



Une étude commandée
par le réseau **MeRLIN**
et Technopole maritime
du Québec

Réalisée par
Innovation maritime

L'électrification des quais au Québec



TECHNOPOLE
MARITIME
DU QUÉBEC



Contexte

L'industrie du transport maritime cherche à réduire ses émissions de gaz à effet de serre et à décarboner ses activités. Elle cherche notamment à réduire son empreinte carbone dans les zones portuaires en sondant l'option d'électrification à quai pour réduire les émissions des navires durant leurs escales. Alors que le Québec bénéficie via les nombreuses centrales hydroélectriques présentes sur son territoire d'une électricité propre et abordable, peu d'initiatives ont émergé dans le transport maritime québécois pour développer ce type de branchement.

C'est dans ce contexte que cette étude a été commandée à Innovation maritime pour le réseau MeRLIN de Technopole maritime du Québec. Celle-ci a ainsi pour objectif de réaliser un état des lieux de la situation au Québec et d'identifier des moyens techniques et économiques permettant de favoriser l'installation de ce genre de technologie au Québec. Le projet met notamment en évidence les conditions dans lesquelles l'électrification à quai pourrait devenir une option valable pour les différentes parties prenantes.

À propos de MeRLIN



Porté par Technopole maritime du Québec (TMQ), MeRLIN est un réseau industriel dédié à l'innovation dans le secteur du transport maritime et du milieu portuaire. Il vise à améliorer l'accès aux expertises en recherche et développement afin de faciliter la mise en œuvre de projets innovants répondant aux défis de l'industrie maritime.

MeRLIN accompagne l'industrie dans la définition de ses besoins de recherche, stimule le travail collaboratif autour d'enjeux communs, facilite la réflexion et le processus de recherche de solutions concrètes, favorise la mise en place d'outils de planification à long terme et assure l'arrimage des acteurs du milieu.

MeRLIN est le fruit de la contribution de ses membres industriels et de ses partenaires financiers, soit Développement Économique Canada (DEC) et le Créneau Ressources Sciences et Technologies Marines.

Membres MeRLIN



TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	ix
Quelques définitions.....	xi
Liste des abréviations et des acronymes.....	xiii
Réglementation.....	xv
1 Contexte.....	17
2 Situation actuelle de l'électrification des quais et des navires marchands	19
2.1 Introduction à l'alimentation à quai.....	19
2.2 Situation dans quelques ports du Québec et du Canada	24
2.2.1 Port de Québec	25
2.2.2 Port de Trois-Rivières.....	28
2.2.3 Port de Montréal.....	29
2.2.4 Autres ports du Québec	31
2.2.5 Port d'Halifax	32
2.2.6 Port de Vancouver	32
2.2.7 Port de Prince Rupert.....	33
2.3 Armateurs opérant sur le Saint-Laurent.....	34
2.3.1 Principaux armateurs canadiens	34
2.3.2 Flotte étrangère opérant régulièrement sur le Saint-Laurent	36
3 Principales technologies et configurations électriques pour l'électrification à quai	37
3.1 Situation en électrification dans le monde.....	37
3.2 Principales technologies disponibles à quai	41
3.2.1 Topologie du système CENAQ – haute tension une fréquence.....	42
3.2.2 Topologie du système CENAQ – haute tension deux fréquences avec un convertisseur	43
3.2.3 Topologie du système CENAQ – haute tension deux fréquences à plusieurs convertisseurs	44
3.2.4 Topologie du système CENAQ – Haute tension courant continu (HTCC).....	48
3.3 Principaux modes de connexion quai-navire.....	53
3.3.1 Système de connexion pour navires roulier, cargo et de croisières	54

3.3.2	Système de connexion pour navires porte-conteneurs.....	56
3.3.3	Système de connexion pour navires-citernes de gaz naturel liquéfié (LNGC).....	59
3.3.4	Système de connexion pour pétroliers.....	60
3.4	Situation au Québec et au Canada.....	61
3.5	Principales conclusions de l'évaluation des technologies d'alimentation à quai.....	64
4	Principaux enjeux du branchement à quai.....	67
4.1	Éléments à considérer pour le succès d'un projet d'implantation d'électrification à quai.....	67
4.1.1	Analyse initiale.....	67
4.1.2	Sélection du terminal.....	67
4.1.3	Utilisation du terminal et consommation électrique.....	67
4.1.4	Distance des communautés locales.....	68
4.1.5	Implication des armateurs.....	68
4.1.6	Les terminaux à conteneurs ont besoin de plusieurs points de connexion.....	68
4.1.7	Coût des modifications.....	69
4.2	L'étude de la « British Ports Association ».....	70
5	Coûts et bénéfices associés à l'électrification des quais.....	77
5.1	Études de cas.....	77
5.1.1	Électrification d'un navire marchand : la mise à jour du <i>Hafnia Lise</i>	77
5.1.2	Électrification d'un quai : le cas du terminal de croisières de White Bay, Balmain, Australie.....	80
5.1.3	Basse ou haute tension : le cas du port de Gävle.....	82
5.1.4	Basse ou haute tension : le cas du port de Rotterdam.....	83
5.1.5	Un modèle de production d'électricité en cogénération : le cas du port d'Ancône en Italie.....	84
5.1.6	Estimation des bénéfices environnementaux : le cas du port de Vancouver.....	85
5.2	Estimation des gains environnementaux potentiels pour trois ports du Québec.....	88
6	Tendances au niveau mondial.....	93
7	Constats et principales recommandations.....	101
	Bibliographie.....	105
	Annexe A - Présentation des standards de connexion.....	109
	IEC/IEEE 80005-1 2019-03.....	109
	IEC/IEEE 80005-2 2016.....	110

IEC/IEEE 80005-3 2014 PAS	111
IEC 62613-1 2019	112
IEC 62613-2 2016	113
IEC 60309-1 2012	113
IEC 60309-5 2017	114
Annexe B : Exemple de convertisseurs de fréquence statiques basse tension pour application d'alimentation quai- navire	115
Annexe C : Exemple de convertisseurs de fréquence statiques haute tension pour application d'alimentation quai- navire	119
Annexe D : Marché de l'alimentation à quai — principaux fournisseurs de services	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Utilisation de l'alimentation à quai au port de Montréal pour les navires de croisières.....	31
Tableau 2 Fréquence d'alimentation des réseaux électriques.....	34
Tableau 3 Tensions d'alimentation	35
Tableau 4 Puissance maximale nécessaire à quai.....	35
Tableau 5 Puissances et fréquences électriques requises par type de navire dans le monde [12] [13].....	38
Tableau 6 Spécifications des systèmes typiques pour les différentes exigences d'alimentation	39
Tableau 7 Configuration système requise pour différents types et tailles de navires*	40
Tableau 8 Comparaison des topologies décrites du système CENAQ	51
Tableau 9 Coût estimé pour la modification (retrofit) de l'alimentation à bord des navires selon leur type et leur tonnage (jauge brute).....	69
Tableau 10 Recommandations de la British Ports Association	72
Tableau 11 Pourcentage des visites de la flotte devant utiliser l'alimentation à quai dans chaque port californien	73
Tableau 12 Recommandations et facteurs de succès	74
Tableau 13 Principaux obstacles pour l'implantation d'un système de raccordement sur les navires	76
Tableau 14 Modèle commercial du <i>Hafnia Lise</i>	78
Tableau 15 Résumé des données de l'étude	79
Tableau 16 Résumé des coûts globaux de l'installation d'alimentation à quai au White Bay Cruise Terminal (en \$ australiens).....	81
Tableau 17 Réductions des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre par escale*	85
Tableau 18 Réductions prévues des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre*	86
Tableau 19 Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Montréal.....	90
Tableau 20 Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Québec	91
Tableau 21 Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Trois-Rivières	92
Tableau 22 Nombre de demandes de connexion par type de navire	93
Tableau 23 Informations sur les connexions à quai par type de terminal.....	94

Tableau 24 Équipements d'alimentation à quai actuellement mis en œuvre.....	94
Tableau 25 Source de l'électricité au port.....	95
Tableau 26 Détails de la configuration du réseau électrique et du système d'alimentation à quai - distances de l'infrastructure (km).....	96
Tableau 27 Temps moyen pour connecter/déconnecter le système d'alimentation à quai du port au navire selon le type de navire	97
Tableau 28 Proportion des gestionnaires des systèmes d'alimentation.....	98
Tableau 29 Proportion des incitatifs pour le branchement à quai	98
Tableau 30 Réductions approximatives des émissions des polluants (en tonnes/année)	99
Tableau 31 ABB PCS100 SFC spécifications techniques.....	115
Tableau 32 ABB ACS6080 SFC spécifications techniques	119

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Configuration type en Amérique du Nord d'un réseau d'alimentation à quai	19
Figure 2 Identification des principaux ports offrant l'alimentation à quai en Europe.....	22
Figure 3 Carte des États-Unis et de la position des ports offrant l'alimentation à quai en 2017.....	23
Figure 4 Zones portuaires de Québec	26
Figure 5 Zones portuaires de Trois-Rivières	28
Figure 6 Panneau de connexion et de commande et détail de la fiche d'un câble.....	32
Figure 7 Fréquence et tension nominales par pays.....	37
Figure 8 L'alimentation électrique doit être adaptée aux types de navires à quai.....	38
Figure 9 Éléments d'un système d'alimentation à quai.....	40
Figure 10 Installation haute tension à 60 Hz typique grande puissance pour navire de croisières à 11 kV.....	42
Figure 11 Convertisseur de fréquence haute puissance — deux bus CA — 50 Hz et 60 Hz.....	43
Figure 12 Quelques convertisseurs de puissance inférieure — deux bus CA — 50 Hz ou 60 Hz.....	44
Figure 13 Station en conteneur - modules de plusieurs petits convertisseurs sous forme de rack	45
Figure 14 Redondance multiniveaux conçue par ABB	46
Figure 15 Sélecteur de fréquence	47
Figure 16 Réseau de distribution et de sélection des quais à 60 Hz à haute tension avec sous-station secondaire de conversion	48
Figure 17 Alimentation HT (transmission - HTCC)	49
Figure 18 Transmission - HTCC avec l'utilisation de plateformes mobiles.....	50
Figure 19 Illustration du nivelage des charges d'un navire et des périodes de charge et de décharge d'une UEE..	53
Figure 20 Diagramme général du système de connexion pour navires roulier, cargo et de croisières.....	54
Figure 21 Diagramme général du système de connexion des navires de croisières	55
Figure 22 Méthodes de connexion basées sur les configurations de connexion des navires rouliers et de croisières	56
Figure 23 Diagramme général du système de connexion des porte-conteneurs.....	57

Figure 24 Conteneur de connexion d'alimentation à quai sur un porte-conteneurs	58
Figure 25 Enrouleur de câbles sur le pont du navire. Conteneur avec enrouleur de câbles. Caniveau avec connecteurs de raccordement	58
Figure 26 Diagramme général du système de connexion des navires transportant du GNL.....	59
Figure 27 Diagramme général du système de connexion des navires-citernes	60
Figure 28 Tour semi-mobile	62
Figure 29 Sous-station électrique	62
Figure 30 Opération de connexion d'un navire	63
Figure 31 <i>M/T Hafnia Lise</i> manœuvrant dans le fleuve Saint-Laurent	77
Figure 32 Configuration du réseau électrique et du système d'alimentation à quai.....	96
Figure 33 Diagramme bloc d'une LVSC.....	112

QUELQUES DÉFINITIONS

Branchement à quai ou alimentation à quai (*shore power* ou *shore-to-ship power* ou *alternative maritime power*) :

Le branchement à quai fait référence à l'électrification d'un navire via un réseau de distribution électrique terrestre lorsque ce dernier est amarré dans un port. Des systèmes auxiliaires tels que la manutention de la cargaison, des systèmes de pompage, de ventilation, d'éclairage et de chauffage peuvent donc être disponibles sans faire fonctionner des générateurs au diesel, réduisant ainsi considérablement la pollution atmosphérique et sonore.

Selon les standards IEC/IEEE, le temps de branchement d'un navire au réseau électrique d'un port doit être réalisé à l'intérieur d'un délai de 45 minutes. Une fois connectés selon les standards IEC/IEEE 80005-1 pour la haute tension ou IEC/IEEE 80005-3 pour la basse tension, les moteurs du navire sont éteints et le navire dépend du système d'alimentation local pour tous les services du navire lorsqu'il est au port. [1]

Il est à noter qu'aucune interruption de courant (blackout) n'est nécessaire sur le réseau électrique du navire pour faire la synchronisation (passage vers l'alimentation électrique terrestre).

Connexion directe :

Souvent appelé connexion d'hivernage [2], ou connexion de cale sèche, ce type de connexion est utilisé par un navire occupant un poste à quai pendant toute ou une partie de la période hivernale et qui ne se livre à aucune activité commerciale au cours de cette période. Lors de la connexion à ce type d'alimentation à quai, l'alimentation à bord doit être interrompue, nécessitant un redémarrage de l'ensemble des systèmes sur le navire.

