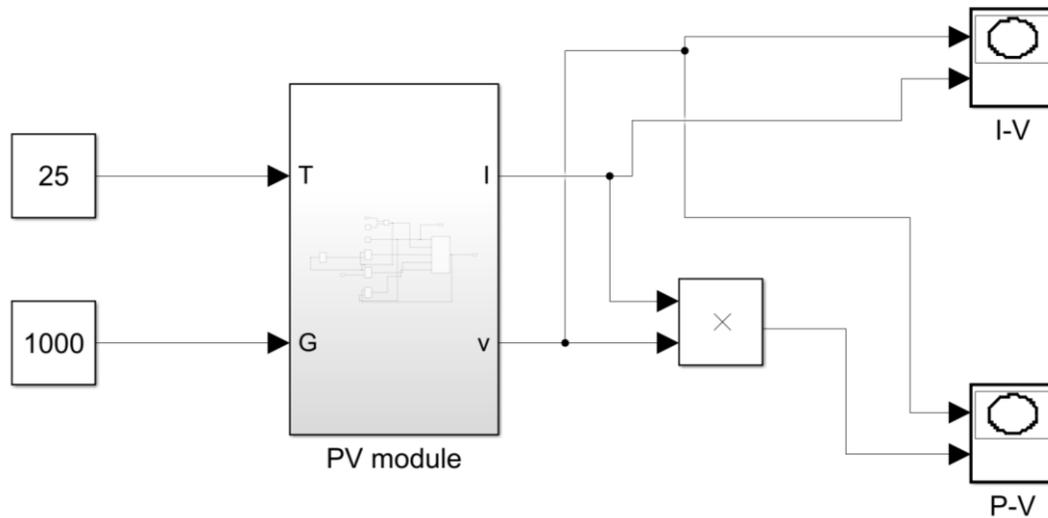


Figure 35 : Le module PV sous Matlab/Simulink à T=25 °C et E=1000 W/m<sup>2</sup>

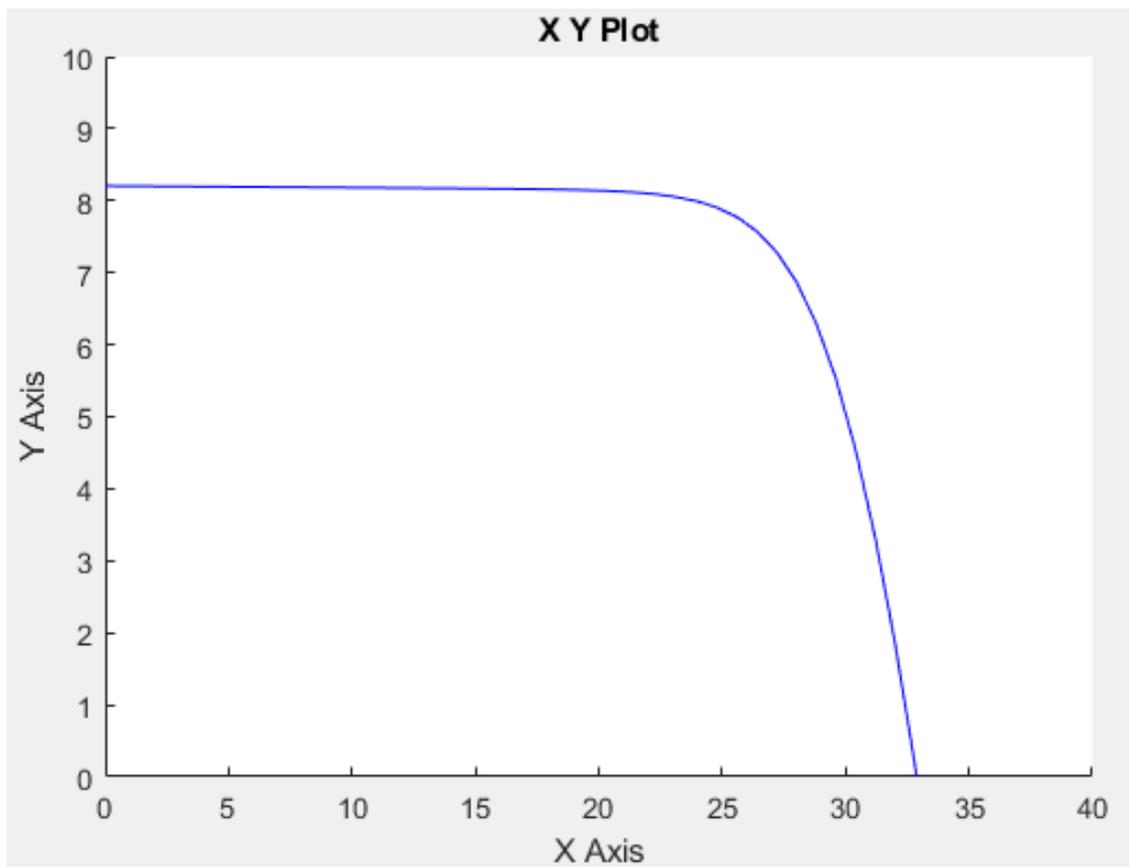


Figure 36 : Courbe I-V du module KC200GT T=25 °C et E=1000 W/m<sup>2</sup>

$I_{cc} = 8.21 \text{ A}$  et  $V_{oc} = 32.9 \text{ V}$

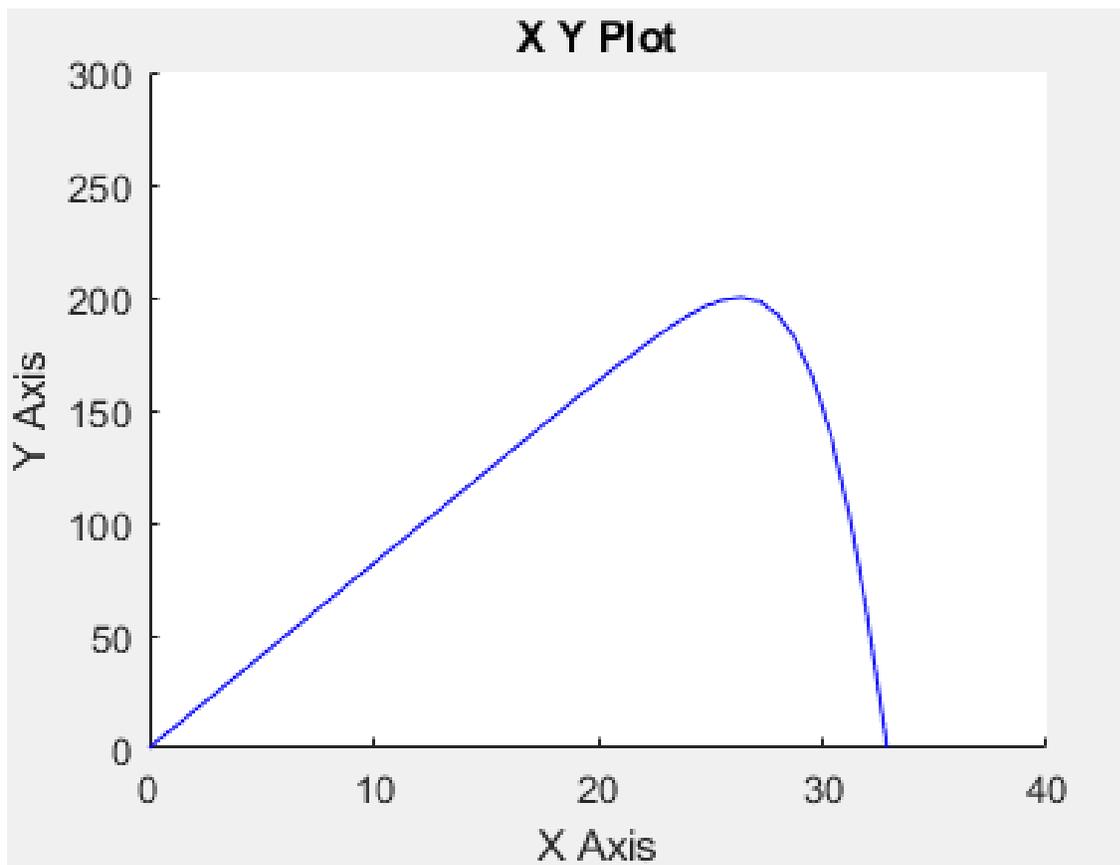


Figure 37 : Courbe P-V du module KC200GT T=25 °C et E=1000 W/m<sup>2</sup>

P = 200 W et Voc = 32.9 V

b) Pour une température de 25 °C et un flux lumineux de 800 W/m<sup>2</sup>

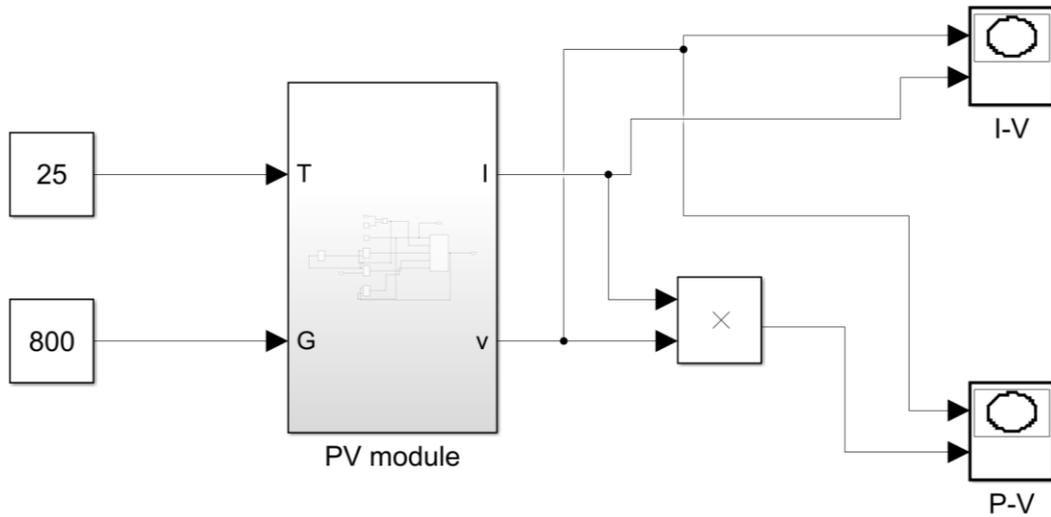


Figure 38 : Le module PV sous Matlab/Simulink à T=25 °C et E=800 W/m<sup>2</sup>

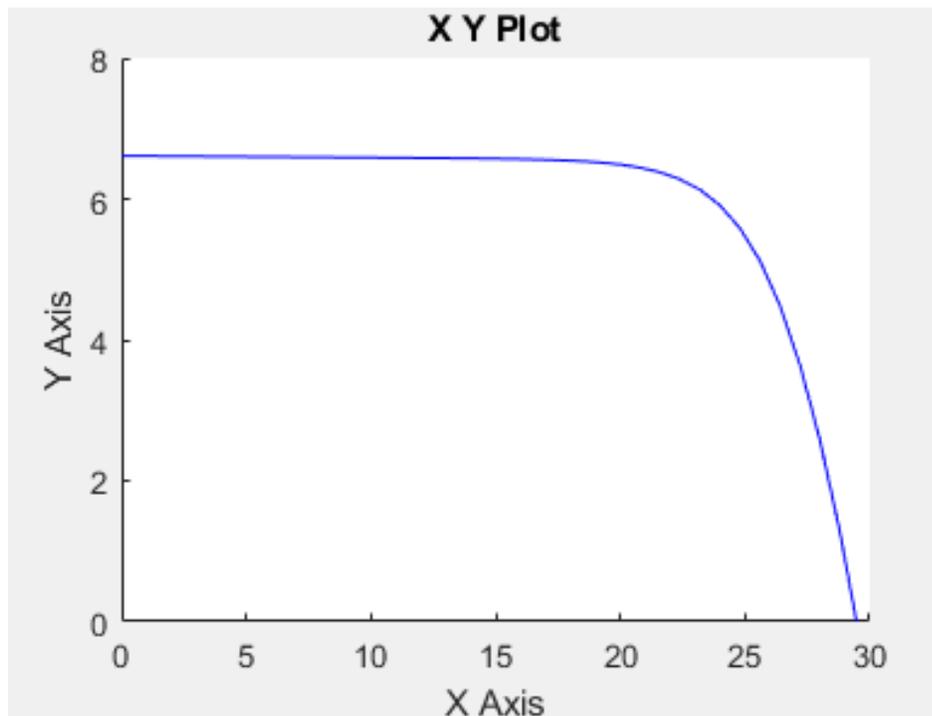


Figure 39 : Courbe I-V du module KC200GT T=25 °C et E=800 W/m<sup>2</sup>

I<sub>cc</sub> = 6.62 A et V<sub>oc</sub> = 29.9 V

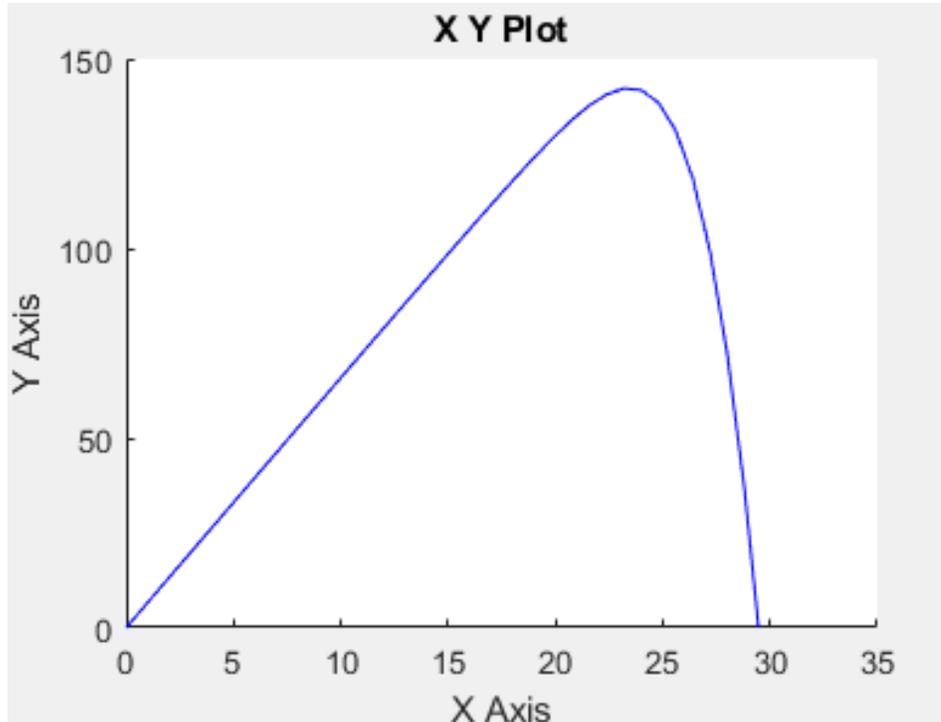


Figure 40 : Courbe P-V du module KC200GT T=25 °C et E=800 W/m<sup>2</sup>

$P = 145 \text{ W}$  et  $V_{oc} = 29.9 \text{ V}$

#### 5.1.4. Influence des paramètres sur les caractéristiques

##### 5.1.4.1. Le flux lumineux

Le photo-courant est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux  $\Psi$ . Le courant  $I_d(V_d)$ , étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface  $S$  de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée [63].

À chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  à la suite d'une chute du flux lumineux.

Les paramètres de simulation suivants :

- $\Psi = 1000 \text{ W/m}^2$ ,
- $\Psi = 900 \text{ W/m}^2$ ,
- $\Psi = 800 \text{ W/m}^2$ ,
- $\Psi = 700 \text{ W/m}^2$ ,
- $\Psi = 600 \text{ W/m}^2$ ,
- $\Psi = 500 \text{ W/m}^2$ ,

-  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , ont permis d'abord de trouver une courbe du courant et de la tension évoluant au fil du soleil et, par la suite, ils illustrent l'image dans laquelle le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) diminue avec l'éclairement, alors que la valeur de la tension à vide reste la même et le point de fonctionnement optimal se déplace sur une droite à peu près constante.