« Cold ironing » :

Fait référence à l'arrêt des moteurs auxiliaires du navire lorsqu'il est au port et à la connexion à l'alimentation électrique fournie au quai, éliminant ainsi pratiquement toutes les émissions d'un navire lorsqu'il est au port.

Puissance active (W) et puissance apparente (VA) :

Dans un système à tension alternative, la puissance active est la puissance qui permet aux appareils de fonctionner et qui est qualifiée de puissance utile. L'unité de la puissance active est le Watt (W).

En plus de la puissance active, la puissance apparente est définie pour un réseau électrique comme étant le produit de la tension (en volt) et du courant (en ampère), et ce, même si ces derniers ont des formes sinusoïdales différentes. La connaissance de cette puissance est nécessaire pour le dimensionnement d'un circuit d'alimentation. L'unité utilisée est le voltampère (VA).

Sous-station électrique :

Une sous-station régule la distribution d'énergie de manière à fournir une tension idéalement adaptée aux conditions d'exploitation d'un site donné. Installée à l'intérieur ou à l'extérieur, elle combine trois parties principales :

- L'équipement de protection électrique primaire
- Un transformateur électrique triphasé
- L'équipement de protection et de distribution électrique secondaire

Il existe deux types de sous-stations : les sous-stations primaires et les sous-stations secondaires. Les deux configurations sont définies par la tension de l'équipement, la puissance nominale du transformateur et le type d'équipement intégré dans l'ensemble. Le transformateur étant l'élément principal de l'installation, le choix de ce dernier est l'élément le plus important à considérer. Une fois le type de sous-station déterminé, il est beaucoup plus facile de choisir le transformateur approprié.¹

¹ Source : EATON Canada.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

APC	Administration portuaire canadienne
APM	Administration portuaire de Montréal
APQ	Administration portuaire de Québec
APTR	Administration portuaire de Trois-Rivières
BPA	British Ports Association
CA	Courant alternatif
CENAQ	Connexion électrique des navires à quai
eGRID	Emissions & generation Resource Integrated Database
EPA	Environmental Protection Agency
EVP	Équivalent vingt pieds
GES	Gaz à effet de serre (y compris les particules, les oxydes d'azote, l'ozone et les toxines atmosphériques)
GLOMEEP	Global Maritime Energy Efficiency Partnerships
GNL	Gaz naturel liquéfié
HT	Haute tension
HTCC	Haute tension courant continu
OMI	Organisation maritime internationale
OPS	Alimentation à quai (<i>Onshore Power Supply</i>)
SBC	Recharge des batteries à quai (<i>Shore-side Battery Charging</i>)
SIP	State Implementation Plans
SPEC	Calculateur d'émissions d'alimentation à quai (<i>Shore Power Emissions Calculator</i>)
STS	Du quai au navire (<i>Shore to Ship</i>)
UEE	Unités d'emmagasiner d'énergie
WPCAP	World Ports Climate Action Program

RÉGLEMENTATION

Les principales normes et réglementations auxquelles fait référence le rapport sont les suivantes :

- IEC/IEEE 80005-1 High Voltage SC 3.3, 6.6, 11.1 kV
- IEC/IEEE 80005-2 Data Exchange
- IEC/IEEE 80005-3 Low Voltage SC 400, 440, 690 V
- IEC 62613-1: 2019— Plugs, socket outlets and ship couplers for high-voltage shore connection (HVSC) systems—Part 1: General requirements
- IEC 62613-2: 2016—Plugs, socket outlets and ship couplers for high-voltage shore connection systems (HVSC-systems)—Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for accessories to be used by various types of ships
- IEC 60309-1—Plugs, socket outlets and couplers for industrial purposes—Part 1: General requirements
- IEC 60309-5 — Plugs, socket outlets and couplers for industrial purposes—Part 5 (LVSC)
- TP 127F (05/2018) — Normes d'électricité régissant les navires

L'Annexe A donne plus de détails sur les normes.

1 CONTEXTE

L'industrie du transport maritime mène depuis plusieurs années d'importants efforts afin de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Elle est habitée par un désir important de diminuer son empreinte écologique dans la conduite de ses opérations. Dans cette perspective, l'une des solutions envisagées est l'utilisation de systèmes d'électrification à quai permettant d'alimenter en électricité les navires lors de leurs escales. Les sources d'énergie alors utilisées via ces réseaux de distribution terrestres présentent de nets avantages au niveau environnemental comparativement aux génératrices normalement utilisées à bord des navires.

Rappelons que les réglementations mises de l'avant par l'OMI [3] pour les prochaines années imposent de réduire de façon significative les émissions de gaz à effet de serre (SOx, CO²) des navires. Pour atteindre les cibles de réduction d'émissions atmosphériques, l'industrie maritime doit adopter des mesures en conformité avec l'évolution des réglementations. Notons que pour chaque kWh d'énergie électrique produite par les génératrices à bord, un navire peut émettre jusqu'à environ 0,7 kg de gaz à effet de serre [38]. Pour un navire de type porte-conteneurs d'environ 8 500 EVP, cela peut se traduire par une consommation approximative de 12 tonnes de carburant par jour, soit une émission de plus de 37 tonnes de gaz à effet de serre sur une base journalière [4].

L'électricité au Québec est essentiellement d'origine hydroélectrique. Elle constitue une énergie de nature renouvelable, propre et abordable économiquement. Malgré ces avantages, peu d'initiatives ont émergé dans le secteur maritime québécois pour favoriser son utilisation. Le branchement électrique à quai des navires marchands apparaît cependant comme une voie prometteuse de réduction des gaz à effet de serre pour le domaine maritime.

L'objectif de la présente étude est de dresser l'état de la situation au Québec quant à l'électrification à quai. Elle vise aussi à identifier les technologies qui permettraient de favoriser l'implantation d'un tel service dans les terminaux (ports) du Québec.

Outre le présent chapitre, le rapport comporte six (6) sections. La première (chapitre 2) fait état des projets d'électrification des quais et des navires marchands au Québec et au Canada. La seconde (chapitre 3) présente les principales technologies adoptées ici comme ailleurs dans le monde pour l'électrification des quais et la connexion des navires. Le chapitre 4 met en évidence les facteurs importants à considérer pour favoriser l'électrification à quai. Sur la base de quelques cas pratiques, le chapitre 5 porte sur les coûts et bénéfices associés à l'électrification à quai. La section 6 dresse un portrait global touchant l'électrification des quais dans seize ports du monde. Enfin, le chapitre 7 porte sur les principaux constats découlant de la présente étude et les orientations à privilégier pour l'électrification des quais au Québec.

La présente étude a été réalisée d'une part sur la base d'une collecte d'informations auprès de quelques ports et armateurs du Québec et d'autre part en s'appuyant sur une recherche documentaire.

La collecte d'informations auprès des ports et armateurs a ciblé essentiellement les membres du regroupement MeRLIN. Elle a pris la forme d'un sondage et aussi d'échanges directs visant à obtenir des données relatives aux navires et aux systèmes électriques disponibles dans les ports.

La recherche documentaire a quant à elle permis d'identifier plusieurs cas d'électrification de terminaux (ports) à travers le monde. L'analyse de ces cas a permis de répertorier les différentes technologies et mettre en évidence les enjeux liés à l'électrification des quais. C'est, pour beaucoup, sur l'étude de ces cas pratiques qu'il a été possible de dégager les principaux constats et conclusions sur le sujet à l'étude.

2 SITUATION ACTUELLE DE L'ÉLECTRIFICATION DES QUAIS ET DES NAVIRES MARCHANDS

Cette section vise à présenter, de façon générale, l'état actuel de l'électrification à quai, notamment dans quelques ports du Québec. Elle met aussi en évidence les initiatives d'électrification dans trois ports canadiens, soit Halifax, Vancouver et Prince-Rupert.

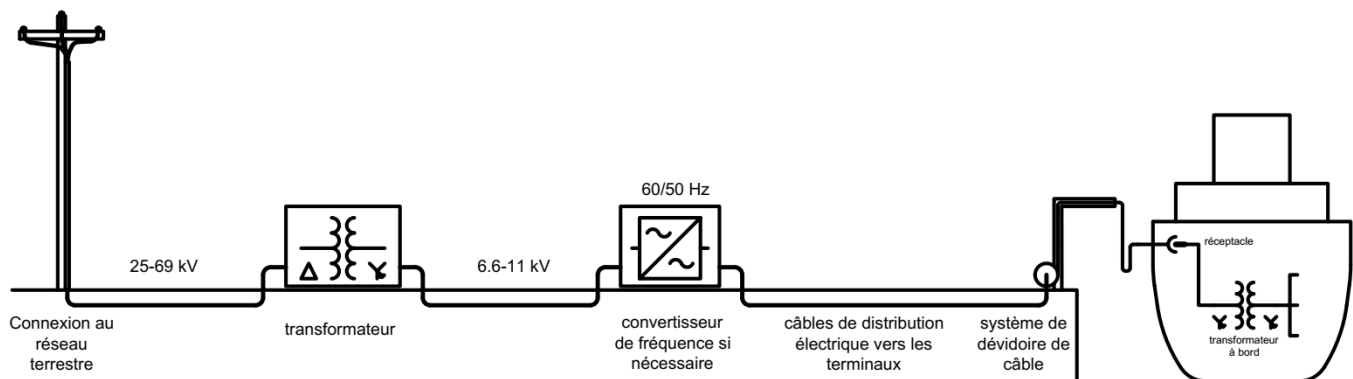
Avant de présenter chacun de ces cas, on présente sommairement le concept général d'alimentation à quai.

2.1 INTRODUCTION À L'ALIMENTATION À QUAÏ

Lorsqu'un navire accoste, il n'a plus besoin d'énergie pour se propulser. Cependant, il peut être un gros consommateur d'énergie lorsqu'il est à l'arrêt, car plusieurs des systèmes du navire sont toujours en fonctionnement : le système de ventilation, de chauffage, de refroidissement, plusieurs pompes auxiliaires, certains systèmes de contrôle et quelquefois, les systèmes de manutention de la cargaison. Par conséquent, des générateurs électriques doivent fonctionner pour l'alimentation de ces systèmes, nécessitant des puissances pouvant varier entre 170 kVA à 20 MVA selon le type de navire (voir Tableau 5 à la section 3). Cette énergie produite par la combustion de carburant entraîne inévitablement d'importantes émissions atmosphériques et sonores ayant des impacts sur les communautés locales et contribuant négativement au bilan environnemental du secteur maritime.

L'un des moyens les plus efficaces de réduire l'impact négatif sur l'environnement des navires amarrés dans les ports est de connecter les navires aux réseaux électriques terrestres (Figure 1). Cela permet d'arrêter les groupes électrogènes du navire et d'éliminer les émissions de gaz de combustion jusqu'à hauteur de 90 % [5] pendant le séjour du navire dans le port.

Figure 1
Configuration type en Amérique du Nord d'un réseau d'alimentation à quai



Source : Innovation maritime.

L'utilisation d'une connexion électrique de puissance entre le navire et le réseau terrestre (Shore to Ship; STS) offre non seulement des avantages écologiques, mais également des avantages économiques [6]. En effet, des économies importantes pouvant se situer entre 40 % à 70 % sur le coût d'alimentation en électricité peuvent généralement être observées selon les systèmes mis en place et la tarification à quai [17].

Plusieurs acteurs se sont déjà positionnés sur l'importance d'accentuer les efforts d'électrification à quai. En plus des administrations portuaires, certains élus municipaux et groupes de citoyens voient dans l'électrification des quais un moyen efficace pour réduire les GES émis entre autres par les navires de croisières dans les zones résidentielles près des ports. L'alimentation électrique à terre (Onshore Power Supply: OPS) est l'une des stratégies recommandées par plusieurs organisations locales et internationales pour réduire l'impact environnemental des navires marchands dans les ports [7].

Plusieurs éléments sont à considérer pour assurer un service d'électrification efficace et en phase avec les besoins des parties impliquées. Les facteurs suivants doivent être pris en compte [8] :

- L'alimentation à quai doit être générée d'une manière plus propre que l'alimentation à bord des navires.
- L'alimentation à quai doit fournir suffisamment d'énergie fiable et stable pour permettre aux navires d'alimenter l'ensemble des systèmes requis, incluant ou non les systèmes de manutention des marchandises.
- Le navire doit être au port assez longtemps pour qu'il soit intéressant de réaliser une connexion — cela peut prendre jusqu'à 45 minutes après l'amarrage et avant de partir pour réaliser le processus de connexion/déconnexion.
- Un nombre critique de navires faisant escale dans le port doit être équipé d'un système de connexion pour justifier l'implantation de ce service.
- La configuration du quai et les conditions de navigation (vents, espace de manœuvre (amarrage/appareillage) doivent être compatibles avec le service d'alimentation à quai et les équipements physiques qu'il suppose.
- Le coût de l'électricité par kWh et les coûts de branchement/débranchement doivent être suffisamment bas pour inciter les armateurs à se brancher.

La source terrestre d'alimentation à quai provient habituellement d'un réseau électrique national, mais il existe également une possibilité d'utiliser un ou des générateurs externes à ce réseau si les infrastructures disponibles sont insuffisantes pour dégager les puissances nécessaires. Ces générateurs peuvent être alimentés au diesel ou au GNL [9] et avoir un rendement supérieur à ceux des navires pour que

l'alimentation à quai soit envisagée. Des sources d'énergie renouvelable, telles que l'éolien ou le solaire, peuvent aussi être envisagées.

À condition que l'alimentation à quai soit générée par une énergie propre (hydroélectricité, biocarburant, éolienne ou solaire), elle peut éliminer complètement ou en bonne partie toutes les émissions atmosphériques associées au fonctionnement des moteurs diesel à bord. Si le courant n'est pas produit de façon propre, il faut alors évaluer le rendement des solutions mises de l'avant pour quantifier les gains écologiques de ces systèmes.

Un calculateur d'émissions d'alimentation à quai (Shore Power Emissions Calculator: SPEC)² [5] peut être un outil efficace pour évaluer les avantages environnementaux de l'alimentation à quai lorsqu'un navire est connecté :

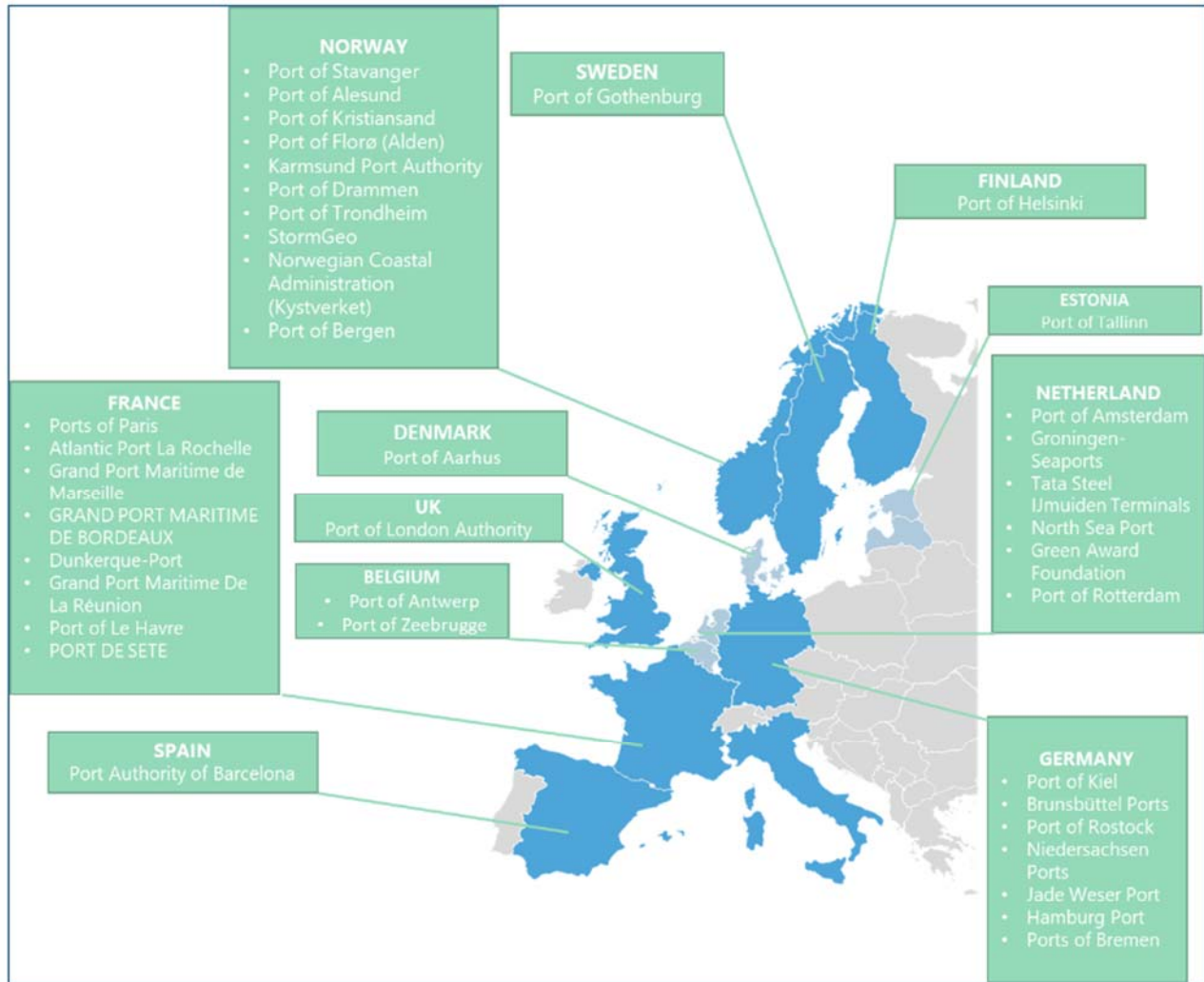
- Le SPEC sera utile aux États et aux autorités portuaires pour évaluer les avantages potentiels et déterminer si l'alimentation à quai serait un moyen approprié de réduire la pollution dans un port.
- Le SPEC quantifie les changements d'émissions lors de l'arrêt des moteurs des navires et de l'utilisation des systèmes d'alimentation à quai. L'outil utilise les entrées des navires et des activités ainsi que la compensation des émissions de l'utilisation de l'énergie électrique à partir de l'alimentation à terre pour déterminer les changements d'émissions pour la plupart des polluants. Pour analyser la puissance à terre, l'outil utilise les valeurs d'émission de la base de données intégrées sur les émissions et les ressources de production de l'EPA (eGRID). L'eGRID contient les caractéristiques environnementales de la production d'électricité pour presque toutes les régions des États-Unis.
- Le SPEC offre aux utilisateurs deux façons d'estimer les émissions. La première est un « modèle général » permettant aux utilisateurs disposant d'informations limitées sur le projet d'estimer les avantages de la réduction des émissions grâce à l'utilisation d'un ensemble de données et d'hypothèses par défaut. Le modèle général peut être mis à jour avec des informations plus récentes, si elles sont disponibles et appropriées. Deuxièmement, un « modèle d'entrée utilisateur » est fourni, qui peut générer des estimations plus précises grâce à des entrées définies par l'utilisateur pour la puissance auxiliaire du navire, le facteur de charge, les facteurs d'émission du moteur, et grâce à la sélection d'installations de production d'électricité spécifiques et de leur mélange d'émissions de réseau, si l'information est disponible pour les utilisateurs.

² Shore Power Emission Calculator: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-04/shore-power-ems-calc-2017-03.xlsx>

- Bien que le SPEC soit destiné à assurer la cohérence dans l'estimation des avantages de l'alimentation à quai, principalement à des fins de DERA³, le SPEC n'est pas approprié pour certaines analyses telles que celles effectuées à l'appui des plans de mise en œuvre des États.

L'électrification des quais est largement développée en Europe. On compte de nombreux ports qui offrent, depuis plusieurs années, ce service aux armateurs.

Figure 2
Identification des principaux ports offrant l'alimentation à quai en Europe⁴



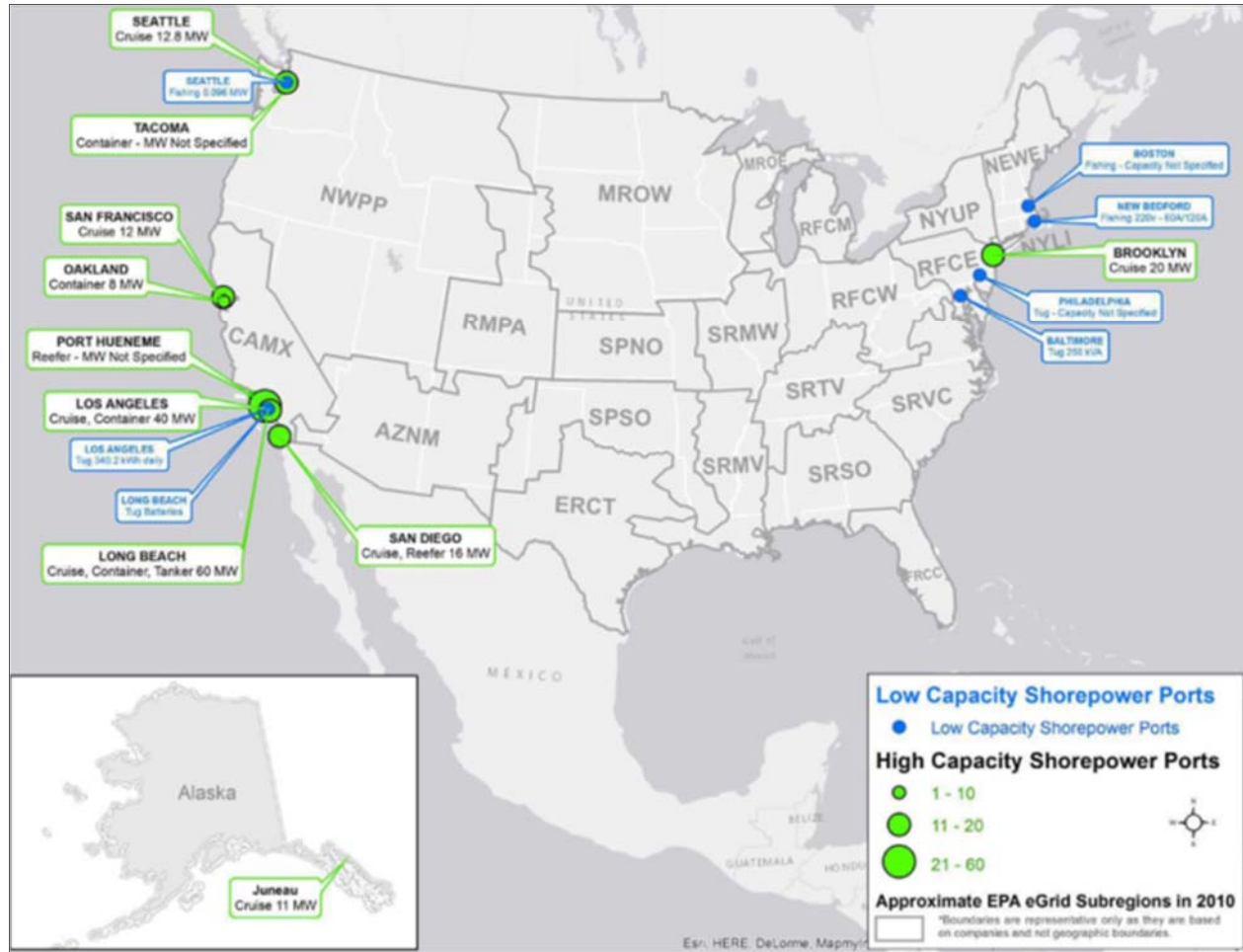
Source : Power Technology Research

³ DERA : Diesel Emissions Reduction Act.

⁴ Source: Power Technology Research, <https://powertechresearch.com/onshore-power-supply-in-europe-an-overview/>

En Amérique du Nord, la tendance à l'électrification des quais s'observe davantage sur la côte Ouest. Aux États-Unis, on comptait en 2017 une dizaine de ports du côté de l'océan Pacifique offrant ce service.

Figure 3
Carte des États-Unis et de la position des ports offrant l'alimentation à quai en 2017



Source : United States Environmental Protection Agency.

À Seattle (Washington), la capacité maximum du port est de 12,8 MW à des tensions de 6,6 et 11 kV pour les navires de croisières. Le système fut installé par Cochran Marine en 2005.

À Juneau (Alaska), les navires de croisières peuvent bénéficier de l'électrification à quai depuis 2001. La capacité est de 11,00 MW, à une fréquence de 60 Hz et une tension entre 6,6 et 11 kV. Les installations sont de Cochran Marine et ABB.

À San Diego (Californie), les navires de croisières et frigorifiques profitent du service depuis 2010. La capacité est de 16,00 MW, à une fréquence de 60 Hz et une tension entre 6,6 et 11 kV. Les installations sont également de Cochran Marine et ABB.

San Diego doublera sa capacité d'alimentation à quai pour améliorer la qualité de l'air et réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'objectif du port est d'achever l'extension de l'alimentation à quai d'ici septembre 2022, quatre mois avant la récente mise à jour de la réglementation du California Air Resources Board (CARB) qui oblige tous les navires de croisières faisant escale dans les ports californiens à utiliser l'alimentation à quai à partir du 1^{er} janvier 2023.⁵

À Miami (Floride), l'alimentation à quai est prévue pour 2023.