La figure 34 montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I-V$ . À une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais en revanche la tension varie légèrement. Ceci est dû du fait que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

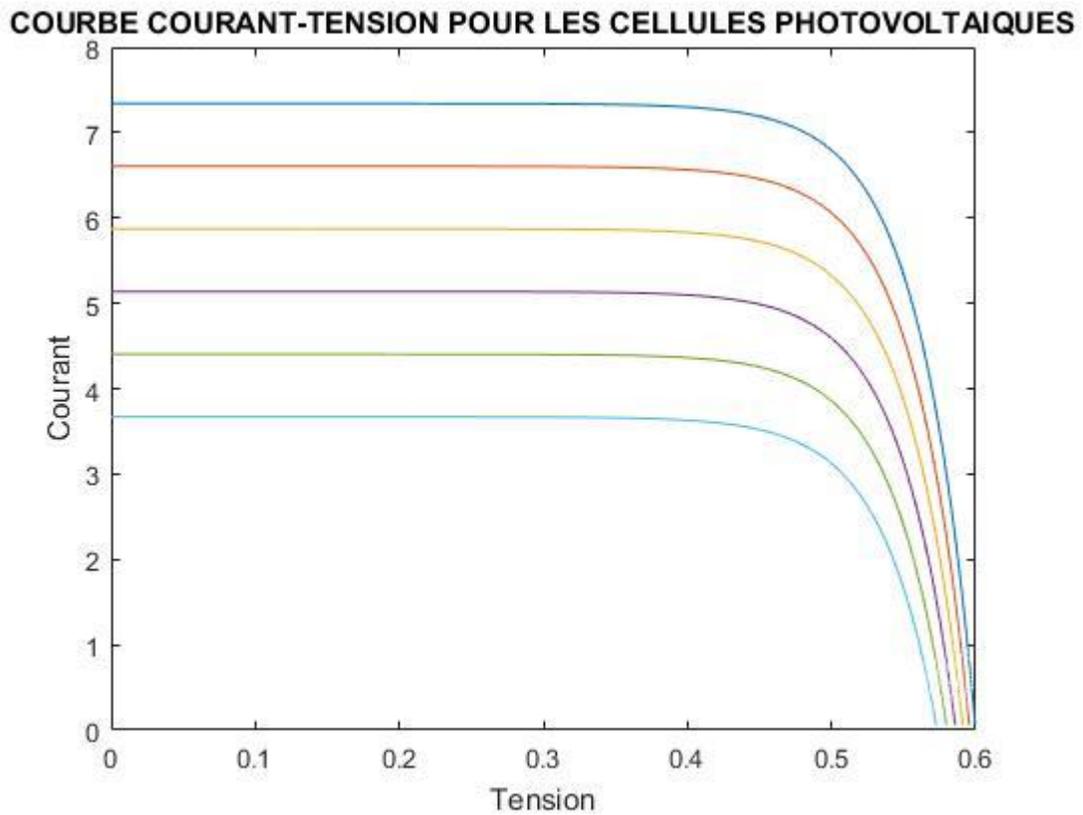


Figure 41 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

La figure 35 illustre, elle, la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

### COURBE PUISSANCE-TENSION POUR LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

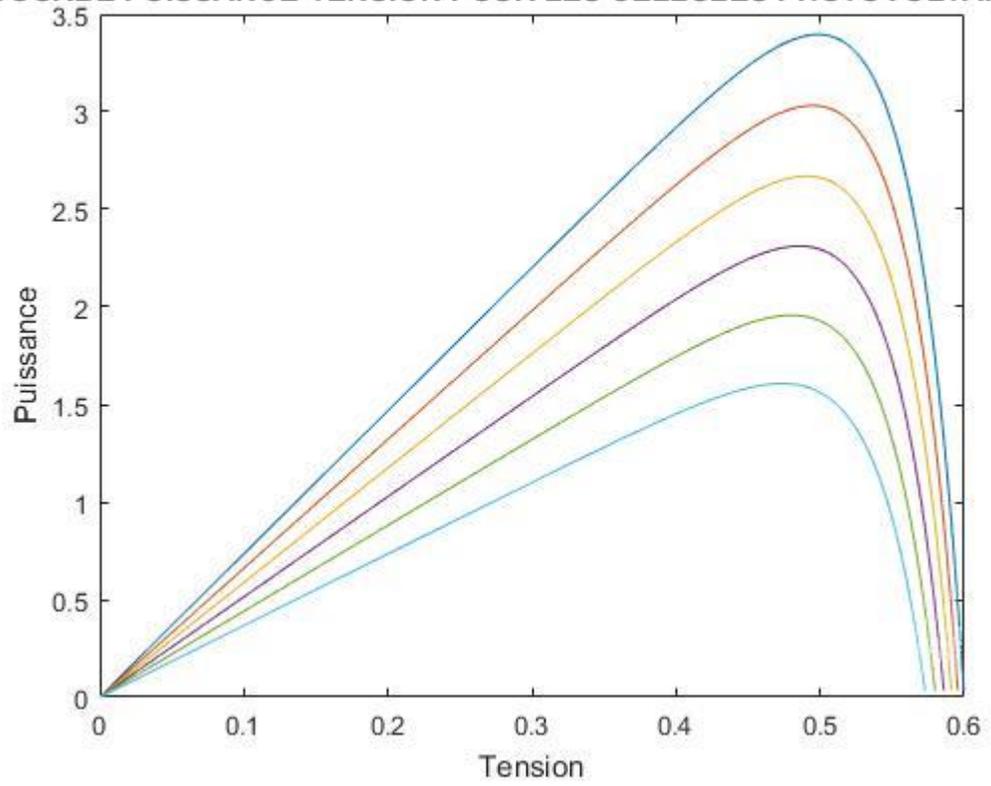


Figure 42 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V

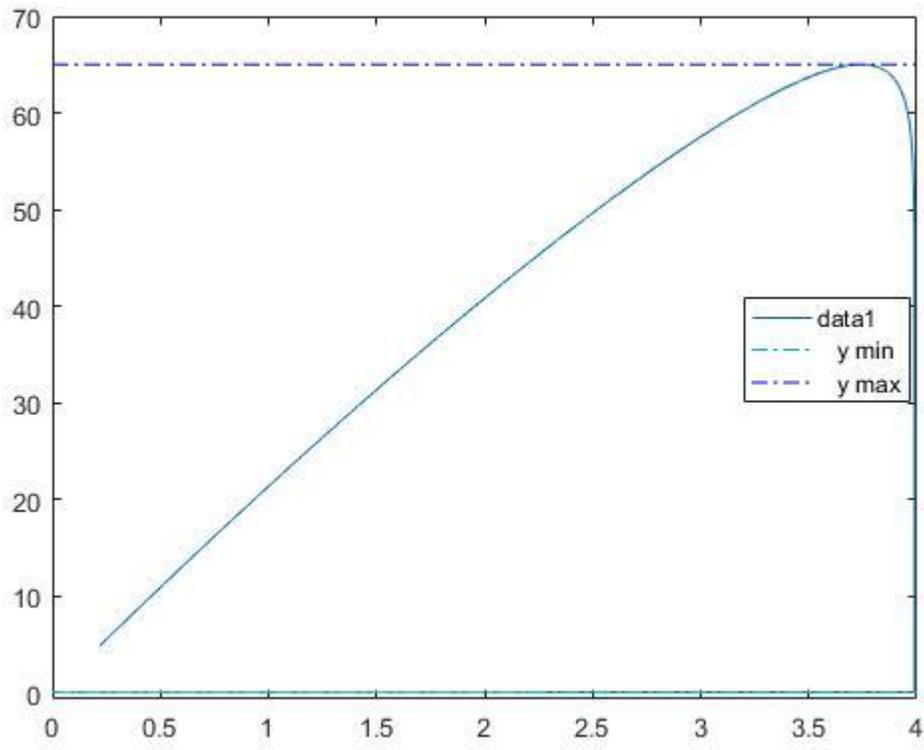


Figure 43 : Graphe de la P-I pour un module PV

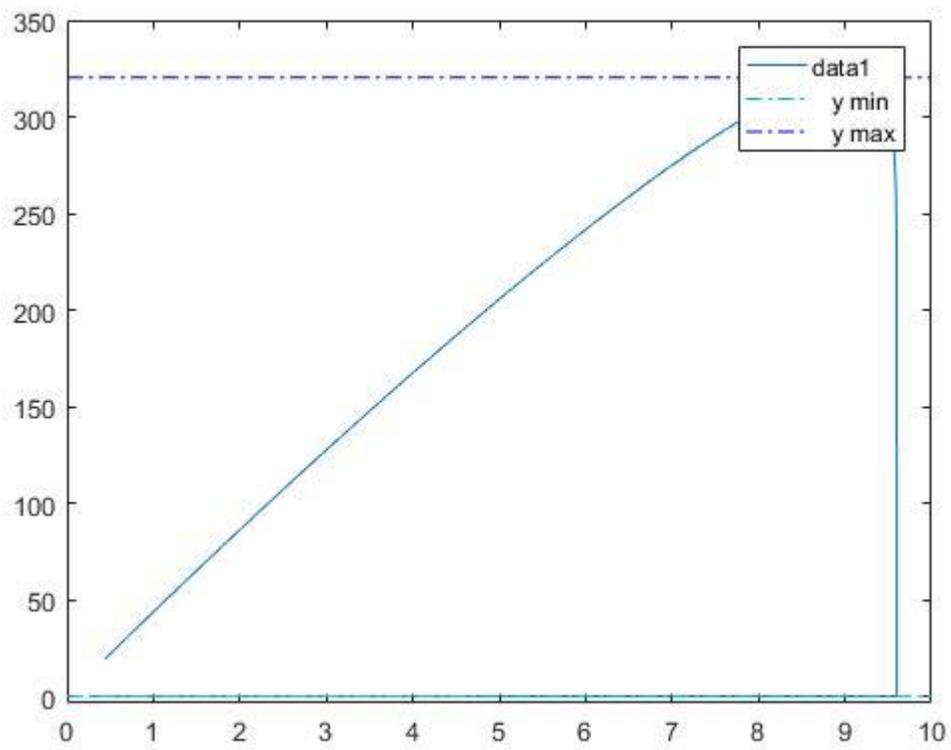


Figure 44 : Graphe de la P-I pour quatre modules PV

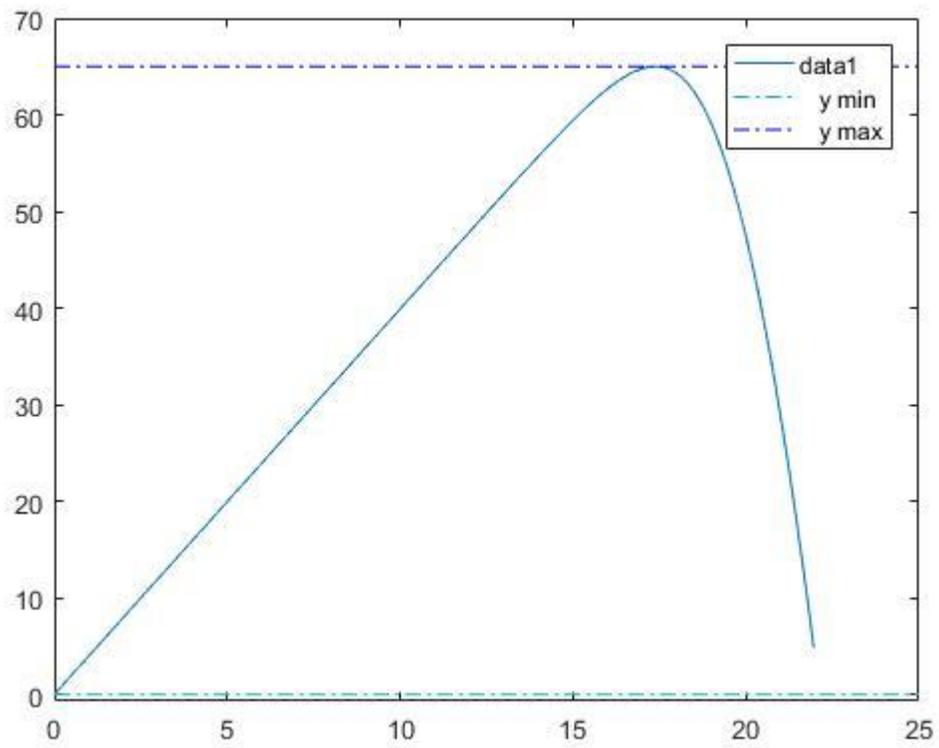


Figure 45 : Graphe de la P-V pour un module PV

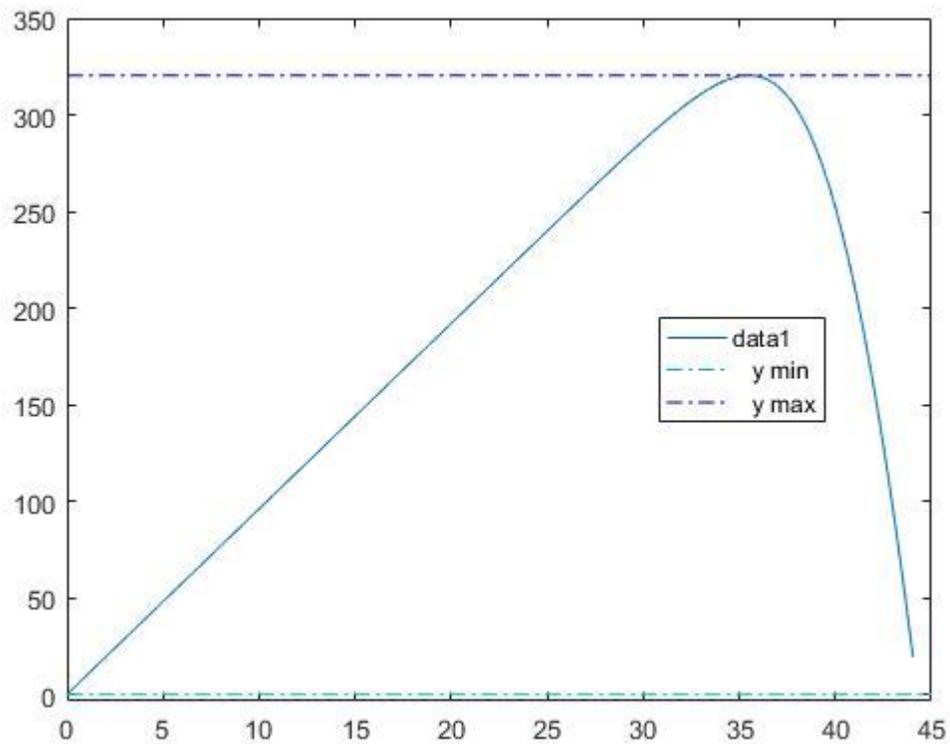


Figure 46 : Graphe de la P-V pour quatre modules PV

Les résultats des simulations suivantes ont été faits pour un seul module PV KC200GT en tenant compte de son début dans le bus continu par l'intermédiaire d'un régulateur.

On tient compte des pertes [65] :

- Du panneau (rendement  $\eta_{PV}$  12%),
- Du panneau s'il ne fonctionne pas au point de puissance maximum (rendement  $\eta_{COM}$  90%),
- Du régulateur (rendement  $\eta_{REG}$  98%),
- Le câble (rendement  $\eta_{cab}$  97%),
- La batterie en charge (rendement  $\eta_{bat}$  85%),

Les caractéristiques techniques du module et batterie étudiés, sont recoupées dans les tableaux 17 et 18.