On observe, au niveau mondial, que quelques grands fournisseurs de technologies occupent le marché. Les principaux sont (plus de détails à l'Annexe D) :

- Siemens (Allemagne)
- Schneider Electric (France)
- Cavotec (Suisse)
- Wärtsilä (Finlande)
- Danfoss (Danemark)
- ABB (Hitachi) (Suisse)
- ESL Power Systems (États-Unis)
- Cochran Marine (maintenant Watts Marine) (États-Unis)
- IGUS (Allemagne)
- Technologie Blueday (Norvège)

Si les technologies offertes sur le marché sont matures, il faut constater que la majorité des installations électriques sont dédiées aux terminaux de croisières, de porte-conteneurs ou pour la traverse de passagers, et sont alimentées en haute tension. Encore beaucoup reste à faire pour les terminaux de vracs et les cargos généraux.

2.2 SITUATION DANS QUELQUES PORTS DU QUÉBEC ET DU CANADA

Il apparaît que seule le Grand quai (anciennement jetée Alexandra) du terminal de croisières du port de Montréal répond aux critères de la définition d'une connexion à quai et au standard de la IEC/IEEE 80005-1 parmi les ports au Québec. Cette connexion à quai est pour l'instant exclusivement utilisée par des navires de croisières étrangers. Par ailleurs, aucun navire des armateurs domestiques sollicités dans le cadre de

⁵ <https://ww2.arb.ca.gov/news/california-approves-updated-berth-regulation-expanding-efforts-cut-pollution-ships-california>.

l'étude ne possède à bord les équipements de connexion à quai au sens des standards IEC/IEEE 80005-1 ou IEC/IEEE 80005-3.

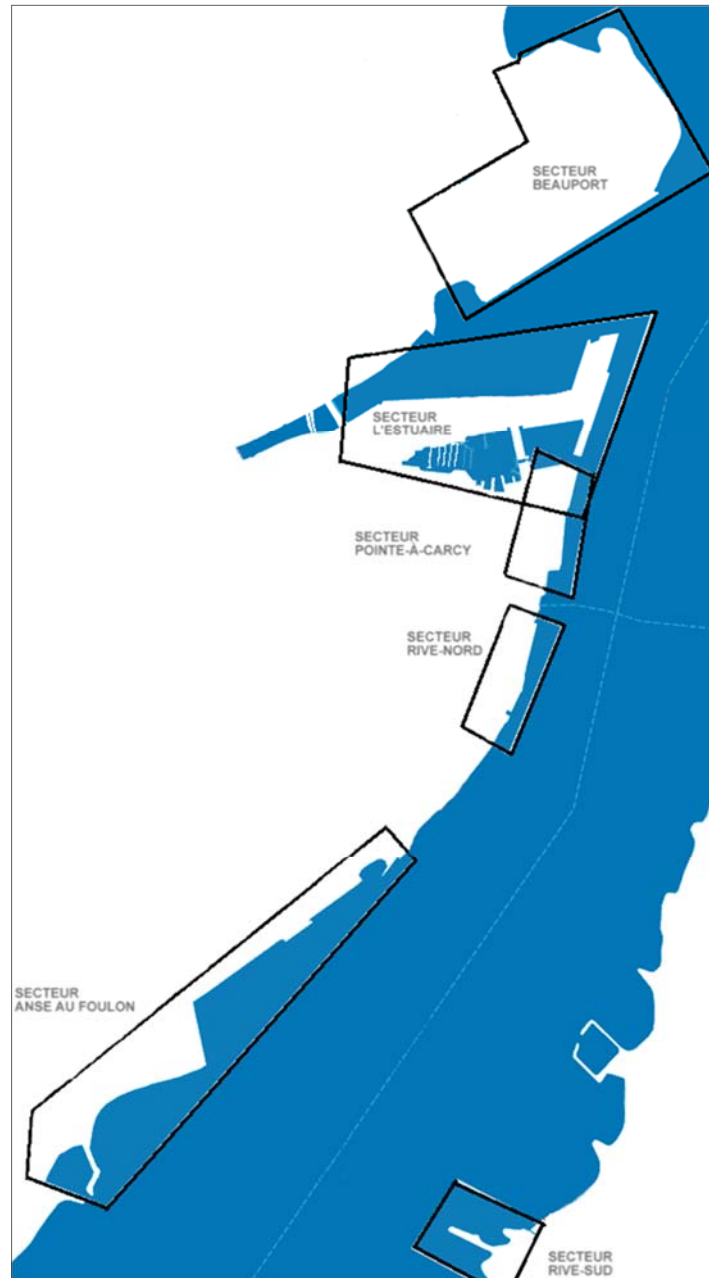
Notons que de nombreuses connexions directes sont disponibles dans plusieurs ports et sont utilisées par des navires domestiques pour l'hivernation ou autre arrêt prolongé, mais pas pour les opérations courantes. À la différence des réelles connexions à quai, les connexions directes sont de plus faible puissance et occasionnent une coupure d'alimentation lors du transfert de la charge du navire de l'alimentation à bord vers l'alimentation terrestre.

2.2.1 PORT DE QUÉBEC

Le port de Québec est le plus vieux port au Canada et le dernier port en eau profonde (15 m) du Saint-Laurent. Ces secteurs d'activités sont principalement la manutention du vrac solide et liquide ainsi que l'accueil de croisiéristes.

Le port de Québec est composé de six secteurs répartis presque exclusivement sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent (Figure 4).

Figure 4
Zones portuaires de Québec



Sources : Port de Québec, Innovation maritime.

Secteur Beauport

Le secteur de Beauport est une plaque tournante stratégique de vrac solide et liquide. Desservi par un accès direct aux réseaux routier et ferroviaire, ce secteur est le dernier en eau profonde du Saint-Laurent avant les Grands Lacs, avec 15 mètres de profondeur à marée basse. Les numéros de quais de ce secteur sont 50 à 53. Il n'y a aucune connexion électrique directe disponible dans ce secteur.

Secteur l'Estuaire

Le secteur l'Estuaire est composé entre autres du bassin Louise et de la marina. Il est à mi-chemin entre le secteur touristique et industriel. Les numéros de quais de ce secteur sont 4, 5, 14, 17 à 20, 24 à 31 ainsi que 46 et 47. Huit connexions électriques directes sont disponibles dans ce secteur.

Secteur Pointe-à-Carcy

Le secteur Pointe-à-Carcy est la porte d'entrée de la vieille ville pour les croisiéristes. Les numéros de quais de ce secteur sont 12, 19 et 22.

Aucune connexion électrique directe n'est disponible dans ce secteur, à l'exception du quai 19 partagé avec le secteur l'Estuaire.

Secteur Rive-Nord

Le secteur Rive-Nord est le plus vieux port au Canada. La Garde côtière canadienne y a implanté à Québec sa base pour la navigation sur le Saint-Laurent et vers l'Arctique. Les numéros de quais de ce secteur sont 93 à 98. Aucune connexion électrique directe n'est disponible dans ce secteur.

Secteur Anse au Foulon

Le secteur Anse au Foulon joue un rôle important dans la manutention du vrac. Les numéros de quais de ce secteur sont 101 à 108. Cinq connexions électriques directes sont disponibles dans ce secteur.

Secteur Rive-Sud

Le secteur Rive-Sud est principalement le point d'amarrage des pétroliers pour la raffinerie Valero. Les numéros de quais de ce secteur sont 86 et 87. Aucune connexion électrique directe n'est disponible dans ce secteur.

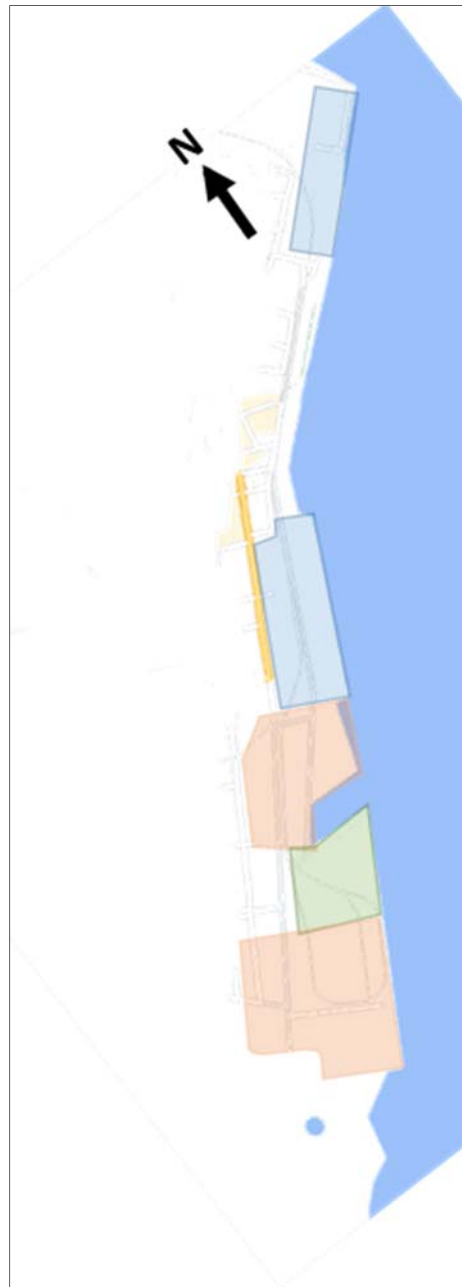
Soulignons que le port de Québec a examiné en 2015 de façon attentive l'opportunité d'installer un système d'électrification à quai pour les navires de croisières. Le port avait estimé qu'un investissement de l'ordre de 13 M\$ serait requis pour l'électrification d'un seul terminal. Pour diverses raisons, et notamment celle liée au faible nombre de navires de croisières équipés d'un système d'alimentation à quai s'arrêtant au port de Québec, le projet n'a pas été réalisé. L'étude réalisée par le port estimait que les navires de croisières auraient pu se brancher moins de 1 % du temps [36].

2.2.2 PORT DE TROIS-RIVIÈRES

Le port de Trois-Rivières a principalement pour secteur d'activité la manutention de vrac solide et liquide. Il mise sur la combinaison des réseaux ferroviaire et routier pour ses activités commerciales. Une portion du port a une vocation publique et il peut accueillir des navires de croisières.

Le port de Trois-Rivières se divise principalement en quatre terminaux [10].

Figure 5
Zones portuaires de Trois-Rivières



Sources : Port de Trois-Rivières, Innovation maritime.

Terminal de marchandises générales (zones en bleu)

Le terminal de marchandises générales est divisé en deux zones séparées par le parc portuaire et les bureaux de l'APTR. Le terminal de marchandises générales dispose d'une superficie totale de 55 000 m², de 4 postes à quai, de 3 hangars totalisant 17 900 m² et d'accès au réseau ferroviaire.

Terminal des élévateurs (zone en vert)

Le terminal des élévateurs dispose d'une capacité de 11 000 tonnes métriques de marchandises, de 2 postes à quai, de 2 tours marines de déchargement pouvant accueillir des navires océaniques et d'accès au réseau ferroviaire.

Terminal de vrac solide et liquide (zones en orange)

Le terminal de vrac solide et liquide est lui aussi divisé en deux zones entourant le terminal des élévateurs. Ce terminal dispose d'une superficie totale de 90 000 m², de 4 postes à quai, de 8 hangars pour le vrac solide pour une superficie de 28 000 m², de réservoirs pouvant recevoir 250 000 m³ de vrac liquide, de 2 grues portuaires mobiles, d'un réseau de pipelines et d'accès au réseau ferroviaire.

Parc portuaire

La section de quai du Parc portuaire est située entre la section du terminal de marchandises générales et les bureaux administratifs. Cette section accueille occasionnellement des navires de croisières.

Le port de Trois-Rivières ne dispose pas des équipements d'alimentation à quai selon les critères de la norme IEC/IEEE 80005-1 haute tension ou IEC/IEEE 80005-3 basse tension. Toutefois, le port dispose de trois stations de connexion directe à 600 V.

Soulignons que le port de Trois-Rivières a annoncé publiquement en 2021 des investissements majeurs pour l'ajout d'un nouveau terminal. Le projet, nommé Terminal 21, ne prévoit pas pour le moment l'installation d'une station de raccordement électrique pour les navires puisque les spécifications pour la connexion des navires sont variables. La réflexion se poursuit sur le sujet.

2.2.3 PORT DE MONTRÉAL⁶

Le port de Montréal est l'un des ports intérieurs les plus importants en Amérique du Nord pour la manutention des conteneurs et de la marchandise générale. Il accueille également des navires de croisières et est le seul au Québec à leur offrir l'électrification à quai (au terminal des croisières). Il se spécialise dans

⁶ Source partielle Port de Montréal.

les activités de manutention de produits pétroliers, de conteneurs, de vrac solide ainsi que l'accueil de croisiéristes.

Le port de Montréal possède 3 élévateurs à grain.

Les installations d'accostage du port de Montréal sont :

- Le quai Mackay : 6 points d'accostage. Il dispose d'un point de connexion électrique directe.
- La jetée Bickerdike (conteneurs, marchandises non conteneurisées et surdimensionnées) : 9 points d'accostage.
- Grand Quai : Terminaux de croisières 1, 2 et 3 et 18 points d'accostage. Il offre un point d'électrification à quai pour des tensions de 6,6 et 11 kV et trois points de connexion électrique directe.
- La jetée Laurier : 1 point d'accostage.
- La jetée Tarte : 1 point d'accostage.
- La jetée Sutherland :
 - Terminal Viau (conteneurs) : 7 points d'accostage
 - Terminal Racine (conteneurs) : 14 points d'accostage
 - Terminal Maisonneuve (conteneurs) : 5 points d'accostage
 - Terminal Cast (conteneurs) : 8 points d'accostage
 - Terminaux canadiens Vopak (produits pétroliers) : 2 points d'accostage
 - Terminal Montréal-Est Suncor (produits pétroliers) : 5 points d'accostage
 - Logistec Arrimage (marchandises non conteneurisées et surdimensionnées) : 3 points d'accostage
 - CIAM MIFFC : 1 point d'accostage
 - Énergie Valero Inc. (produits pétroliers) : 6 points d'accostage
 - Produits Shell Canada (produits pétroliers) : 2 points d'accostage

Le port de Montréal dispose aussi d'un terminal de vrac solide à Contrecœur. Des travaux visant la construction d'un nouveau terminal de conteneurs sont en cours. Il est prévu qu'un système d'alimentation à quai soit installé pour permettre aux navires de se brancher au réseau électrique local pour combler leurs besoins énergétiques. Il est estimé qu'en début d'opération, 25 % des navires porte-conteneurs qui accosteront au quai de Contrecœur auront un système leur permettant de se brancher sur le système d'alimentation électrique au quai [37].

L'alimentation électrique au Grand Quai, pour les navires de croisières, est disponible depuis 2017. Elle a requis des investissements de l'ordre de 11 M\$. L'utilisation du service a été relativement limitée. Un seul

navire de croisières entre 2017 et 2019 a profité du service d'alimentation à quai durant ses différentes escales au Québec (Tableau 1). Sur trois ans, les gains relatifs aux GES ont été estimés à 279 tonnes.

Tableau 1
Utilisation de l'alimentation à quai au port de Montréal pour les navires de croisières

Année	Nombre de branchements	Émissions de GES évitées (tonnes)
2017	5	120
2018	4	104
2019	2	55

Source : Port de Montréal.⁷

2.2.4 AUTRES PORTS DU QUÉBEC

Les observations faites dans les autres ports du Québec indiquent que les technologies d'alimentation à quai ne sont pas présentes, à l'exception du port de Matane. Bien que certains ports offrent le service de connexion électrique directe pour l'hivernation des navires, une recherche parmi les principaux ports du Québec n'a pas permis d'identifier la présence d'installations de connexion basse ou haute tension parmi les ports suivants : Sept-Îles, Port-Cartier, Baie-Comeau, Saguenay, Rimouski, Bécancour, Sorel, Gaspé et Port-Daniel.

Le cas de Matane est particulier. L'offre d'alimentation à quai y a été développée en 2015 en même temps que la venue du navire *F.-A. Gauthier* (appartenant à la Société des Transports du Québec (STQ)), un traversier assurant la liaison entre Matane–Baie-Comeau/Godbout et qui dispose à bord des équipements pour la connexion à quai. Le système mis en place est dit « sur mesure », car il est différent de la norme IEEE-80005-3 pour les systèmes à basse tension. Il est commun que de telles installations soient rendues disponibles pour les besoins spécifiques d'un traversier.

De fait, le *F.-A. Gauthier* possède un système d'alimentation à quai lui permettant d'éteindre ses moteurs à chaque fin de journée au port de Matane. Les installations à bord conçues par la compagnie IMESA Electrical Engineering comprennent un panneau de connexion et de commande composé de 9 réceptacles (3 par phase), un réceptacle de commande, d'un ensemble disjoncteur/sectionneur et d'un panneau de commande avec indicateurs d'état. Le système est alimenté à 600 V d'une puissance maximum de 1,66 MVA et sert pour beaucoup à couvrir les besoins énergétiques pour les espaces de vie à bord du navire.

⁷ Repris par La Presse : « Système d'alimentation électrique : un seul navire s'est branché aux installations », par Jean-Thomas Léveillé, publié le 25 janvier 2020.

La manutention des câbles de 1 600 A provenant du quai est effectuée par un monte-charge spécialement conçu à cet effet. Le système complet a été conçu sur mesure pour les opérations d'alimentation à quai du traversier.

Figure 6
Panneau de connexion et de commande et détail de la fiche d'un câble



Source : Innovation maritime.

Soulignons que le cas de Matane n'est pas unique au Québec. Le *Peter Fraser*, aussi propriété de la STQ, dispose d'une propulsion hybride (diesel-électrique). Il opère à l'île Verte dans le Bas-Saint-Laurent. Le navire a été construit en 2013 au Chantier naval Forillon (Gaspé). La conception électrique a été réalisée par Techsol Marine.

2.2.5 PORT D'HALIFAX

En 2014, Cochran Marine (maintenant Watts Marine) a terminé la conception et l'installation d'un système d'alimentation à quai pour l'administration portuaire d'Halifax. Le système dessert jusqu'à 20 MW à 6,6 et 11 kV à 60 Hz les navires de croisières entrant aux quais 20, 21 et 22. Ce système d'alimentation à quai est équipé du même système d'automatisation et du même dispositif de positionnement des câbles utilisés dans d'autres installations de Cochran Marine.

Le nombre de branchements à quai se situe entre 20 à 25 par année.

2.2.6 PORT DE VANCOUVER

En 2009, avec un système de Cochran Marine de 20 MVA à 6,6 kV et 11 kV à 60 Hz, le terminal de croisières situé à la Place du Canada est devenu le premier terminal au Canada et le troisième au monde à proposer des installations d'alimentation à quai pour les navires de croisières avec deux points de

raccordement. En 2013, un point de raccordement supplémentaire de 20 MVA à 6,6 kV et 11 kV a été installé dans le but d'améliorer l'accessibilité au branchement.

Depuis mai 2018, l'alimentation à quai à 6,6 kV à 60 Hz est disponible pour les porte-conteneurs au terminal Centerm, et depuis novembre 2019 à Deltaport, le plus grand terminal de conteneurs du Canada. L'administration portuaire a installé l'alimentation à quai avec le soutien de Transports Canada et de BC Hydro, et en collaboration avec les exploitants respectifs de terminaux à conteneurs Global Container Terminals et DP World Vancouver.

L'autorité portuaire envisagerait d'étendre les installations d'alimentation à quai à des postes d'amarrage supplémentaires, mais doit encore étudier la question. Des études plus approfondies doivent être réalisées afin de déterminer l'intérêt des armateurs à installer des systèmes d'électrification à quai sur leurs navires, valider les options possibles de distribution d'électricité en fonction de l'état du réseau actuel et de ses améliorations potentielles et identifier les sources d'aide gouvernementales disponibles.

2.2.7 PORT DE PRINCE RUPERT

Le projet de terminal Fairview de 3,6 M\$ de l'Administration portuaire de Prince Rupert qui doit entrer en service en 2022 doit fournir une capacité d'alimentation à quai de 7,5 MVA de 6,6 kV à 60 Hz dédiée à des terminaux de porte-conteneurs.

Une fosse de connecteurs de quai Cavotec et un système de gestion des câbles sont utilisés pour acheminer l'alimentation électrique directement aux navires. BC Hydro fournit l'électricité par une ligne de distribution existante de 69 kV.

Le projet doit éventuellement réduire les émissions locales de gaz à effet de serre jusqu'à 4 000 tonnes et les principaux contaminants atmosphériques de 160 tonnes par an lorsque le terminal fonctionnera au maximum de sa capacité.

Selon les informations disponibles, le projet pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre de plus de 1 000 tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par navire et par an, sur la base d'un navire accostant par semaine. À deux escales de navires par semaine, l'alimentation à quai réduira également la consommation de carburant des navires de 650 tonnes par an.

Transports Canada verse 1,8 M\$ pour le projet dans le cadre de son *Programme d'alimentation à quai pour les ports*, en plus de 700 000 \$ de Diversification de l'économie de l'Ouest Canada, de 200 000 \$ du gouvernement de la Colombie-Britannique et de 900 000 \$ combinés de l'administration portuaire, des Chemins de fer nationaux du Canada et de Maher Terminals, l'opérateur du terminal à conteneurs.

Le terminal à conteneurs de Prince Rupert, ouvert depuis 2007, est le premier terminal à conteneurs intermodal (navire-rail) dédié en Amérique du Nord, avec une capacité de manutention de 500 000 EVP par an.

2.3 ARMATEURS OPÉRANT SUR LE SAINT-LAURENT

2.3.1 PRINCIPAUX ARMATEURS CANADIENS

Un sondage a été réalisé auprès de quelques grands armateurs canadiens naviguant sur le Saint-Laurent afin d'identifier les besoins en électrification à quai de leurs navires. Au total, un échantillon de vingt-trois navires a pu être caractérisé afin d'identifier les principaux profils de consommation électrique.

La fréquence

Au niveau de la fréquence, la majorité des navires (70 %) possède un réseau de distribution électrique à 60 Hz contre 30 % à 50 Hz.

Tableau 2
Fréquence d'alimentation des réseaux électriques

Fréquence (Hz)	Répartition
50	30%
60	70%
Total :	100%

Source : Innovation maritime.

Cette répartition tout de même importante de navires à 50 Hz impliquera l'installation de variateurs de fréquence à bord des navires ou, dans certains cas, intégrés aux systèmes d'électrification des quais puisque les réseaux de distribution électrique en Amérique du Nord sont à 60 Hz.

Tension du réseau électrique

En ce qui concerne les tensions d'alimentation du réseau électrique, tous les navires analysés possèdent un réseau d'alimentation basse tension. Puisque plusieurs standards existent pour ce niveau de tension, une gamme importante de tensions d'alimentation s'y retrouve.

Tableau 3
Tensions d'alimentation

Tension (volt)	Répartition
380	4%
400	22%
440	52%
450	13%
575	4%
600	4%
Total :	100%

Source : Innovation maritime.

Cette grande variété de tensions d'alimentation peut entraîner des difficultés dans une approche où une standardisation du type de connexion à quai serait envisagée. En effet, dans le cas où des terminaux sont partagés entre plusieurs navires alimentés à des tensions différentes, il devient plus difficile de disponibiliser chaque type de tension nécessaire au besoin de chacun d'eux.

Puissance requise

Lors de l'étude, les puissances maximales requises lors des opérations de déchargement à quai ont été répertoriées pour chacun des navires. Le Tableau 4 présente ces résultats par catégorie de puissance demandée.

Tableau 4
Puissance maximale nécessaire à quai

Puissance maximale (kW)	Répartition
< 700	26%
700, 850	17%
> 850	53%
Inconnue	4%
Total :	100%

Source : Innovation maritime.

L'analyse démontre que plus de 53 % des navires nécessitent une connexion électrique supérieure à 850 kW. Une connexion haute tension serait à privilégier pour ces navires. Les configurations de circuit idéales pour ces demandes de puissance seront présentées à la prochaine section.

2.3.2 FLOTTE ÉTRANGÈRE OPÉRANT RÉGULIÈREMENT SUR LE SAINT-LAURENT

Une analyse des données INNAV a permis de dénombrer les escales de navires de croisières dans les ports de Montréal et de Québec pour l'année 2018. Celles-ci ont été de 66 et 133, respectivement pour Montréal et Québec. L'examen des fiches techniques des navires ayant fait escale dans les deux ports révèle qu'un peu plus du quart des escales (29 % pour Québec et 26 % pour Montréal) ont été faites par des navires dotés des équipements nécessaires pour l'alimentation à quai.

On remarque que les compagnies opérant dans le domaine des croisières sont généralement plus ouvertes à noter dans les fiches techniques de leurs navires les informations relatives à l'alimentation à quai. Pour les autres types de navires, l'information est peu ou pas disponible. Dans ce contexte, il n'a pas été possible d'évaluer la part relative des navires porte-conteneurs, des vraquiers ou des navires-citernes étrangers opérant sur le Saint-Laurent disposant des équipements d'alimentation à quai.