Tableau 16 : Performances électriques du module PV

<b>Performances électriques dans des conditions de test standard</b>	
Puissance maximale (Pmax)	200W (+10%/-5%)
Tension d'alimentation maximale (Vmpp)	26.3V
Courant de puissance maximum (Impp)	7.61A
Tension de circuit ouvert (Voc)	32.9V
Courant de court-circuit (Icc)	8.21A
Tension maximale du système	600V
Coefficient de température de Voc	$-1.23 \times 10^{-1} \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
Coefficient de température de Icc	$3.18 \times 10^{-3} \text{ A}/^{\circ}\text{C}$

<b>Performances électriques à 800W/m<sup>2</sup></b>	
Puissance maximale (Pmax)	142W
Tension d'alimentation maximale (Vmpp)	23.2V
Courant de puissance maximum (Impp)	6.13A

Tension de circuit ouvert (Voc)	29.9V
Courant de court-circuit (Icc)	6.62A

<b>Cellules</b>	
Nombre par module	54
<b>Caractéristiques du module</b>	
Longueur x largeur x profondeur	1425mm x 990mm x 36mm
Poids	18.5kg
Câble	(+) 720mm, (-) 1800mm
<b>Caractéristiques de la boîte de jonction</b>	
Longueur x largeur x profondeur	113.6mm x 76mm x 9mm
IP Code	IP65
<b>Réduction de l'efficacité sous faible éclairage énergétique</b>	
Réduction	7.8%

Tableau 17 : Caractéristiques et performances électriques du module KC200GT

Type	AGM
Modèle	BAT412201100
Capacité	220Ah
Tension maximale	12V
Longueur x largeur x hauteur	522mm x 232mm x 240 mm
Poids	66kg

CCA à 0 °F	1100
RES CAP à 80 °F	440
Capacité nominale	20 heures de décharge à 25 °C
Durée de vie	12 ans à 20 °C
Durée de vie à 500 cycles à décharge	80%
Durée de vie à 750 cycles à décharge	50%
Durée de vie à 1800 cycles à décharge	30%

Tableau 18 : Caractéristiques détaillées de la batterie BAT412201100

La technologie de la batterie choisie permet ( $DOD_{MAX} = 80\%$ ) de décharge, donc la capacité de charge d'une seule batterie est  $C_{tot} * 80\%$ .

Le programme pour calcul du nombre de batteries a été écrit dans langage de programmation Matlab.

Le diagramme de l'organigramme pour ce programme est montré dans la figure 48.

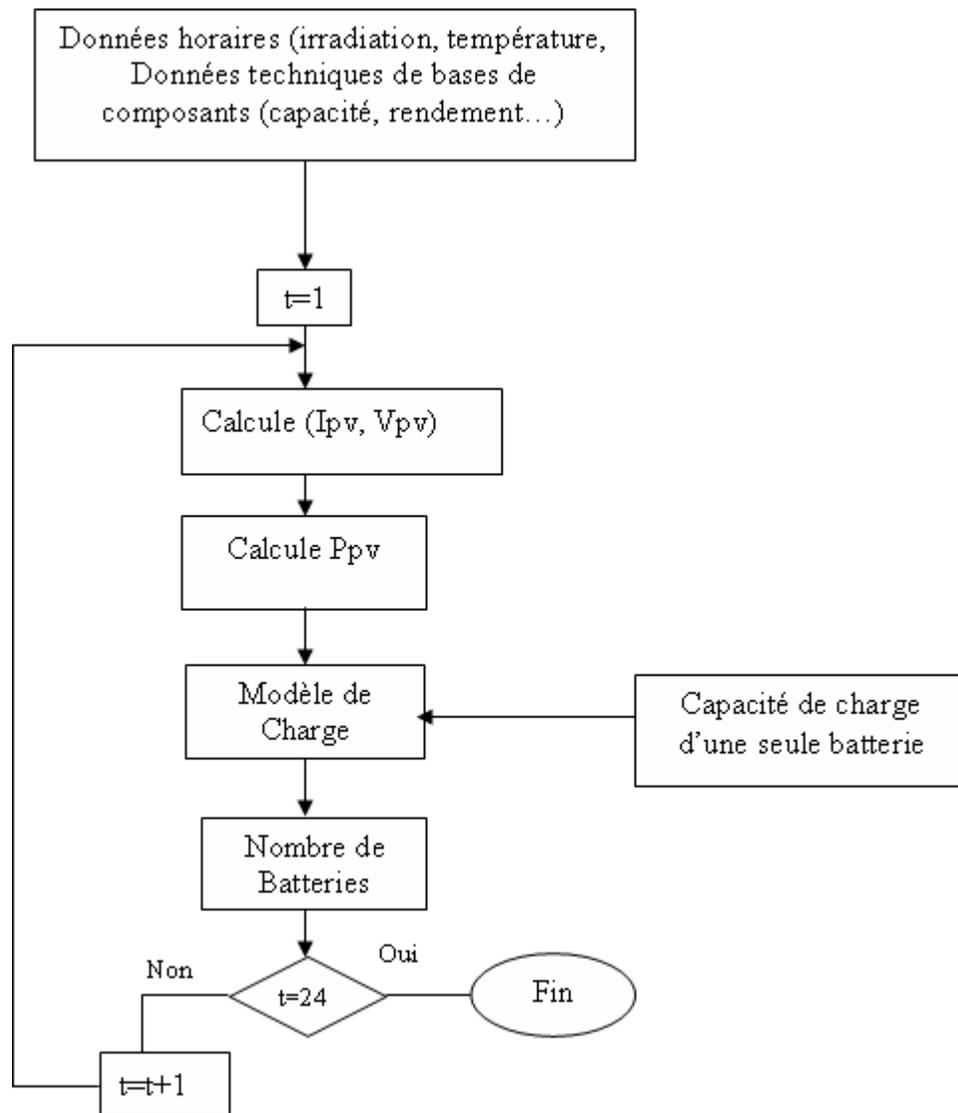


Figure 47 : Diagramme de l'organigramme de calcul nombre de stockage

## 5.2 ÉTUDE DU SITE

Le Port de Montréal a été choisi pour les données climatiques en vue de faire des simulations pendant que le navire est à quai. D'après les informations obtenues par l'administration portuaire de Montréal, un navire au port de Montréal fait une escale allant de 24 à 72 heures.

Les résultats de simulation de l'énergie délivrés par un seul module PV pour chaque jour de chaque saison sont représentés par les figures suivantes :

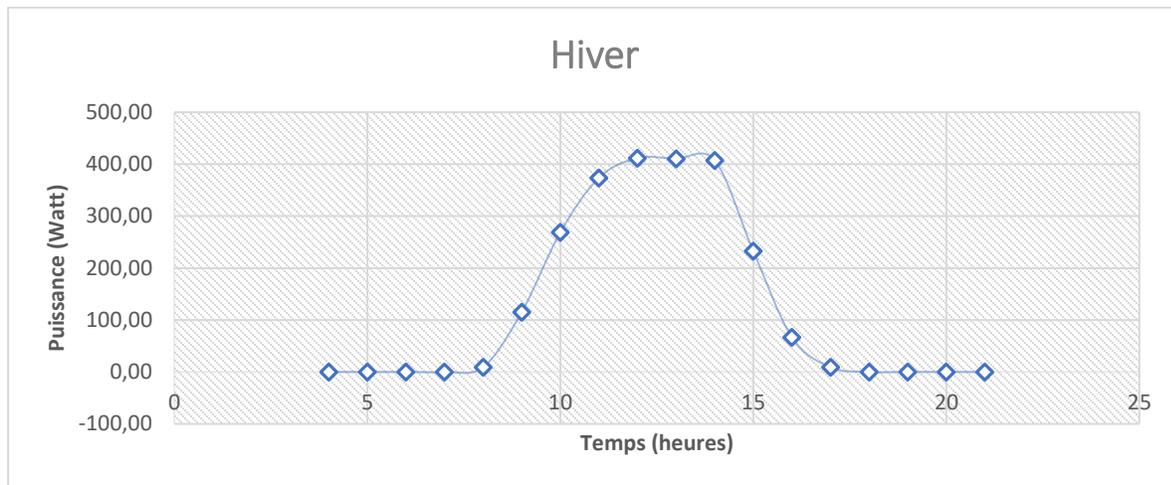


Figure 48 : Variation de la puissance en fonction de temps (hiver)

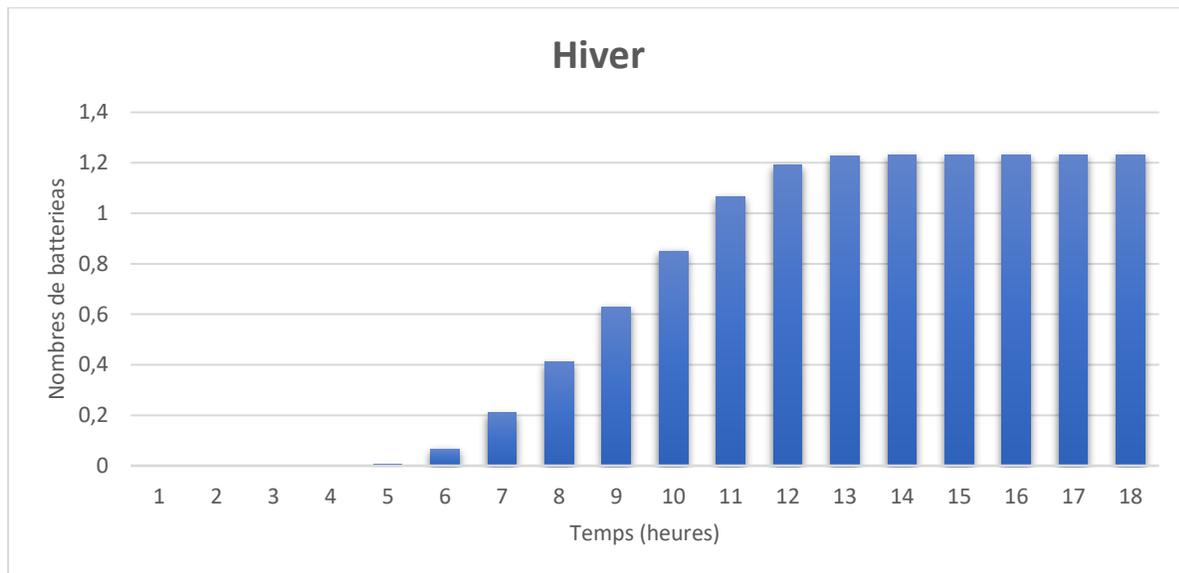


Figure 49 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (hiver)

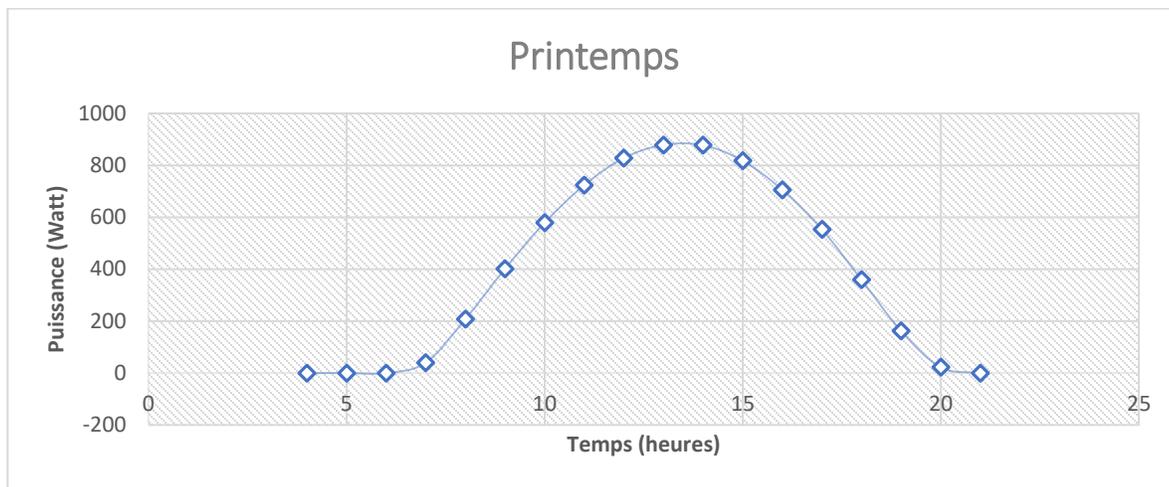


Figure 50 : Variation de la puissance en fonction de temps (printemps)

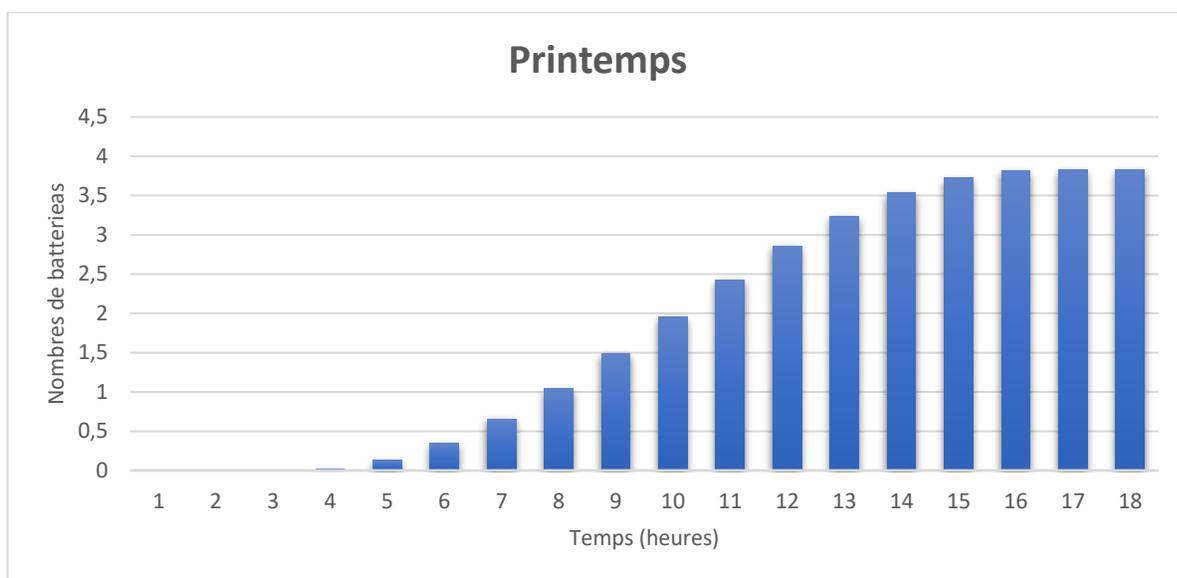


Figure 51 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (printemps)

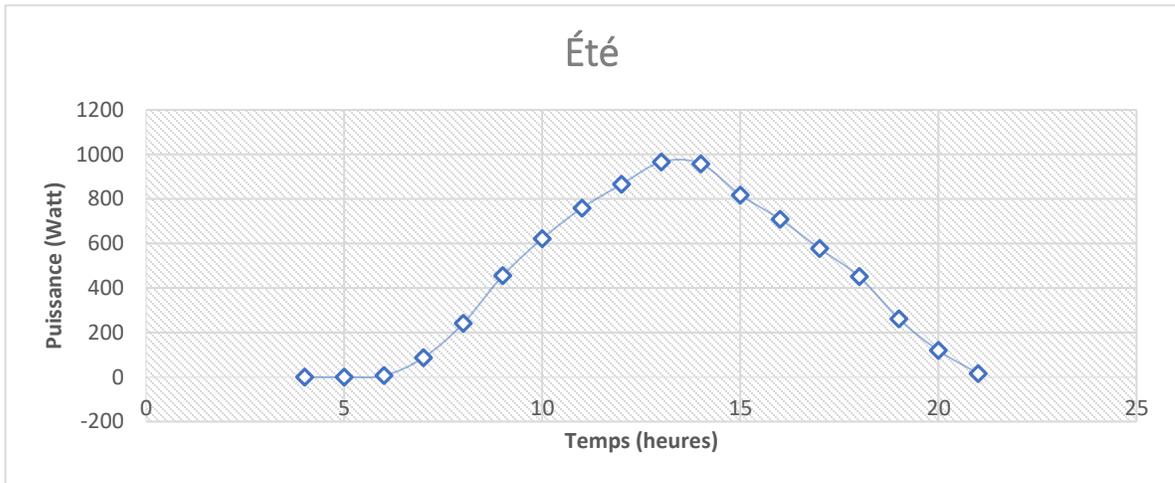


Figure 52 : Variation de la puissance en fonction de temps (été)

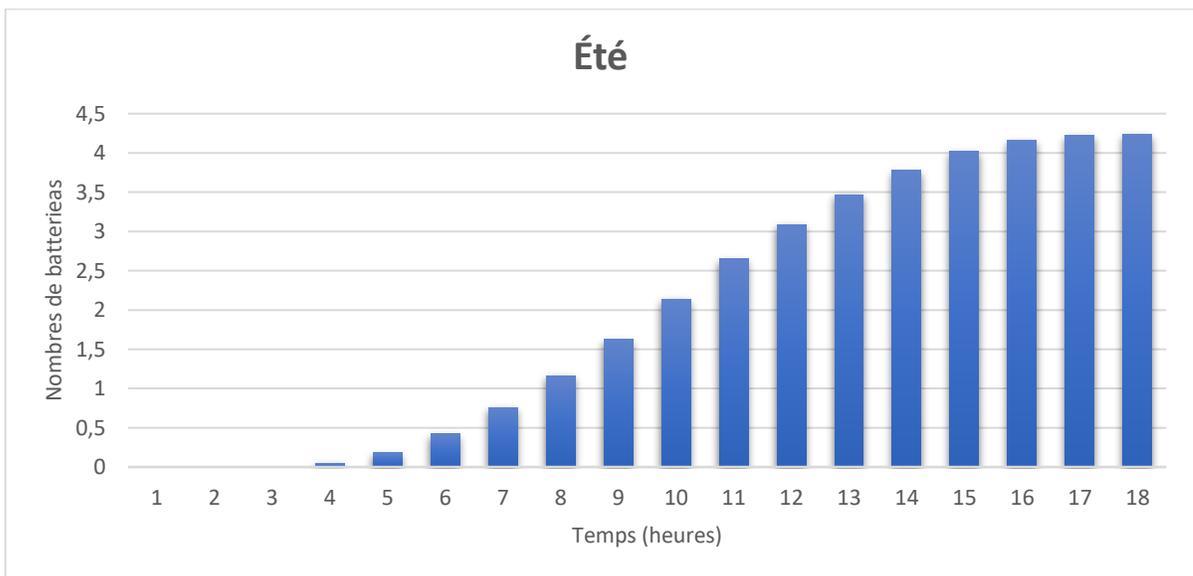


Figure 53 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (été)

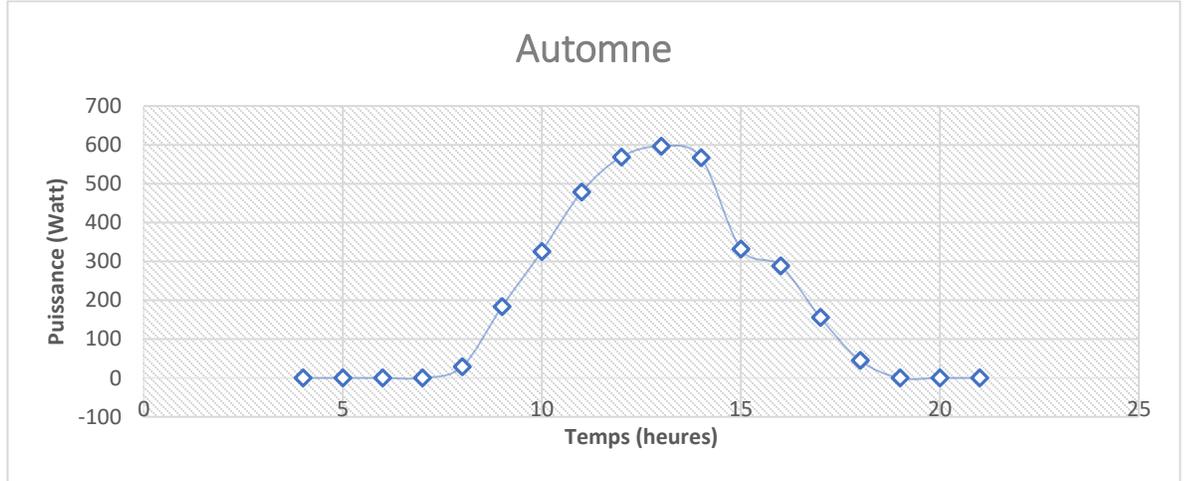


Figure 54 : Variation de la puissance en fonction de temps (automne)

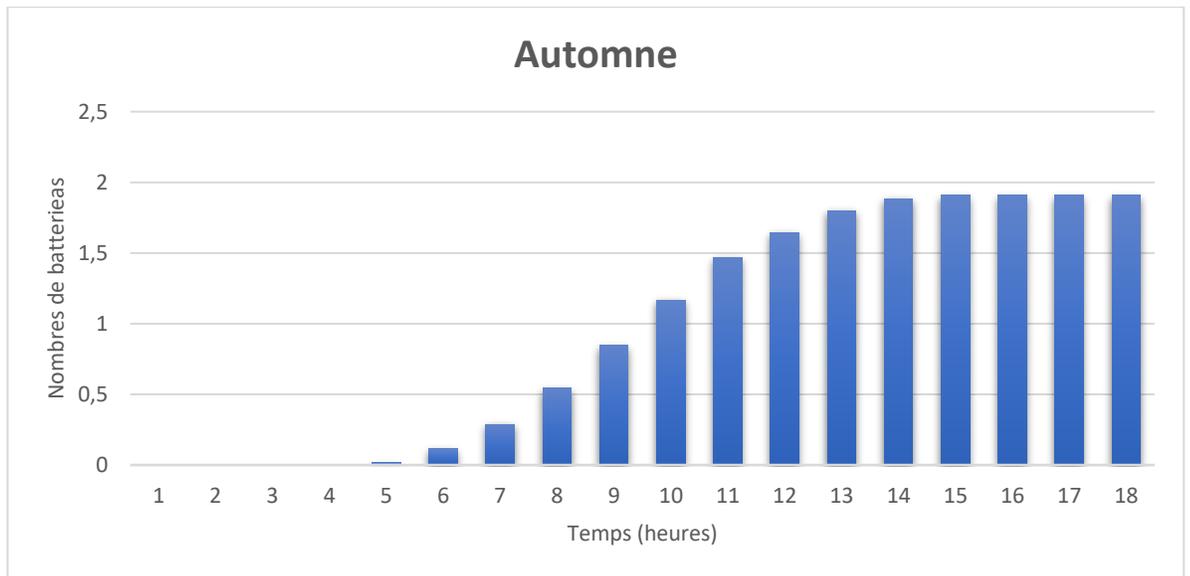


Figure 55 : Nombre de batteries chargées par un seul module photovoltaïque (automne)

D'après les résultats de la simulation pour les quatre saisons, on voit qu'il existe un nombre de batteries qui peuvent charger par un seul module photovoltaïque. Il se situe dans le cas des figures 49 et 50 pour la saison d'hiver, on remarque que la quantité d'énergie de générateur PV est disponible pendant 7 heures est importante à partir de 12 heures, elle atteint la puissance maximale (411.67 Watt) à 12 heures due à l'augmentation de l'irradiation solaire, cette puissance varie inversement proportionnellement avec la température ambiante du site. Ce système donne une quantité d'énergie importante pour charger 1.23 batteries.

Dans la saison de printemps, la puissance à la sortie du module PV est très importante car elle est suffisante pour charger 3.82 batteries (Figure 52) pendant 13 heures. La puissance PV passe par un maximum surent les valeurs de l'irradiation solaire et la température, ce maximum est de 878.33 W à 13h. Puis elle diminue à sa valeur minimum.

Pour la saison d'été, le nombre de batteries chargées par le module photovoltaïque est de 4.23 batteries à cause de leur nombre des heures (14 heures).

Pour la saison d'automne, on remarque que l'énergie solaire est disponible pendant 10 heures, cette période permet de charger 1.9 batteries.