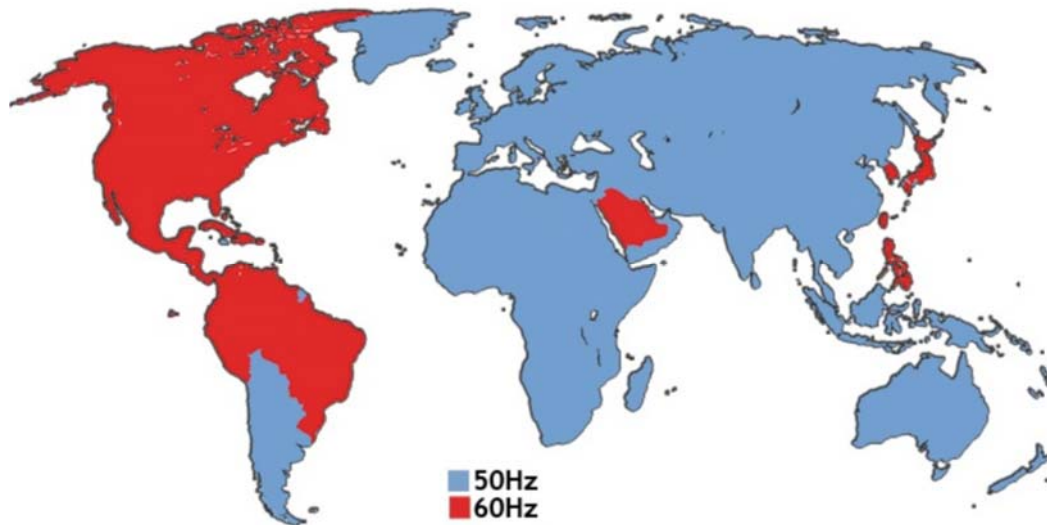
3 PRINCIPALES TECHNOLOGIES ET CONFIGURATIONS ÉLECTRIQUES POUR L'ÉLECTRIFICATION À QUAI

Dans ce chapitre, on présente, sur le plan technique, les principales technologies utilisées pour l'électrification des quais. Les options technologiques de raccordement à quai sont aussi présentées. Les approches privilégiées au Québec et au Canada sont détaillées à la fin du chapitre.

3.1 SITUATION EN ÉLECTRIFICATION DANS LE MONDE

Avant tout, il est important de préciser que deux fréquences standards d'alimentation électrique existent dans le monde : le 50 Hz et le 60 Hz. Une grande partie de l'Amérique, quelques pays de l'Asie du Pacifique et de l'Arabie Saoudite sont alimentés en 60 Hz, tandis que le reste du monde utilise un réseau à 50 Hz. La Figure 7 illustre cette répartition.

Figure 7
Fréquence et tension nominales par pays



Source : Becker Marine Systems.

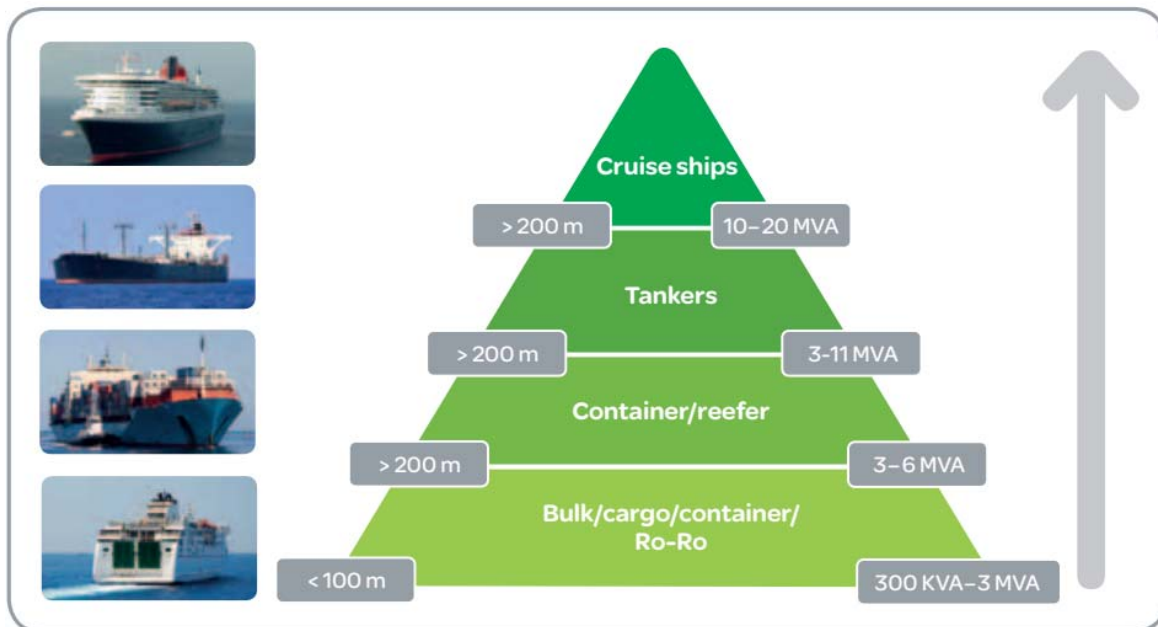
La société multinationale Schneider Electric, qui s'est consacrée à la recherche et la promotion des équipements de puissance à terre pendant des années, précise qu'actuellement 70 % des navires utilisent un réseau de distribution électrique interne de 60 Hz, alors qu'environ 30 % des ports sont alimentés à 60 Hz [11]. La distribution, par type de navire, est présentée au Tableau 5 en plus des puissances électriques exigées par catégorie de navire.

Tableau 5
Puissances et fréquences électriques requises par type de navire dans le monde [12] [13]

Type de navire	Demande de puissance moyenne (MW)	Demande de puissance pointe (MW)	Demande de puissance pointe pour 95% des navires (MW)	50 Hz	60 Hz
Porte-conteneurs (<140 m)	0.17	1	0.8	63%	37%
Porte-conteneurs (>140 m)	1.2	8	5	6%	94%
Ensemble des porte-conteneurs	0.8	8	4	26%	74%
Citernes	1.4	2.7	2.5	20%	80%
Croisières (<200m)	4.1	7.8	6.7	36%	64%
Croisières (>200m)	7.5	11	9.5	-	100%
Croisières (>300m)	10	20	12.5	-	100%
Ensemble des navires de croisières				17%	83%
Vraquiers	0.3	2.1	1.5	30%	70%

Sources : ABB, Innovation maritime.

Figure 8
L'alimentation électrique doit être adaptée aux types de navires à quai



Source : Schneider Electric.

Puisque plusieurs ports internationaux déjà électrifiés utilisent un réseau initial à 50 Hz, un convertisseur électronique de fréquence peut alors transformer la tension d'alimentation de 50 Hz à 60 Hz pour répondre aux besoins de la majorité des demandes des grands navires. Il est cependant important de mentionner que l'ajout de ce convertisseur de fréquence augmente considérablement les coûts des infrastructures portuaires nécessaires pour un système d'électrification à quai. La configuration est illustrée à la Figure 9.

Pour l'Amérique du Nord, puisque les réseaux de distribution sont alimentés à 60 Hz, l'ajout d'un convertisseur n'est pas requis dans la plupart des installations.

Cependant, comme démontré à la section précédente, certains navires opérant sur le Saint-Laurent possèdent un réseau de distribution à 50 Hz. Différentes configurations d'équipements sont alors possibles si un port canadien souhaitait disponibiliser des connexions à 50 Hz. Le détail de ces configurations sont présentés plus loin dans cette section.

Applicabilité [15]

L'alimentation à quai peut être installée pour tous les types de navires, peu importe leur âge. Elle doit cependant être adaptée au niveau de tension entre le réseau terrestre et celui du navire par un transformateur et un convertisseur de fréquence au besoin.

En fait, l'utilisation d'une alimentation électrique terrestre pour des plus petits navires lorsqu'ils sont à quai n'est pas un phénomène nouveau. L'alimentation à quai a été largement utilisée pendant de nombreuses années pour tous les navires ayant des besoins de puissance modérés, soit généralement moins de 50 à 100 kW. Ces navires sont capables d'utiliser la tension et la fréquence normales d'un réseau de distribution électrique et de remplacer l'énergie des générateurs par l'alimentation à quai avec des investissements relativement modestes.

Pour les plus gros navires avec des besoins en puissance plus élevés (entre 100 kVA à 20 MVA), des installations dédiées et plus complexes sont nécessaires, tant à terre qu'à bord des navires. Le Tableau 6 illustre les spécifications des systèmes typiques pour les différentes exigences d'alimentation. Cela peut supposer la mise à niveau de la capacité du réseau de distribution et l'utilisation de convertisseurs de fréquence et de connecteurs complexes à haute puissance.

Il est à noter que l'alimentation à quai est considérée comme une technologie mature qui est régulièrement utilisée dans certaines applications depuis les années 1980.

Tableau 6
Spécifications des systèmes typiques pour les différentes exigences d'alimentation

Capacité en puissance	Spécification typique
< 100 kW	230/400/440 V – 50/60 Hz ①
100 – 500 kW	400/440/690 V – 50/60 Hz ②
500 – 1000 kW	690 V/6.6/11 kV – 50/60 Hz ③
> 1 MW	6.6/11 kV – 50/60 Hz ④

Source : GLOMEEP.

Tableau 7
Configuration système requise pour différents types et tailles de navires*

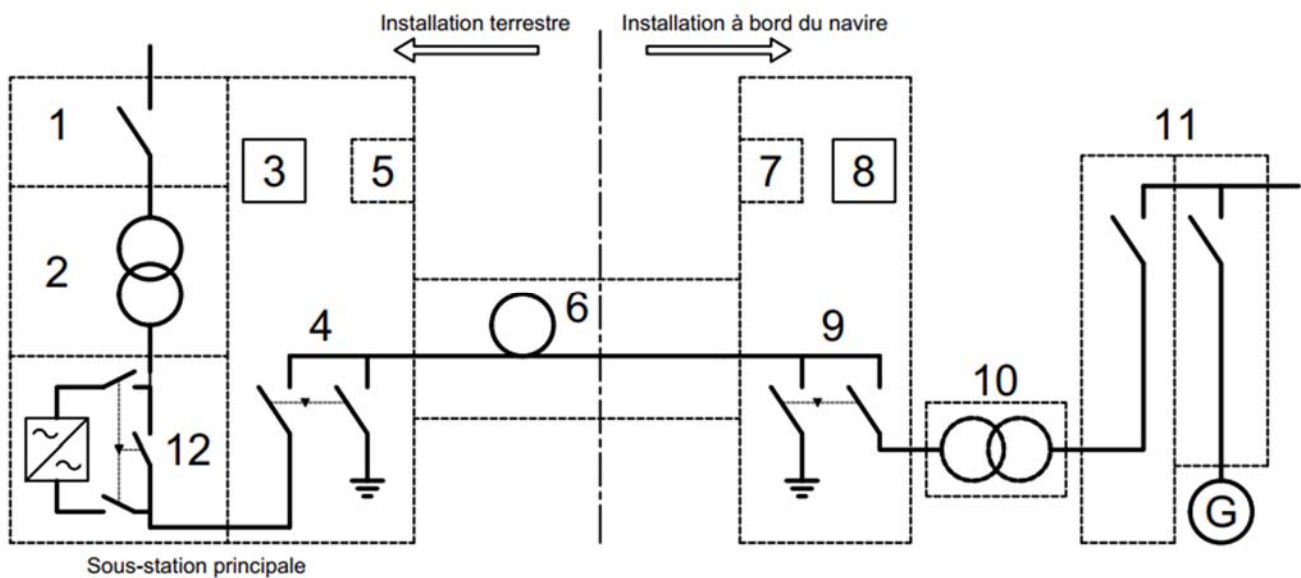
Types de navires	≤ 999 JB**	1000 – 4999 JB	5000 – 9999 JB	10000 – 24999 JB	25000 – 49999 JB	50000 – 99999 JB	≥ 100000 JB
Pétroliers	①	②	③	③	③	④	④
Citernes de produits chimiques/produits liquides	②	②	③	④	④		
Gaziers	②	②	④	④	④	④	④
Vraquiers	①	②	②	②	②	③	
Cargos généraux	①	②	②	②	③		
Porte-conteneurs		②	②	③	④	④	④
Rouliers	①	②	②	③	③	④	

* Les chiffres (1 à 4) renvoient aux spécifications des systèmes présentés au Tableau 6.

**JB : jauge brute (gross tonnage GT)

Source : GLOMEEP.

Figure 9
Éléments d'un système d'alimentation à quai



Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

Côté terre, le système d'alimentation à quai de haute puissance se compose des éléments suivants :

- Réseau de distribution d'un fournisseur d'électricité à haute tension. Au Québec, ce réseau est généralement à 25 000 V (1).
- Un transformateur de tension permet d'abaisser la tension du réseau de distribution à la tension disponible dans les installations portuaires (2).
- Convertisseur(s)/transformateur(s) de fréquence (si requis) (12).
- Relais de protection côté terrestre (3).

- Disjoncteur et interrupteur de mise à la terre côté terrestre (4).
- Panneaux de contrôle (5).
- Enrouleur de câble et connecteurs permettant une connexion rapide du navire lors des manœuvres d'accostage (6).

La solution d'alimentation du réseau et les convertisseurs de fréquence représentent généralement les éléments les plus coûteux du côté quai. En fonction de la disponibilité de l'alimentation du réseau et des besoins en énergie, le coût d'installation de l'alimentation à quai pour la partie terrestre (quai) variera considérablement.