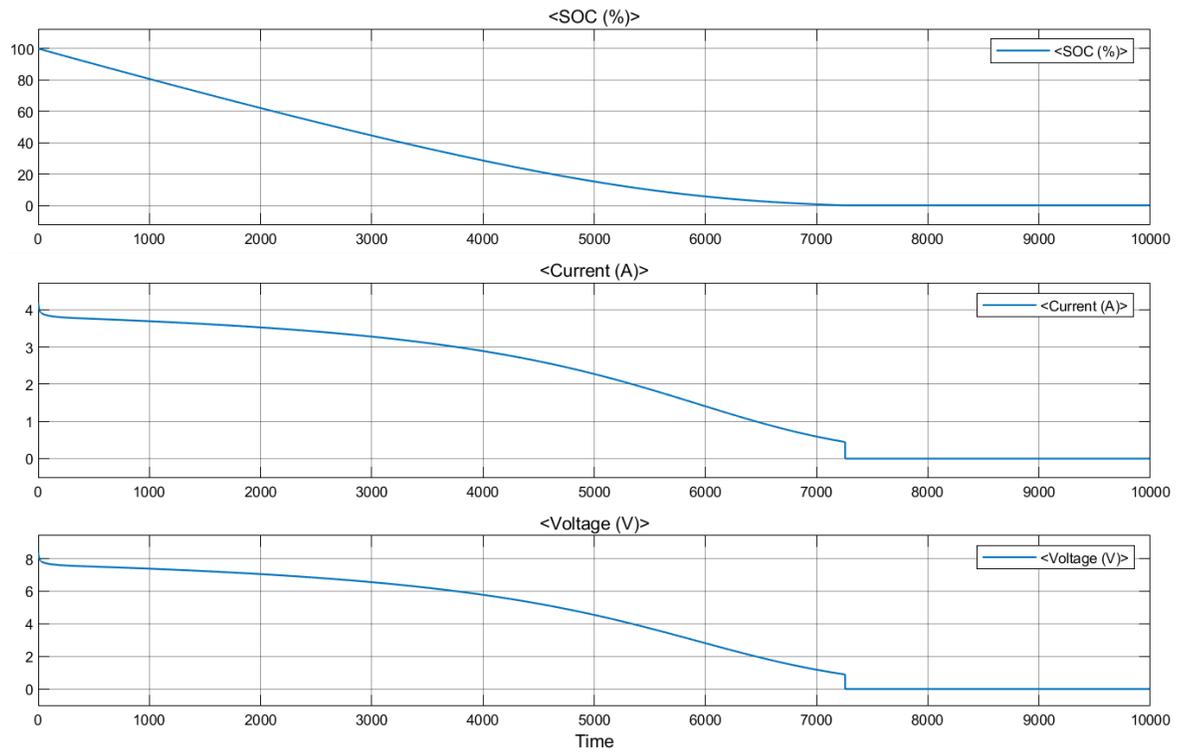


Figure 56 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 100 % de charge

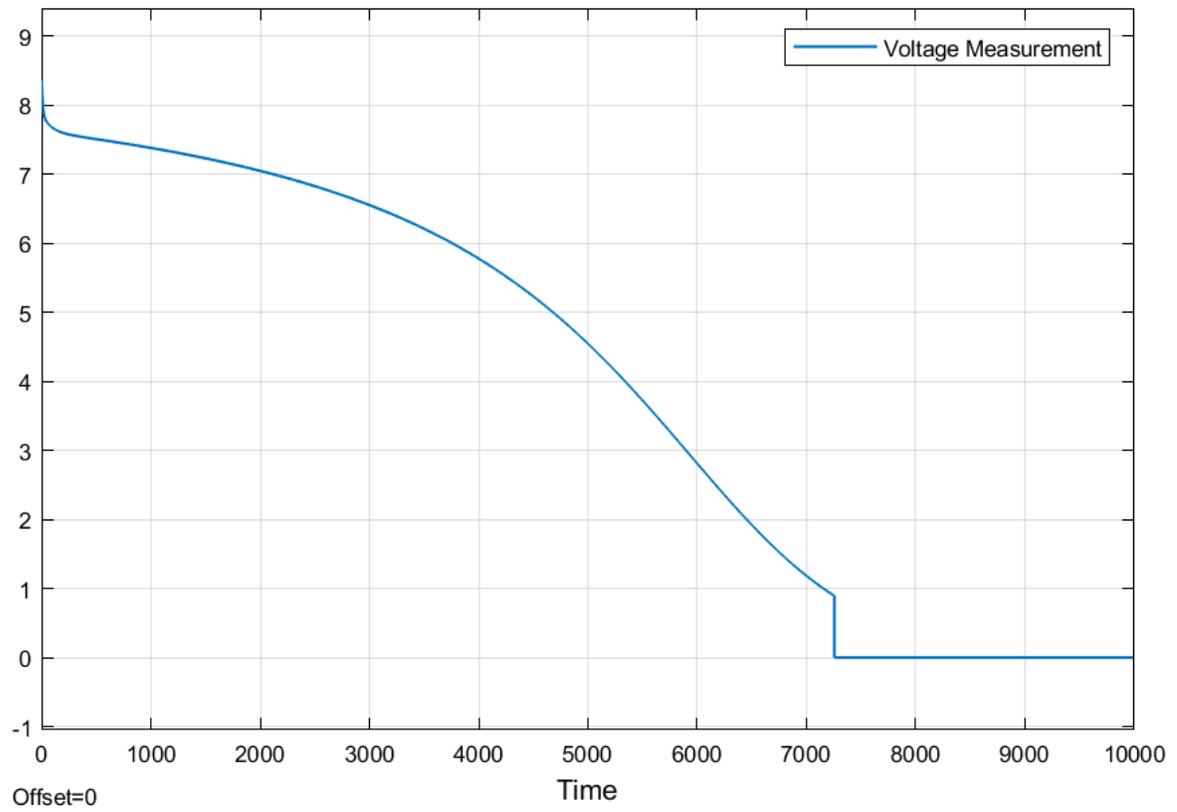


Figure 57 : Mesure de la tension à 100 % de charge

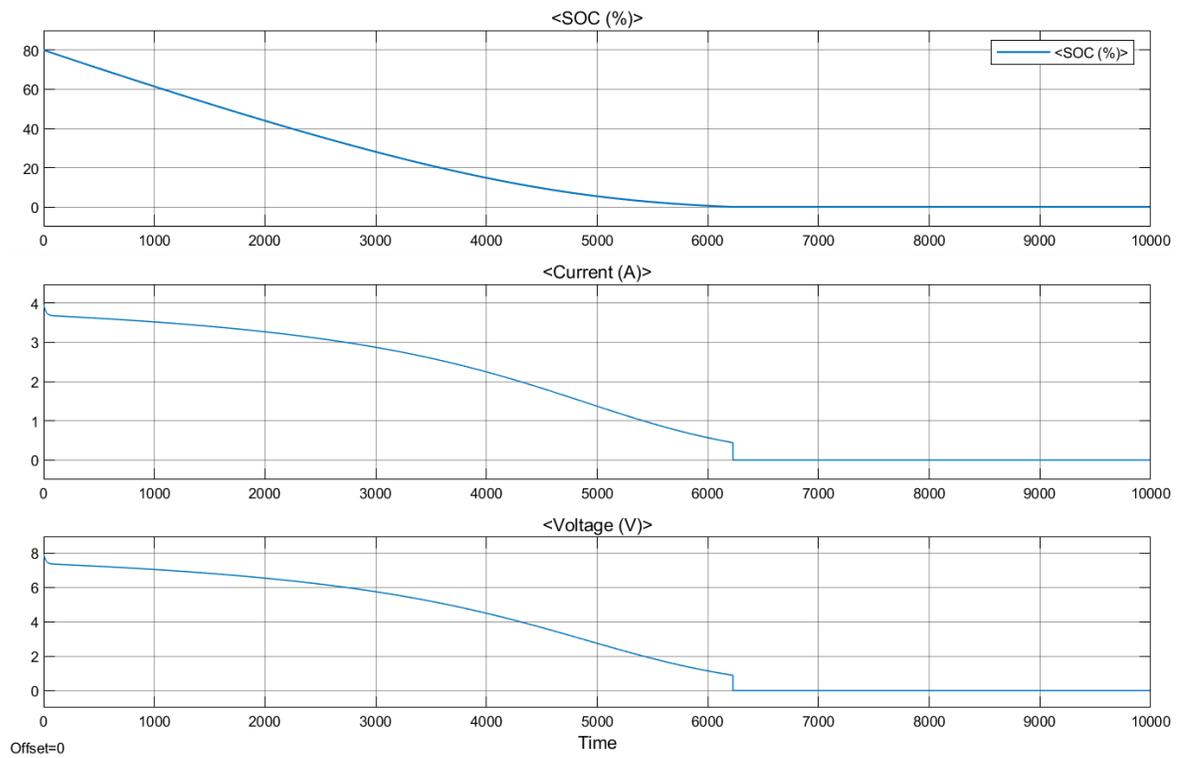


Figure 58 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 80 % de charge

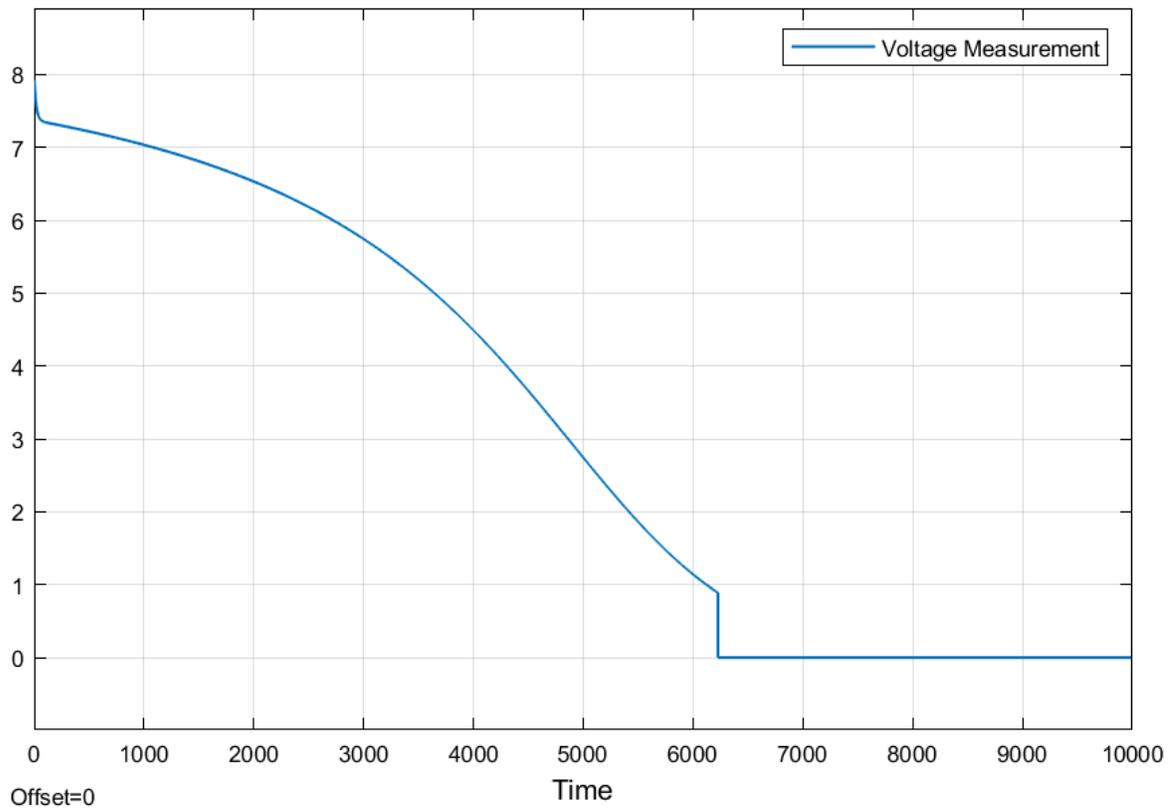


Figure 59 : Mesure de la tension à 80 % de charge

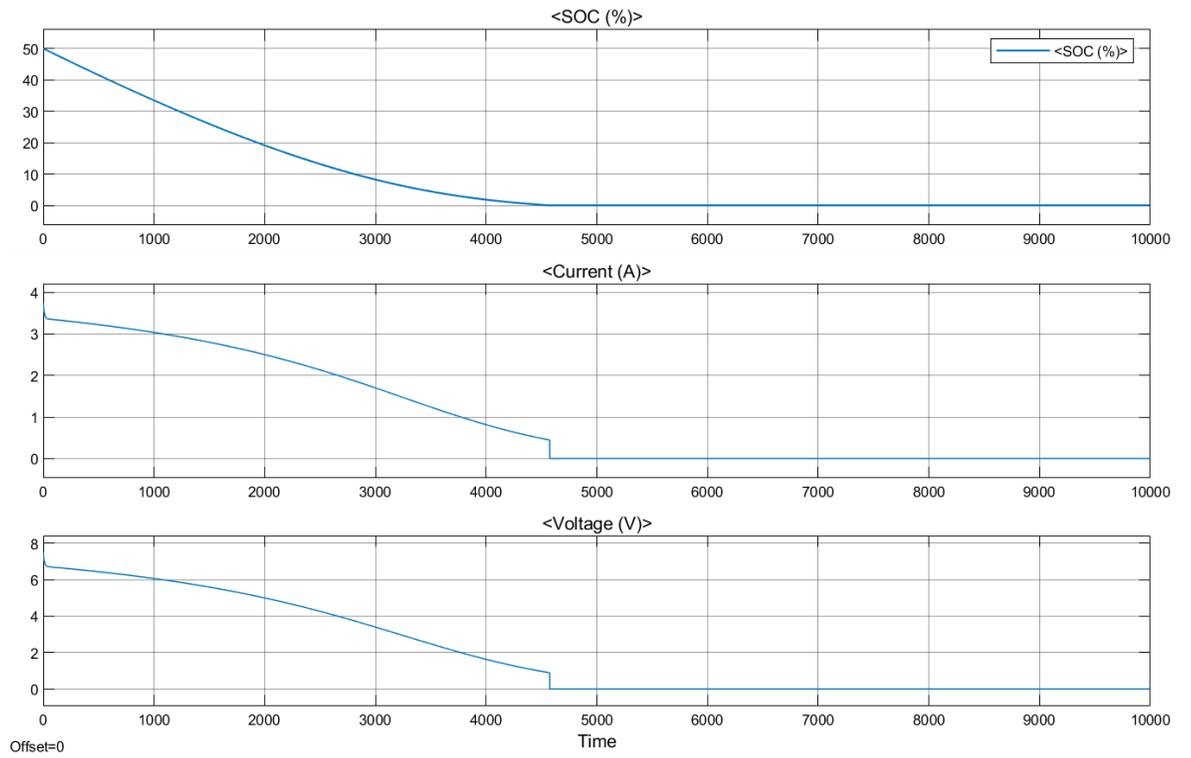


Figure 60 : Graphes de l'état de la charge, du courant et de la tension à 50 % de charge

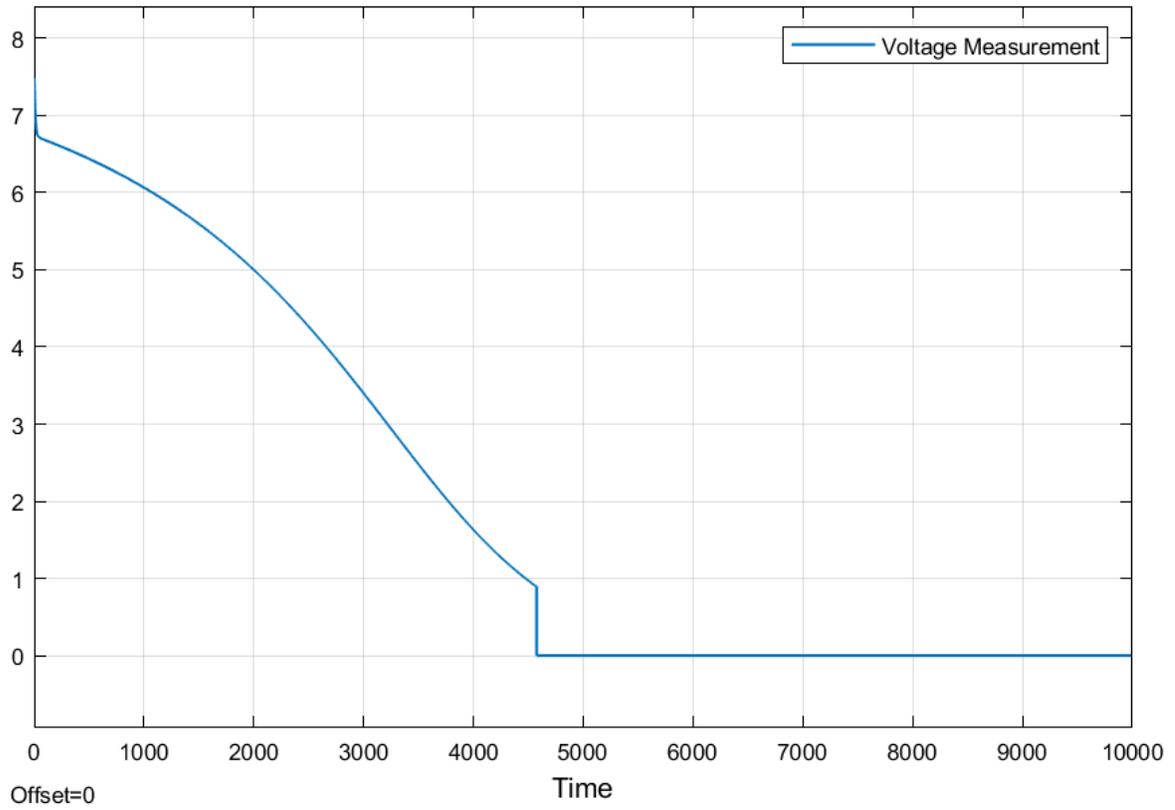


Figure 61 : Mesure de la tension à 50 % de charge

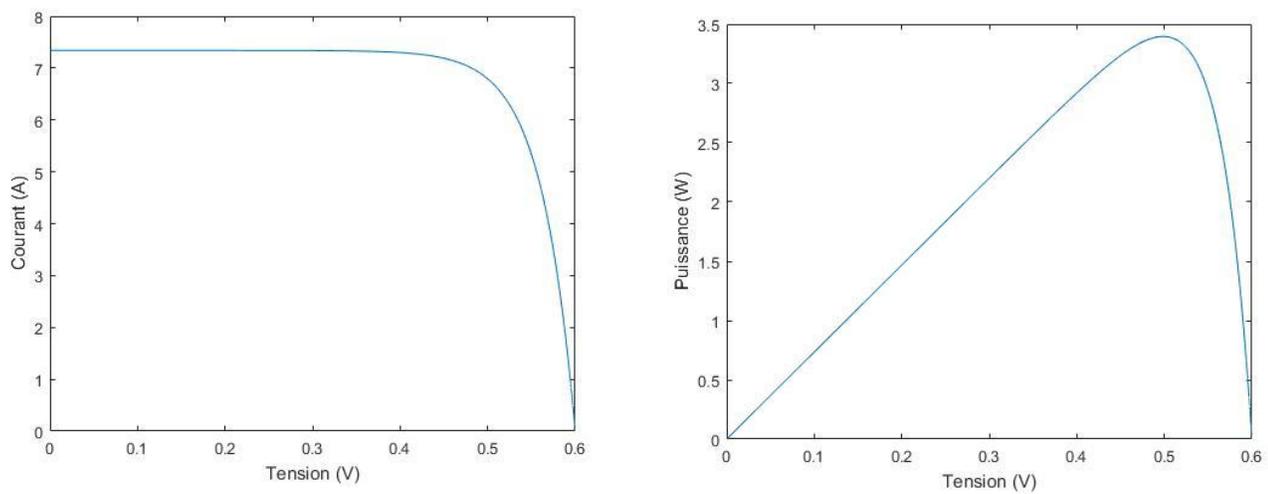


Figure 62 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 1000 \text{ m}^2$

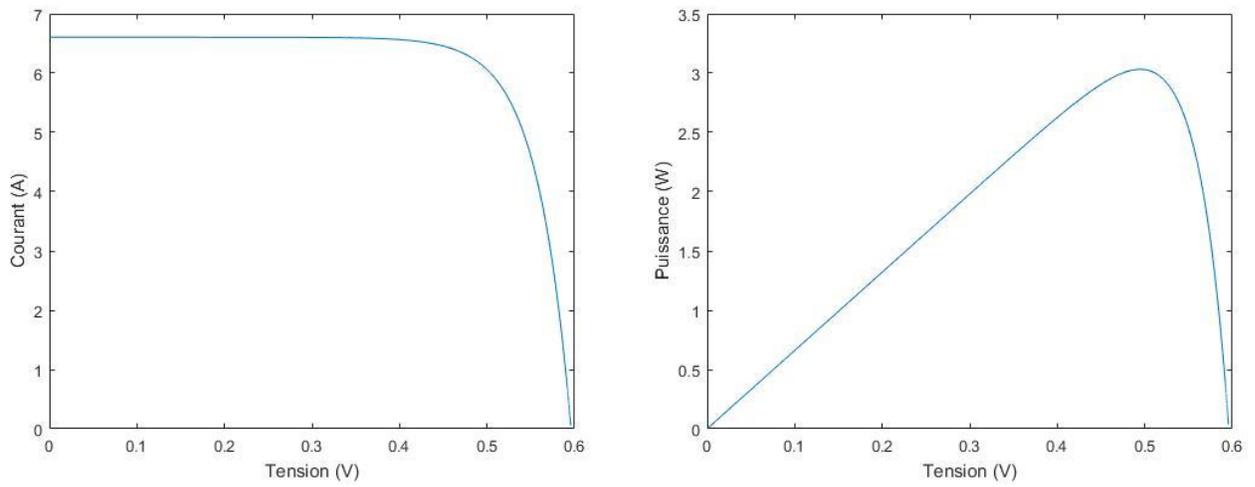


Figure 64 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 900 \text{ m}^2$

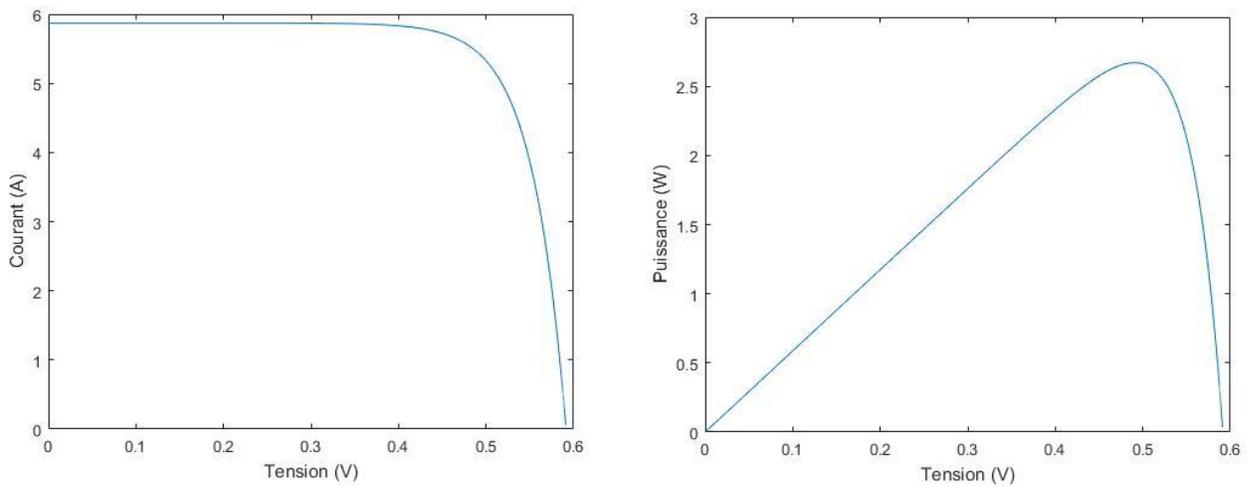
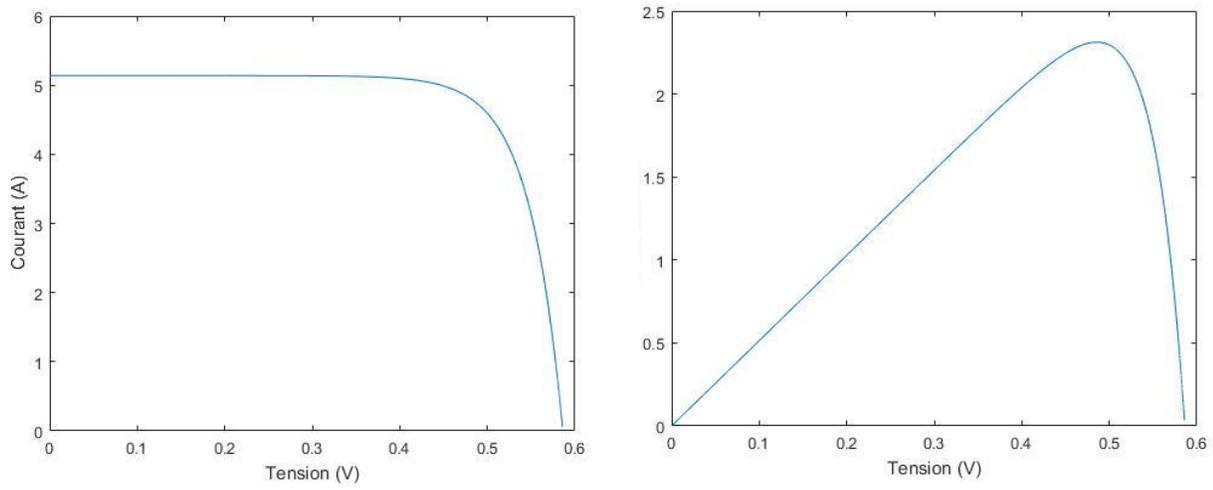
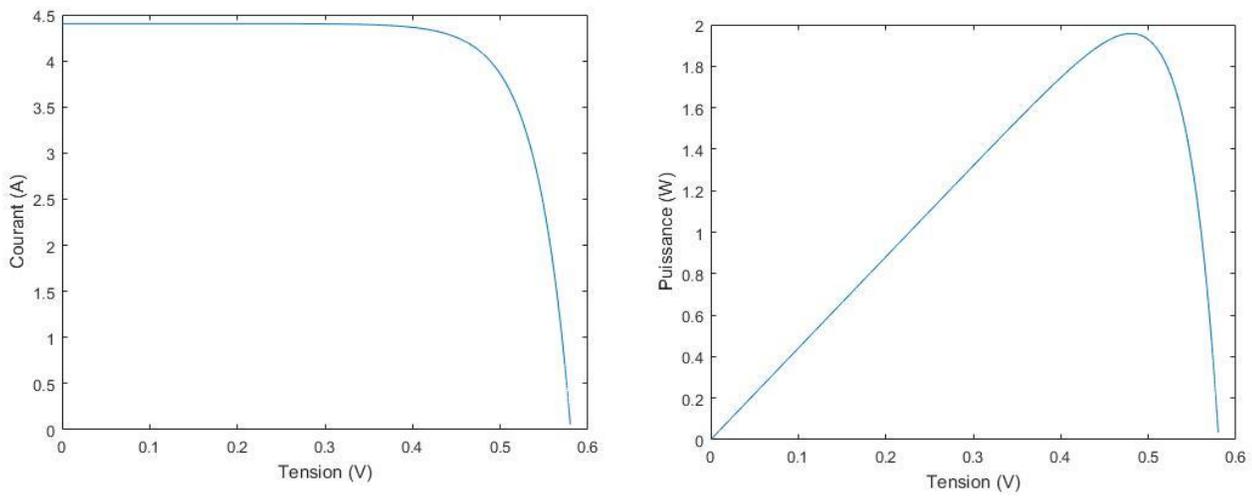