Du côté du navire, les éléments suivants devront être installés :

- Connecteurs et enrouleur de câble (principalement pour les porte-conteneurs) (6).
- Relais de protection à bord (8).
- Panneau de contrôle à bord (7).
- Disjoncteur et panneau de distribution d'alimentation à quai (9).
- Transformateur à bord. Il est possible qu'un autre transformateur de tension soit nécessaire à bord afin de convertir la tension d'alimentation à la tension de distribution sur le navire (10).
- Système de distribution d'énergie (11).
- Convertisseur de fréquence (en option pour une plus grande flexibilité) (non illustré).

3.2 PRINCIPALES TECHNOLOGIES DISPONIBLES À QUAI

Plusieurs configurations sont possibles à terre afin d'alimenter les navires à quai. On décrit dans les prochaines pages les configurations les plus communes, soit :

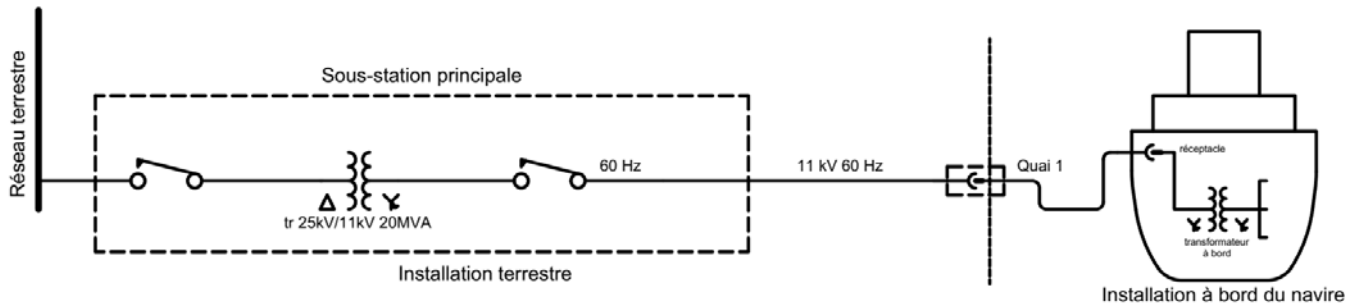
- Topologie du système CENAQ – haute tension une fréquence.
- Topologie du système CENAQ – haute tension deux fréquences avec un convertisseur.
- Topologie du système CENAQ – haute tension deux fréquences à plusieurs convertisseurs.
- Topologie du système CENAQ – haute tension courant continu.

3.2.1 TOPOLOGIE DU SYSTÈME CENAQ – HAUTE TENSION UNE FRÉQUENCE

La Figure 10 montre la topologie d'installation la plus simple d'un système d'alimentation d'un quai à haute tension à une fréquence de 60 Hz pouvant être déployé en Amérique du Nord.

Figure 10

Installation haute tension à 60 Hz typique grande puissance pour navire de croisières à 11 kV



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

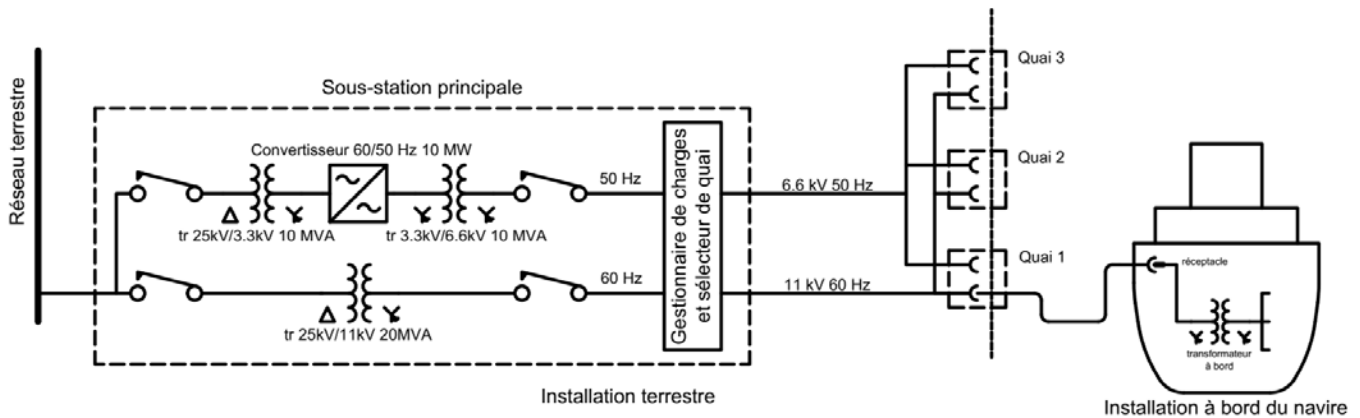
Les éléments essentiels de ce système d'alimentation des quais peuvent être situés dans un hangar ou sur le terminal à une distance inférieure à 500 m du quai. Ce système à 60 Hz alimenté par le réseau électrique typiquement à 25 kV se compose d'un sectionneur d'entrée et circuits de protection, un transformateur pour abaisser la tension à 11 ou 6,6 kV selon la tension du navire et un sectionneur de sortie ainsi que les circuits de protection avant de cheminer en direction des quais. Cette topologie peut être de grande puissance pour alimenter plus d'un quai ou de plus faible puissance et être évolutive en fonction des demandes et de la disposition des points de raccordement.

Pour cette topologie, les requis de connexion doivent répondre à la norme IEC/IEEE 80005-1. Les modes de connexion selon le type de navire seront vus un peu plus loin. Si le navire utilise une tension de fonctionnement plus basse, un transformateur abaisseur de tension doit être installé habituellement à bord. Il est aussi possible d'utiliser un transformateur dans une sous-station secondaire près du navire, tel que présenté à la Figure 15.

3.2.2 TOPOLOGIE DU SYSTÈME CENAQ – HAUTE TENSION DEUX FRÉQUENCES AVEC UN CONVERTISSEUR

La Figure 11 montre la topologie d’une installation à deux fréquences avec un convertisseur haute puissance qui peut alimenter plusieurs quais en même temps.

Figure 11
Convertisseur de fréquence haute puissance — deux bus CA — 50 Hz et 60 Hz



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Les éléments essentiels de ce système d’alimentation des quais sont situés dans un hangar ou près d’un terminal principal qui, en raison de ses grandes dimensions, doit être situé à l’écart du quai. Ce système comprend d’un côté un circuit à 60 Hz alimenté par le réseau électrique typiquement à 25 kV, un sectionneur d’entrée et circuit de protection, un transformateur pour abaisser la tension à 11 ou 6,6 kV et un sectionneur de sortie et circuits de protection avant de cheminer en direction des quais. D’un autre côté, le système comprend un variateur de fréquence avec des transformateurs et circuits de protection correspondants (exemple ABB ACS6080), qui sont situés dans la station de distribution principale. La puissance du variateur de fréquence et des transformateurs correspondants, qui sont dimensionnés en fonction des conditions spécifiques du port, varie généralement de quelques kW à 10 MW. Dû aux limitations des commutateurs électroniques, la tension de fonctionnement des convertisseurs doit être abaissée à l’aide d’un transformateur à un maximum de 3,3 kV. Une fois la fréquence convertie, la tension est élevée à celle d’opération du navire. Cette tension peut être de 50 Hz ou de 60 Hz à des tensions de 6,6 kV ou 11 kV.

Ce type de solution a été mis en place dans un port en Suède. Pendant le fonctionnement de ce type de système, il y a eu des pannes occasionnelles causées par l’un des navires connectés. Ces pannes ont entraîné la désactivation de l’ensemble du système et le black-out sur d’autres navires. L’alimentation d’électricité de haute qualité à partir du système STS, et donc également le fonctionnement ininterrompu du système, sont fondamentaux pour des raisons de sécurité à bord des navires. Les convertisseurs de fréquence d’une

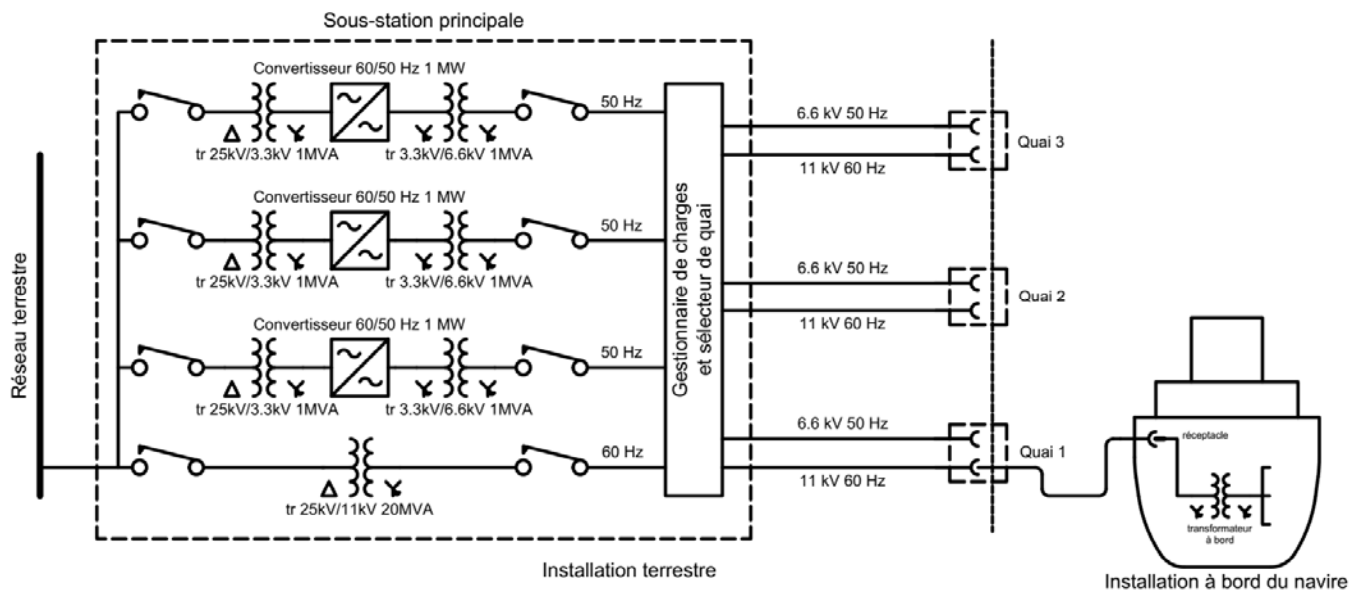
puissance aussi élevée nécessitent un service spécial pour assurer de limiter les erreurs d’opération occasionnant des arrêts de fonctionnement.

En raison de limitations technologiques, le variateur de fréquence est généralement créé sur la base de thyristors IGCT — c’est-à-dire des interrupteurs électroniques avec une fréquence de commutation plus basse que d’autres types de technologies. Cela a un impact négatif sur la qualité des flux de tension générés.

3.2.3 TOPOLOGIE DU SYSTÈME CENAQ – HAUTE TENSION DEUX FRÉQUENCES À PLUSIEURS CONVERTISSEURS

Cette topologie est présentée à la Figure 12. Quelques variateurs de fréquence de puissance inférieure (généralement autour de 1 MW) sont utilisés pour obtenir une tension à 50 Hz. Les convertisseurs de fréquence et les transformateurs correspondants sont situés dans la station de distribution principale. Dans la première et la deuxième topologie, les câbles de connexion sont répartis indépendamment.

Figure 12
Quelques convertisseurs de puissance inférieure — deux bus CA — 50 Hz ou 60 Hz



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

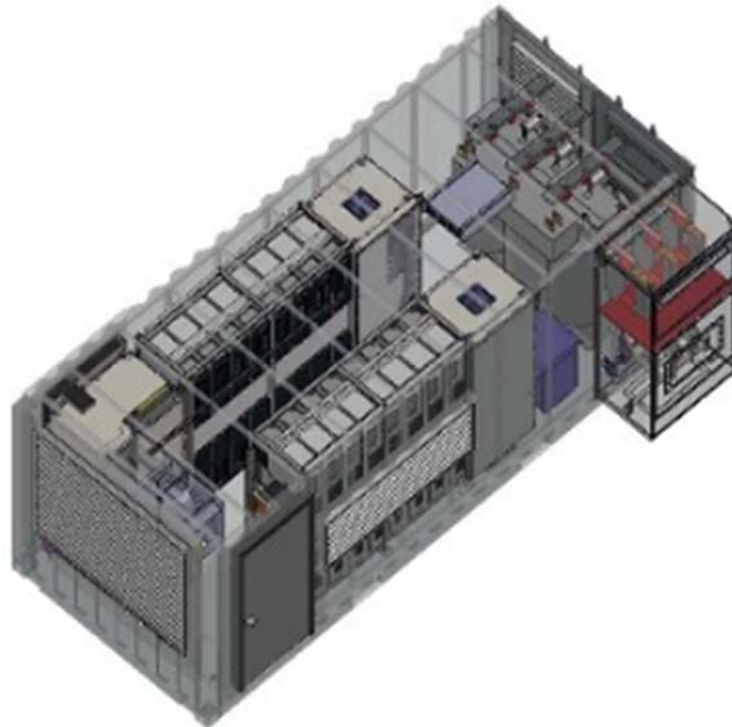
Cette topologie permet l'utilisation de convertisseurs en fonctionnement parallèle (gestion de l'alimentation) lors de l'alimentation d'un navire avec des exigences de puissance plus élevées. Le principal avantage de cette topologie est la capacité d'assurer un fonctionnement indépendant des systèmes pour variateurs de fréquence, ce qui augmente considérablement la fiabilité du système. Les problèmes survenant dans la topologie à un seul convertisseur du système CENAQ ne sont pas présents avec la redondance des

convertisseurs. Encore ici, le niveau de tension des points de connexion au quai est en fonction du rapport des transformations à la sortie des convertisseurs.