Figure 63 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 800 \text{ m}^2$

Figure 65 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 700 \text{ m}^2$ Figure 66 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 600 \text{ m}^2$

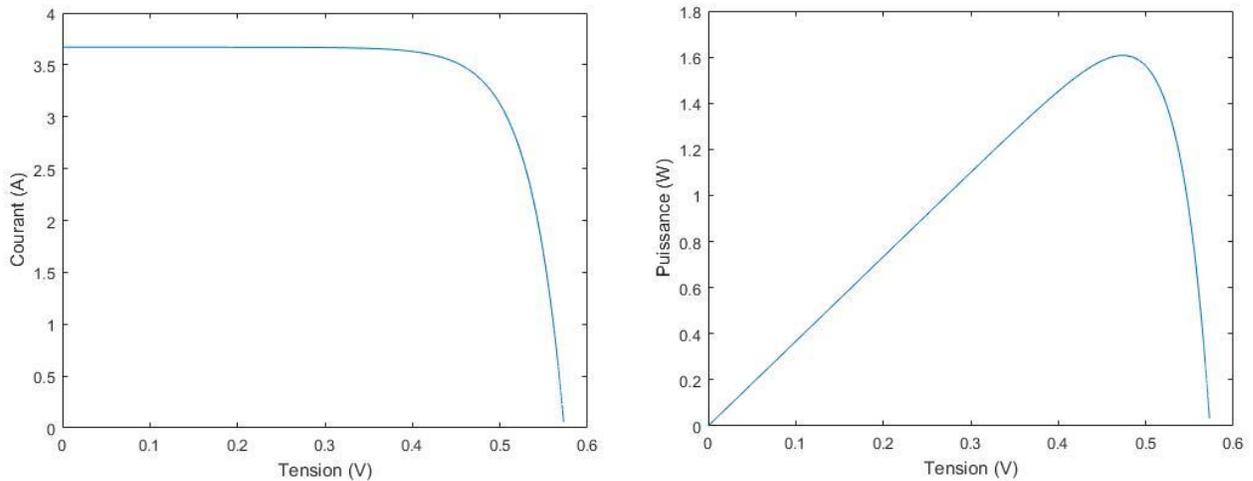


Figure 67 : Courbes I-V et P-V pour  $\Psi= 500 \text{ m}^2$

### 5.3 VALIDATION DES RESULTATS SUR RETSCREEN

#### 5.3.1. Définition et but du logiciel RETScreen

RETScreen est un système Logiciel de gestion d'énergies propres pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu. Il permet aux professionnels et aux décideurs d'identifier, d'évaluer et d'optimiser de façon rapide la viabilité technique et financière de projets potentiels en matière d'énergies propres. Cette plate-forme logicielle d'intelligence décisionnelle permet aussi aux gestionnaires de mesurer et de vérifier facilement les performances réelles de leurs installations, ainsi que de trouver des possibilités supplémentaires d'économies et de production d'énergie (*Ressources naturelles Canada*).

#### 5.3.2. Lieu du projet

La ville de Montréal (Canada) a été choisie pour l'élaboration de notre projet. Etant considérée comme le cœur économique de la province du Québec, Montréal possède un

climat continental humide à forte amplitude thermique. De 1971 à 2000, la température moyenne annuelle s'est élevée à 6,2 °C.

La ville de Montréal a un port, le Port de Montréal, qui est un grand centre de transbordement qui traite tous les types de marchandises : conteneurisées et non conteneurisées, vrac liquide et vrac solide. Il est le principal port à conteneurs dans l'est du Canada et le deuxième plus important au pays. Situé profondément à l'intérieur des terres, à 1 600 kilomètres de la côte Atlantique, et desservi par un réseau pleinement intégré de chemins de fer, d'autoroutes et de pipelines, le Port de Montréal est un élément essentiel de la chaîne d'approvisionnement des principaux marchés de consommation et centres de distribution de l'Est canadien, du Midwest et du Nord-Est américains [66].

### 5.3.3. Simulation

<b>Pays</b>	<b>Canada</b>		
<b>Province</b>	<b>Québec</b>		
<b>Lieu des données climatiques</b>	<b>Montréal-Est</b>		
	<b>Source</b>		
Latitude	45,6	°N	
Longitude	-73,6	°E	
Élévation	50	m	sol
Température extérieure de calcul de chauffage	-20	°C	sol
Température extérieure de calcul de climatisation	28,9	°C	sol
Amplitude des températures du sol	24,4	°C	NASA

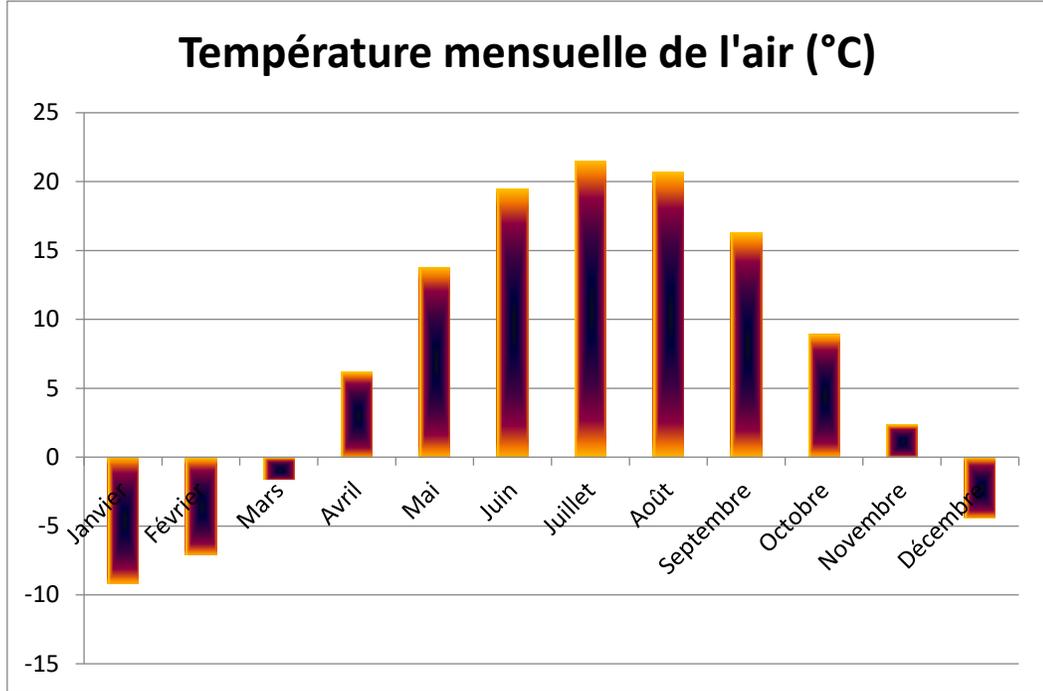


Figure 68 : Température mensuelle de l'air

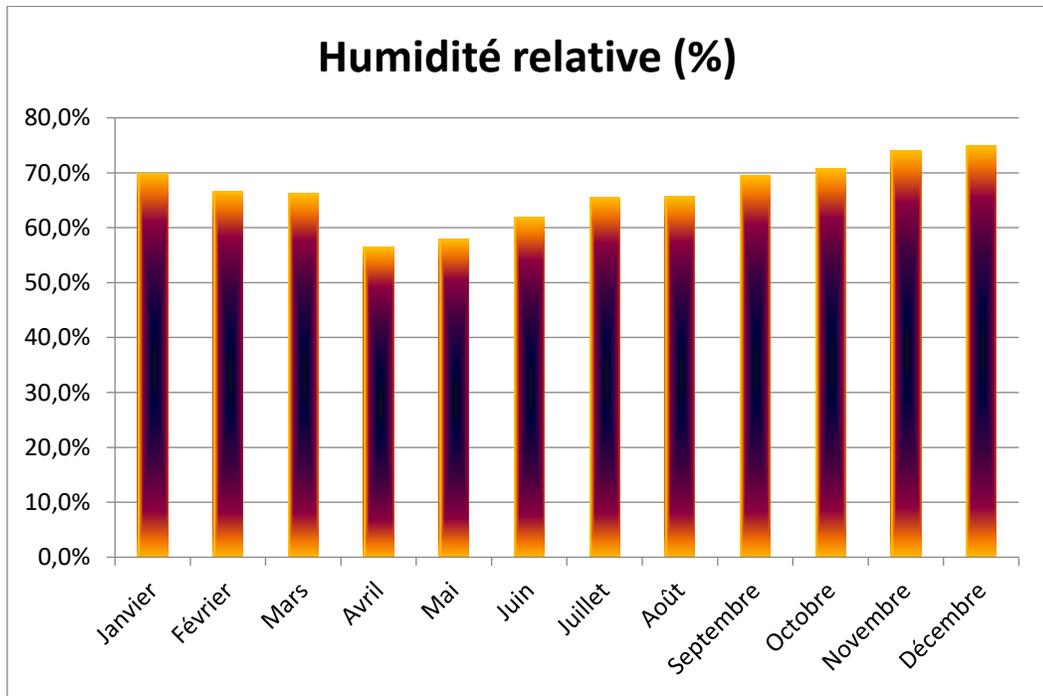


Figure 69 : Humidité relative

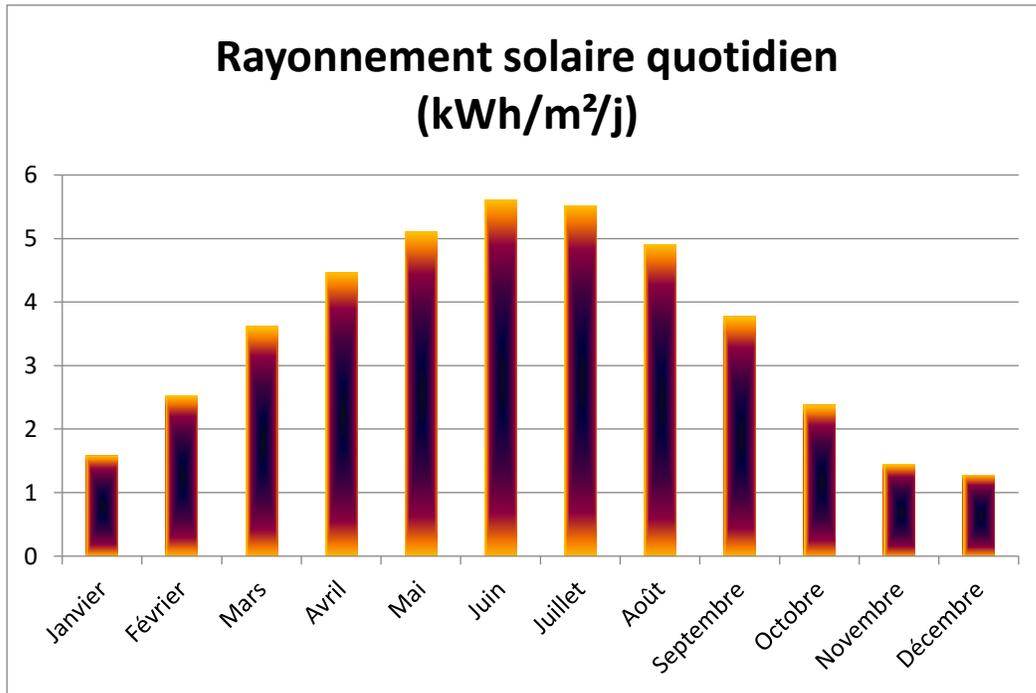


Figure 70 : Rayonnement solaire quotidien

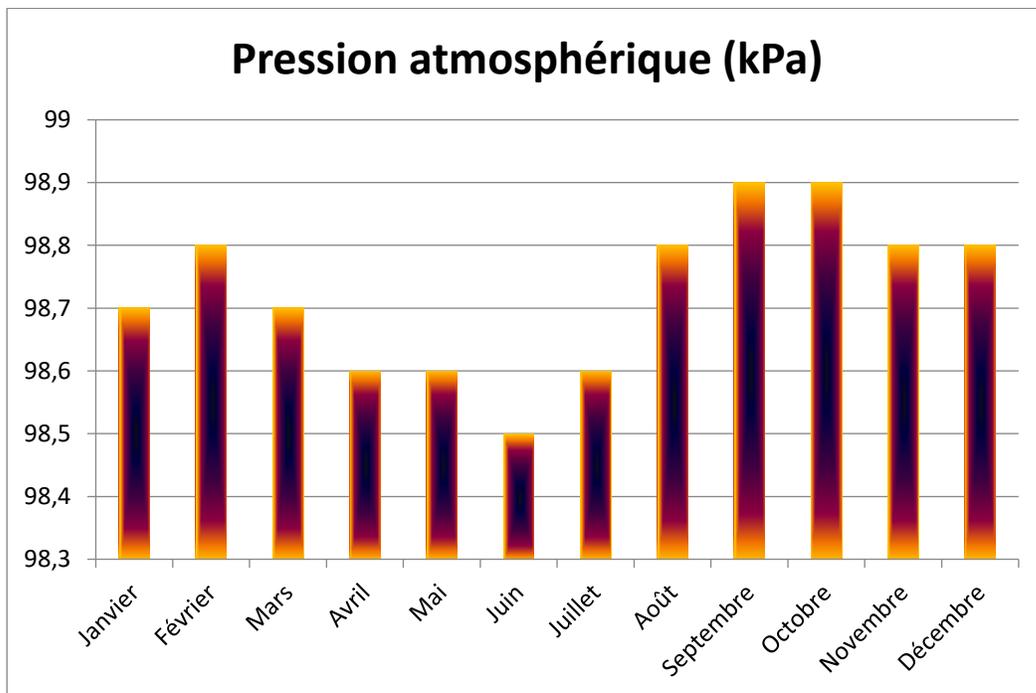


Figure 71 : Pression atmosphérique

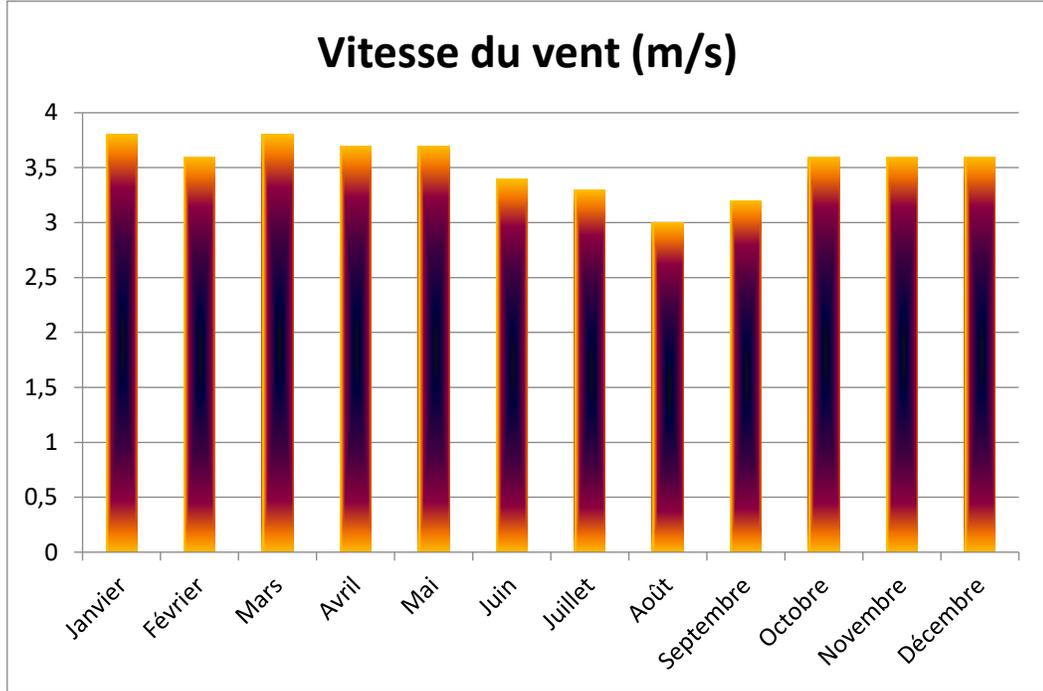


Figure 72 : Vitesse du vent

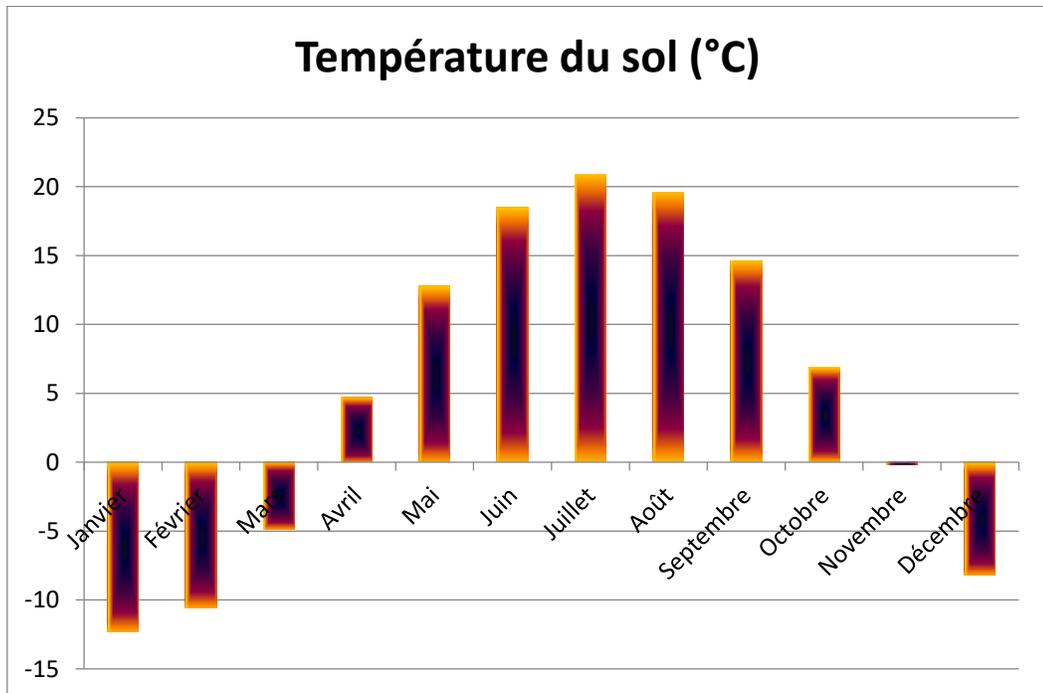


Figure 73 : Température du sol

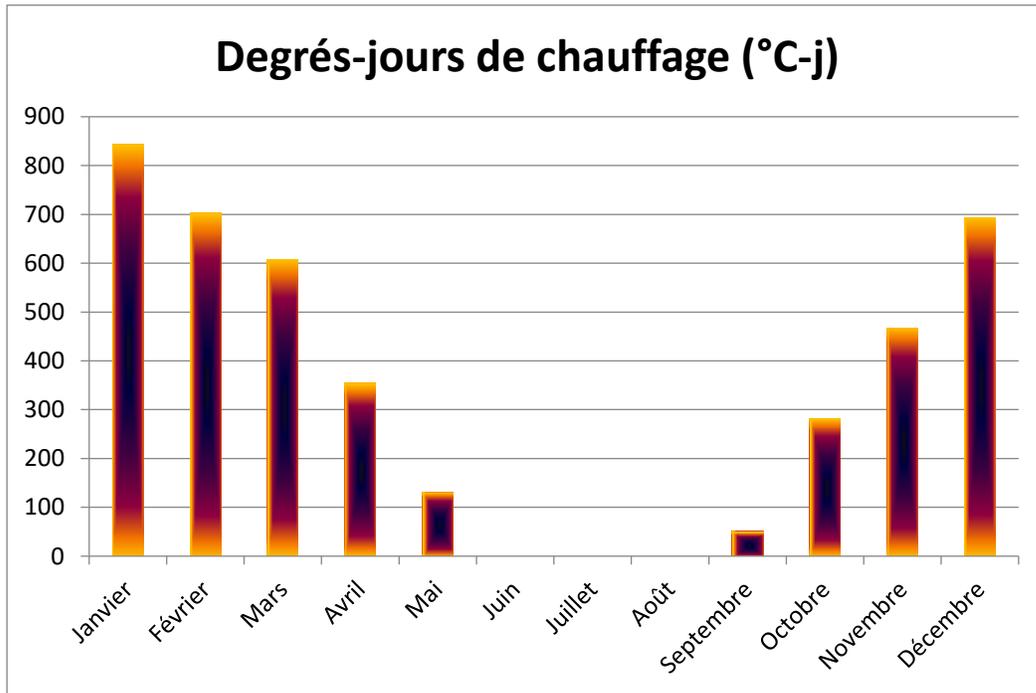


Figure 74 : Degrés-jours de chauffage

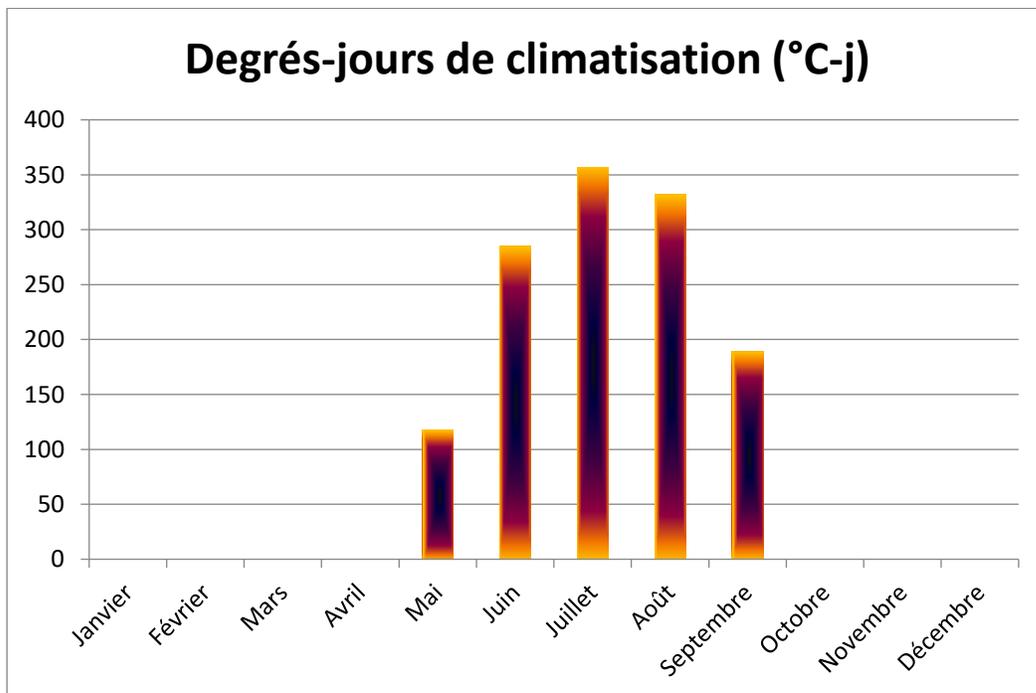


Figure 75 : Degrés-jours de climatisation

### 5.3.4. Résultats de la simulation

#### 5.3.4.1. Modèle énergétique RETScreen

Tableau 19 : Information sur le projet – RETScreen

<b>A. Information sur le projet</b>	
Lieu du projet	Montréal
Type de projet	Production de l'électricité
Technologie	Photovoltaïque
Type de réseau	Réseau central
Type d'analyse	Méthode 2 <sup>5</sup>
Pouvoir calorifique	Pouvoir calorifique supérieur (PSC)

Tableau 20 : Evaluation des ressources - RETScreen

<b>B. Evaluation des ressources</b>	
Système de positionnement solaire	fixe
Inclinaison <sup>6</sup>	45,0 degrés
Azimut	0

<sup>5</sup> La méthode un peu plus détaillée que la méthode 1

<sup>6</sup> L'inclinaison est l'angle du module photovoltaïque par rapport à l'horizontal

Rayonnement solaire annuel – horizontal	1,29 MWh/m <sup>2</sup>
Rayonnement solaire annuel – incliné	1,50 MWh/m <sup>2</sup>

Tableau 21 : Etude du module photovoltaïque - RETScreen

<b>C. Etude du module photovoltaïque</b>	
Type	Polycristallin
Capacité électrique*	0,2 kW
Fabricant	Kyocera
Modèle	KC200GT
Rendement	14,2 %
Température nominale des cellules en opération	45 °C
Coefficient de température** (%/°C)	0,40 %
Surface du capteur solaire***	1 m <sup>2</sup>
Pertes diverses	5 %

\*La capacité électrique correspond à la puissance nominale du champ photovoltaïque qu'on souhaite installée. Cette puissance s'exprime en kWh et correspond à la puissance maximale que peut délivrer le module photovoltaïque dans les conditions standards (1 kWh/m<sup>2</sup> de rayonnement solaire à une température de cellules de 25 °C et sous une masse d'air de 1,5).

\*\*Le coefficient de température est le coefficient qui permet de pondérer le rendement en fonction de la température d'utilisation.

\*\*\*Pour la capacité électrique de 0,2 kW, avec le choix du module photovoltaïque retenu, le logiciel calcule la surface du capteur solaire à 1 m<sup>2</sup>. Cette surface peut aussi être calculée avec le rapport de  $(0,2 \text{ kW} \times 100) / 14,2 = 1,4 \text{ m}^2$

Tableau 22 : L'onduleur - RETScreen

<b>D. Onduleur</b>	
Rendement	90 %
Pertes diverses	2 %

Tableau 23 : Le sommaire – RETScreen

<b>E. Sommaire</b>	
Facteur d'utilisation****	14,2 %
<b>Electricité exportée au réseau</b>	<b>0,249 MWh</b>

\*\*\*\*Le facteur d'utilisation, aussi appelé facteur de charge, est le rapport entre l'énergie électrique produite sur une période donnée et l'énergie que le système photovoltaïque aurait produite s'il avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.

Le facteur d'utilisation peut se calculer comme suit :

Capacité électrique (0,2) x nombre de jours par année (365) x nombre d'heures par jour (24)

$$\rightarrow \rightarrow 0,2 \times 365 \times 24 = 1752 \text{ (1)}$$

$$\rightarrow \rightarrow 0,249 / 0,1752 = 1,42 \times 100 = \mathbf{14,2 \% \text{ Facteur d'utilisation}}$$

Donc, le facteur d'utilisation est le rapport entre l'électricité exportée au réseau sur une période donnée (1 an par exemple) et l'électricité qui serait produite dans les conditions standards de test sur la même période (1 an).

D'après les données de la fiche technique du fabricant, un seul module photovoltaïque polycristallin de type KC200GT de Kyocera, produit une capacité électrique de 0,2 kW. Ceci a aussi été approuvé et validé avec le logiciel RETScreen, qui après avoir introduit nos données, les résultats sont presque les mêmes avec les informations du fabricant, tout en considérant les données climatiques du lieu de projet.

#### 5.4 ÉVALUATION ECONOMIQUE

En navigation normale, la charge électrique du navire FERBEC est d'environ 500 Kw (un seul générateur en marche). Lorsque le système hybride solaire n'est pas utilisé, la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> des générateurs diesel en un an sont :

$$Q_{carburant} = 24q \times T \text{ [3]}$$

$$Q_{CO_2} = Q_{carburant} \times \beta \text{ [3]}$$

où  $q$  est la consommation de carburant par unité de temps (kg / h) et la consommation de carburant par unité de temps est de 137,9 kg / h lorsque la puissance du générateur est de 500 kW;  $T$  est l'heure de navigation du navire (jour), avec une valeur de 365; et  $\beta$  est le coefficient d'émission de carbone, avec une valeur de 3,175 [3].

Par conséquent, sans énergie solaire, la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> des générateurs d'un navire sont insuffisantes pour une année.

$$Q_{carburant} = \frac{24 \times 137.9 \times 365}{1000} = 1208 \text{ t}$$

$$Q_{CO_2} = 1208 \times 3.1705 = 3829.98 \text{ t}$$

Lorsque le navire est alimenté par l'énergie solaire, le système photovoltaïque solaire peut fonctionner 304 jours par an (20 heures/jour). Le générateur du navire peut toujours économiser de l'énergie, mais le montant économisé est différent lorsque le système solaire est connecté à différentes charges. Selon les données expérimentales, lorsque la charge électrique est de 500 kW et que la production d'énergie solaire représente 22,7% de la puissance de charge, la consommation de carburant optimale de 115,7 kg / h peut être obtenue.

En supposant que le rayonnement solaire effectif soit de 6 heures par jour, le navire peut, dans l'idéal, économiser de la consommation de carburant et des émissions de CO2 comme suit :

$$\bar{Q}_{carburant} = 1208 - \left( \frac{115.7 \times 12 + 137.9 \times 18}{1000} \times 292 + \frac{24 \times 137.9 \times 18}{1000} \right) = 220.9 \text{ t}$$

$$\bar{Q}_{CO2} = 38.9 \times 3.1705 = 700.36 \text{ t}$$

Par conséquent, le coût peut être recouvré en 20 ans sans tenir compte du coût de maintenance de l'équipement. La puissance de sortie du système d'énergie solaire étant affectée par les conditions météorologiques, elle peut fortement varier pendant la navigation. Selon l'analyse ci-dessus, une stratégie de gestion de l'énergie optimisée, telle que le contrôle par logique floue, peut améliorer les performances globales du système hybride, réduire la consommation de carburant et raccourcir davantage la période de récupération des investissements.



## **CHAPITRE 6**

### **CONCLUSION GÉNÉRALE**

La construction navale, le transport maritime et le recyclage des navires sont trois activités industrielles très distinctes qui sont généralement traitées ainsi. Cependant, il s'agit d'activités très liées les unes aux autres lorsque l'on considère l'impact que les navires exercent sur l'environnement au cours de leur cycle de vie. Tenter d'évaluer l'impact environnemental de la construction navale et des activités qui y sont associées sur cette base est néanmoins décourageant notamment parce que l'on ne dispose que de très peu d'informations en matière d'environnement pour de nombreuses activités du secteur. Cela signifie aussi que s'il est possible d'établir l'importance et la gravité des nombreux grands problèmes d'environnement auxquels le secteur est confronté, il reste difficile de porter des jugements quant à leur signification en termes d'ampleur et d'impact.

Il est permis de penser qu'il devient vraiment nécessaire de mettre davantage l'accent sur les informations relatives à l'environnement et sur la transparence dans l'industrie de la construction navale en insistant notamment sur ses liens avec des impacts préoccupants pour l'environnement en raison de l'emploi de matières premières et des activités du transport maritime et du recyclage des navires. Cette nécessité va en s'accroissant au fur et à mesure que le programme d'action de l'industrie en matière d'environnement est de plus en plus visible du public.

Jusqu'à présent, l'impact direct de la construction navale sur l'environnement, qui concerne la construction, l'entretien et la réparation des navires a reçu relativement peu d'attention de la part du public. Cette activité est pourtant une source importante de préjudices potentiels pour l'environnement en raison notamment de la manipulation quotidienne de grandes quantités de matériaux, de vapeurs et de fluides toxiques. Les risques d'exposition de l'environnement à divers contaminants dangereux et toxiques se trouvent en outre aggravés dans l'industrie ; premièrement parce que la plupart des activités de construction navale se déroulent en plein air ; et deuxièmement parce que l'installation des

chantiers navals au bord du littoral permet aux polluants potentiels de pénétrer directement dans le milieu aquatique. Cependant, il n'existe pratiquement aucune estimation disponible, à l'échelle du secteur, concernant l'un quelconque de ces impacts ou la contribution directe du secteur au changement climatique.

L'industrie de la construction navale contribue indirectement à faire du transport maritime le mode de transport le plus économe en énergie au monde. Étant donné que le secteur maritime est chargé du transport de la plupart des marchandises échangées au niveau international, les avantages sont évidents en ce qui concerne le changement climatique. Néanmoins, le transport maritime contribue encore largement aux émissions de GES et de polluants atmosphériques et les réductions des émissions demeurent donc un enjeu essentiel pour l'industrie d'autant plus que le trafic maritime devrait augmenter considérablement dans les années à venir.

Le secteur maritime est également responsable du rejet de dangereux contaminants dans les voies fluviales, les écosystèmes marins et les chaînes alimentaires. Ces rejets se produisent lors du déversement de grandes quantités de substances polluantes comme les hydrocarbures, l'eau de cale, l'eau de ballast et les déchets solides et dangereux et par l'intermédiaire de la lixiviation des toxines contenues dans les revêtements de surface et les peintures des navires.

L'activité de recyclage concerne le démantèlement et le recyclage des navires et alors que ces activités peuvent paraître isolées lorsque l'on étudie l'impact environnemental de la construction des navires, elle est à l'origine des préoccupations les plus vives à propos de la pérennité de l'ensemble de la l'industrie de la construction navale. Le recyclage des navires est généralement lié à la manipulation et au rejet de grandes quantités de substances polluantes toxiques et dangereuses, provenant des matériaux d'isolation du navire, des citernes d'eau de cale et des ballasts, des cuves de carburant, des citernes à marchandises, etc. Très peu de sites de recyclage des navires, qui sont généralement installés sur les plages de sable des pays en développement, disposent des installations de collecte et de dispositifs d'étanchéité leur permettant de manipuler ces déchets et un grand nombre d'ouvriers du

recyclage des navires sont en contact direct avec ces déchets sans aucune forme de protection. C'est pourquoi le recyclage des navires a été l'objet d'une grande attention de la part des défenseurs des droits de l'homme et de l'environnement.

Dans l'ensemble, l'industrie de la construction navale est confrontée à de gros problèmes de réduction de l'impact environnemental de ses activités et des activités connexes. Le secteur a toutefois fait preuve de lenteur dans l'adoption de nouvelles technologies permettant d'améliorer les performances environnementales même lorsque ces technologies existent. En conséquence, il devient indispensable de sensibiliser davantage l'industrie et de mettre l'accent sur la disponibilité d'alternatives économiquement avantageuses et respectueuses de l'environnement en remplacement des conceptions, des matériaux et des procédés classiques utilisés par l'industrie.

De plus, selon les principes en vigueur depuis longtemps dans la culture dominante du secteur, un navire doit être rentable dès le premier jour de son exploitation et hormis de rares exceptions, on accorde généralement très peu d'attention et on ne consacre que très peu d'argent à la recherche et aux expériences grandeur nature avec les nouvelles technologies. Il y a lieu d'insister sur le fait que cette culture conservatrice d'une industrie qui par ailleurs, occupe une place absolument essentielle et importante, constitue une sérieuse entrave à la promotion de la croissance verte. D'une manière générale, l'industrie de la construction navale doit adopter un point de vue plus global et ouvert relativement à son programme environnemental, en reconnaissant les responsabilités qu'elle partage en matière d'environnement, même s'il s'agit d'une responsabilité indirecte, avec le secteur du transport maritime et celui du démantèlement et du recyclage des navires.

Trouver des solutions régionales pour réduire l'impact de l'industrie sur l'environnement, en imposant par exemple aux chantiers navals et aux ports, des obligations plus strictes au niveau technologique et environnemental, pourrait peut-être représenter un pas dans la bonne direction. Mais on considère souvent que des solutions de ce type faussent la concurrence en donnant un avantage aux constructeurs de navires des pays qui n'imposent pas les réglementations les plus strictes. Par ailleurs, des obligations régionales plus

rigoureuses, en particulier dans les économies déjà avancées sur le plan technologique, comme les États membres de l'OCDE, pourraient favoriser un avantage compétitif distinct dans le domaine de la construction navale en poussant l'industrie sur la voie de la croissance verte.

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avérée une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, nous avons exposé les problèmes auxquels fait face aujourd'hui le secteur maritime pour l'environnement. Nous avons rappelé des notions sur l'utilisation des carburants pouvant être un élément clé pour les émissions atmosphériques des navires. Puis nous avons pu clore ce chapitre en analysant les deux aspects majeurs, technique et économique, en vue d'installations des systèmes d'alimentation électrique à quai.

En ce qui concerne les chapitres 4 et 5, nous avons parlé du caractère intermittent de l'énergie solaire étant un de ses principaux inconvénients pour son utilisation permanente ainsi il

s'avère indispensable d'emmagasiner une partie de l'énergie produite. De ce fait, nous avons tenté de mettre en exergue, de manière critique un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de cout.



## *RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

- [1] OMI, “Le transport maritime et le défi du changement climatique,” no. Organisation maritime internationale, 2009.
- [2] Γ. Βλάχος, “Εμπορική Ναυτιλία και Θαλάσσιο Περιβάλλον,” no. Σταμούλης (2e édition). 2017.
- [3] Y. Yupeng, Tianding, Z., Boyang, S., Xinping, Y., Teng, L., “A Fuzzy Logic Energy Management Strategy for a Photovoltaic/Diesel/Battery Hybrid Ship Based on Experimental Database,” 2018.
- [4] UNCTAD, “Review of Maritime Transport,” 2012.
- [5] K. Marquart, Haasdijk, T., Ferrari, GB., Schmidhalter, R., “Branchement électrique des navires à quai,” no. ABB, 2017.
- [6] D. Bailey, Solomon, G., “Pollution Prevention at Ports: Clearing the Air,” no. Environmental Impact Assessment Review, pp. 749-774, 2004.
- [7] V. Eyring, Al., “Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Shipping”, vol. 44, no. Atmospheric Environment, pp. 4735-4771, 2010.
- [8] B. Dalsøren, Al., “Update on Emissions and Environmental Impacts from the International Fleet of Ships: the Contribution from Major Ships Types and Ports,” vol. 9, no. Atmospheric Chemistry and Physics, pp. 2171-2194, 2009.
- [9] GT6, “L’industrie de la construction navale : problèmes d’environnement et de changement climatique,” no. OECD - Groupe de travail du Conseil sur la construction navale, 2010.
- [10] ICS, “Shipping, World Trade and the Reduction of CO2,” no. International Chamber of Shipping, 2009.
- [11] EPA, “Electric Arc Welding,” vol. 1, no. United States Environmental Protection Agency., 1995.
- [12] EPA, “Sector Performance Report: Shipbuilding and Repair,” no. United States Environmental Protection Agency, 2008.
- [13] EPA, “Shipyard Stormwater Best Management Practices No. 4: Metal Grinding,” no. United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [14] M. Stopford, “Maritime Economics,” no. Routledge, 2009.
- [15] I. IGSD, “Reducing Black Carbon May Be the Fastest Strategy for Slowing Climate Change,” no. Institute for Governance & Sustainable Development.
- [16] S. Alvik, Eide, M. S., Endresen, Ø., Hoffmann, P., and Longva, T., “Pathways to low carbon shipping: Abatement potential towards 2030,” no. Det Norske Veritas, 2010.
- [17] OrangeMarine, “La production d’énergie à bord,” no. Orangemarine.
- [18] A. Chughtai, “M/V Auriga Leader - World’s First Solar-Powered Cargo Ship,” 2018.
- [19] S. Hannula, Levander, O., Sipilä, T. , “LNG Cruise Ferry - a truly environmentally sound ship,” no. Wärtsilä Corporation, 2006.
- [20] M. Renilson, “A Note on Some Important Marine Environmental Issues,” no. Journal of Ocean Technology, 2005.
- [21] UNCTAD, “Review of Maritime Transport,” 2014.

- [22] ADEC, “Étude de l’impact économique de l’industrie maritime au Québec,” no. ADEC Inc., 2012.
- [23] E. Gordon, Hackston, D., “Impacts environnementaux et sociaux du transport maritime dans la région des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent,” no. Research and Traffic Group 2013.
- [24] RTG, “Les données de la voie maritime du Québec”, no. NTAD–DOT et de GéoGratis–RNCAN, 2018.
- [25] MTQ, “Service du transport maritime et de la mise en valeur du Saint-Laurent,” no. Ministère des Transports du Québec: Division de la géomatique, 2016.
- [26] RTG, “Analyse du transport par chaque mode sur une même distance dans la région Grands Lacs-Voie maritime.,” no. Research and Traffic Group 2010.
- [27] M.-M. Ion, “Amélioration de la sélectivité des protections électriques des navires lors de l’alimentation à quai –Augmentation du courant de court-circuit,” no. Thèse de doctorat, 2015.
- [28] M. Megdiche, Radu, D., Jeannot, R., “Protection plan and safety issues in the shore connection applications,” no. 22nd International Conference on Electricity Distribution, 10-13 June 2013.
- [29] C. Delavelle, “Etude du branchement des navires aux réseaux d’alimentation électrique terrestres,” *Aji - Europe*, pp. 3, 17 juin 2009.
- [30] Sodes, “Alimentation électrique des navires à quai,” 2018.
- [31] J. Paradis, “Inventaire des émissions des principaux contaminants atmosphériques au Québec en 2008 et évolution depuis 1990,” no. Gouvernement du Québec, 2011.
- [32] E. Buchet, Dubeau, B., “Etude de l’impact énergétique et des émissions des ports et aéroports de la région PACA,” no. Egis eau, 2002.
- [33] T. Borkowski, Tarnapowicz, D., “Shore to ship” system – an alternative electric power supply in port,” no. Maritime University of Szczecin 2012.
- [34] A. Gallais Bouchet, “Les émissions de gaz par les navires. L’alternative GNL, mais quelles conditions ?,” no. ISEMER, 2015.
- [35] N. Olmer, Comer, B., Biswajoy, R., Xiaoli, M., Rutherford, D., “Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015,” no. The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2017.
- [36] A. Paca, “Impact des émissions du transport maritime sur la qualité de l’air des zones portuaires,” no. Air Paca, Qualité de l’air, 2017.
- [37] A. d. France, “La teneur en soufre des combustibles marins,” no. Armateurs de France, Note d’information, 2017.
- [38] B. McEwen, Olszewski, G., Hrebenyk, D., “Inventaire des émissions des opérations terrestres et maritimes au Port de Montréal,” no. SENES Consultants Limited, 2009.
- [39] T. Canada, “Options d’amélioration de la réglementation sur les émissions dans l’atmosphère par les navires dans la zone des Grands Lacs et du Saint-Laurent (Réseau de la voie maritime des Grands Lacs et du Saint-Laurent, fleuve Saint-Laurent et golfe du Saint-Laurent),” no. Conseil Consultatif Maritime Canadien (CCMC), 2010.
- [40] J. Esteve-Pérez, Gutiérrez-Romero, J.E., “Renewable energy supply to ships at port”, 2015.

- [41] W. W. P. C. Initiative", "Onshore power supply," 2018.
- [42] ABB, "Shore-to-ship power. Dock-side power reduces emissions," 2014.
- [43] F. I. Ericsson P., "Shore-Side Power Supply," Energy and Environement, Chalmers University of Technologies, Göteborg, Sweden, 2008.
- [44] D. Tarnapowicz, " An alternative power supply: the use of ships in port as an environmentally friendly solution," no. Studia i materiaáy Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą 45 2011/304 VIII Międzynarodową KonferencjĆ, Systemy Wspomagania w Zarządzaniu ģrodowiskiem, 2011.
- [45] W. W. P. C. Initiative", "Onshore Power Supply : Equipment and solutions," 2018.
- [46] M.-M. Ion, "Amélioration de la sélectivité des protections électriques des navires lors de l'alimentation à quai –Augmentation du courant de court-circuit," pp. 15, 2015.
- [47] ABB, "Shore-to-ship power. An effective solution for port emissions reduction," no. ABB Shore-to-ship power, pp. 5.
- [48] R. J. D. Radu, M.Megdiche, J.P. Sorrel, "Shore Connection Applications – Main challengers," 2013.
- [49] P. Topping, "Loi de 2001 sur la marine marchande du Canada (LMMC 2001)," no. Transports Canada, 2010.
- [50] B. Winchester, "En route avec le gaz naturel," no. Alliance canadienne pour les véhicules au gaz naturel, 2018.
- [51] P. G. Pamel, Wilkins, Robert C., "Les navires à gaz naturel liquéfié, des bâtiments écologiques pour l'Arctique," no. Symposium sur l'environnement au tribunal : Protection de l'environnement marin, 2016.
- [52] STQ, "NM F.-A.-Gauthier," no. Société des traversiers du Québec, 2016.
- [53] H. Wang, Mao, X., Rutherford, D. , "Costs and benefits of shore power at the port of Shenzhen ", no. The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2015.
- [54] ICCT, "Costs and benefits of shore power at the port of Shenzhen," no. The International Council on Clean Transportation.
- [55] T. Canada, "Programme d'alimentation à quai pour les ports," no. Transports Canada, 2017.
- [56] A. P. Görkem Kökkülünk, Arif Karakas, "Energy cost assessment of shoreside power supply considering the smart grid concept: a case study for a bulk carrier ship," 2016.
- [57] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," 2002.
- [58] Z. Malek, Champenois, G., Roboam, X., Sareni, B.? Belhadj, J., "Dimensionnement optimisé d'un système de génération d'énergie électrique et d'eau potable à partir de ressources renouvelables - Modélisation par plan d'expériences," no. Open Archive Toulouse Archive Ouverte, 2016.
- [59] Y. Mohamed, Mahmoud A., Youm, I., "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque," 2008.
- [60] L. Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV," no. Université de Grenoble, 2011.
- [61] R. Bettignies, "Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveau systèmes conjugués," 2003.

- [62] Y. Sukamongkol, Chungpaibulpatana, S., Ongsakul, W., “A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads,” 2001.
- [63] I. Bendjamâa, “Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque,” no. UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID –TLEMCEM, 2012.
- [64] M. Belhadj, Benouaz, T., Sellam, M., Hadjaj, F., “Modélisation d’un système de stockage Chargé par un système PV,” no. Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique, 2010.
- [65] M. Chikh, “Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté aux site isolés de l’Algérie,” no. Thèse de magister, CDER, 1994.
- [66] A. p. d. Montréal, “Port de Montréal,” 2016.