L'inconvénient de cette solution est la plus grande surface de la station principale nécessaire à l'installation de plus de convertisseurs, de transformateurs et de câblages, ce qui occasionne des coûts plus élevés que dans la topologie à un seul convertisseur.

Il existe une possibilité de solution modulaire pour la topologie à plusieurs convertisseurs avec l'utilisation de conteneurs équipés de chemins complets de transformation (convertisseur, transformateurs correspondants et circuits de protection) (Figure 13).

Figure 13
Station en conteneur - modules de plusieurs petits convertisseurs sous forme de rack



Source : ABB.

Cela permet une extension facile du système d'électrification avec des modules supplémentaires (convertisseurs). Le concept modulaire permet la construction de convertisseurs de toute puissance, allant de plusieurs centaines de kVA à plus de 10 MVA. Les modules peuvent être montés dans des armoires ou sous la forme d'étagères. La solution la plus intéressante pour la réalisation de systèmes STS a été présentée par ABB. Grâce à la construction modulaire située dans des conteneurs, il est possible d'obtenir un fonctionnement ininterrompu même avec des modules endommagés (automatiquement déconnectés) avec des paramètres légèrement réduits — ce que l'on appelle la redondance avancée.

La Figure 14 montre une comparaison d'un convertisseur simple classique « *Normal Statcom/ESS* » (en haut de la ligne grise horizontale) avec une série de modules basés sur une redondance avancée située dans des conteneurs « *PCS100 Statcom/ESS Advanced Redundancy* » (Budzisz et Warzyński, 2012) (en bas de la ligne grise horizontale). La partie de gauche de la figure représente le fonctionnement normal des deux configurations. Si une situation de défaut se produit, c'est tout le convertisseur qui est affecté, tandis que pour les convertisseurs redondants, juste une partie des convertisseurs est affectée, mais pas l'ensemble du conteneur.

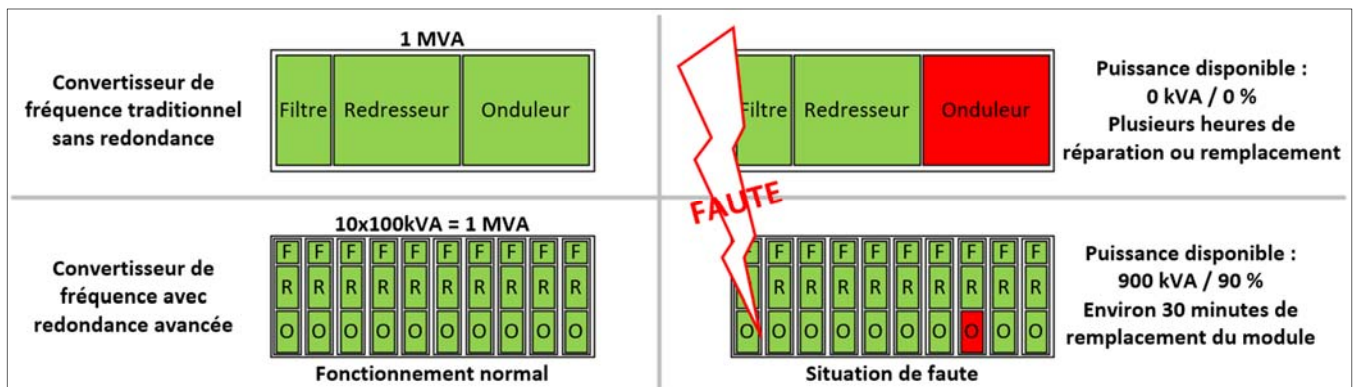
La redondance avancée permet :

- Un fonctionnement continu du système avec une puissance réduite en cas de panne d'un seul module.
- La possibilité de construire un système avec un certain nombre de modules $n + 1$, ce qui se traduit par une augmentation supplémentaire de la fiabilité et de la disponibilité de l'énergie.
- Une planification flexible de la réparation ou du remplacement d'un seul module pendant le fonctionnement.

De plus, une certaine surcharge est possible : 120 % pendant 10 minutes; 150 % pendant 30 secondes et 175 % pendant 2 secondes. Des surcharges plus élevées peuvent être obtenues en ajoutant plus de modules.

Un grand avantage de la topologie à plusieurs convertisseurs est la possibilité de synchroniser plus rapidement le réseau électrique du navire avec le réseau terrestre en utilisant le contrôle de convertisseurs mono fréquences [6]. Dans la topologie à un seul convertisseur alimentant plus d'un navire, il est difficile de synchroniser le convertisseur avec l'utilisation de moteurs auxiliaires marins, dont l'alimentation en carburant (rotations) est modifiée à pleine charge pour faire varier progressivement la fréquence du navire.

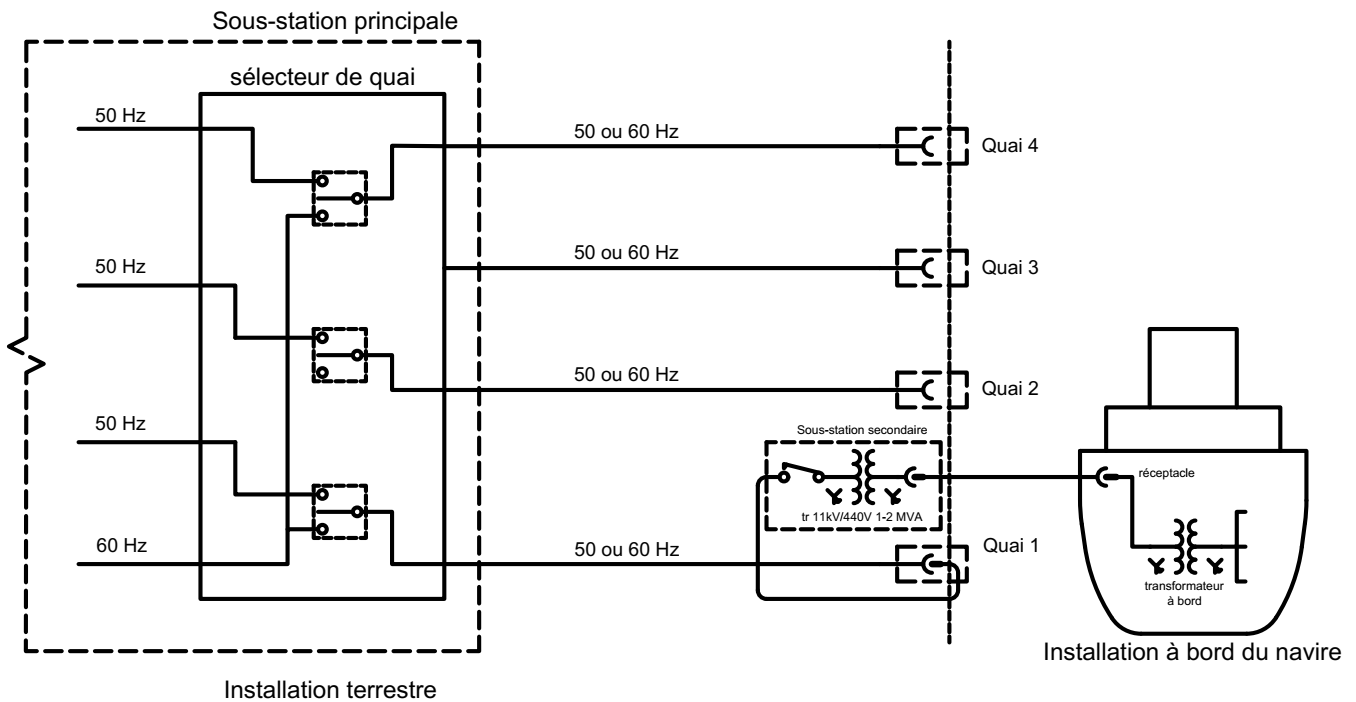
Figure 14
Redondance multiniveaux conçue par ABB



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Dans la topologie à plusieurs convertisseurs illustrée à la Figure 15 où un câble à 50 Hz et un câble à 60 Hz arrivent à chacun des points de connexion à quai, il est possible d'économiser le nombre de câbles de liaison par l'installation du sélecteur de fréquence dans la sous-station principale des convertisseurs. Ainsi, un seul câble relie la sous-station à chaque point de connexion. La Figure 16 illustre également une sous-station secondaire pour abaisser la tension lorsque le navire opère à basse tension. Ce type de sous-station se retrouve souvent sous forme d'un conteneur pouvant être facilement déplacé.

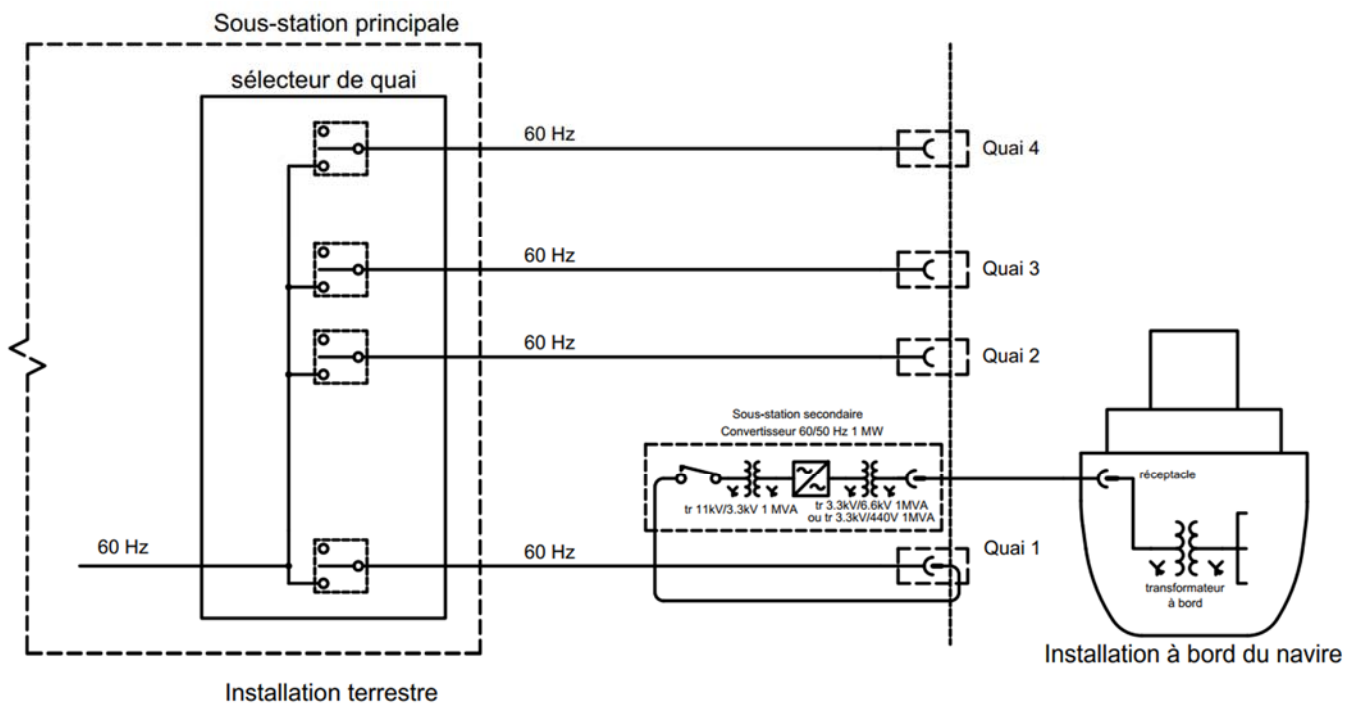
Figure 15
Sélecteur de fréquence



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Une variation à cette dernière topologie offrant une flexibilité de configuration d'alimentation à quai tout en réduisant les besoins d'infrastructures fixes est l'utilisation d'une sous-station secondaire mobile offrant la possibilité de conversion de fréquence de 60 Hz à 50 Hz ainsi que l'ajustement à la tension d'opération à bord des navires, tels qu'illustrés par la Figure 16.

Figure 16
Réseau de distribution et de sélection des quais à 60 Hz à haute tension avec sous-station secondaire de conversion



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Les compagnies Schneider Electric, avec leur unité ShoreBox, ou ABB avec leur unité PCS100, offrent différentes solutions de puissance et de tension pour ce genre de sous-station secondaire mobile.

3.2.4 TOPOLOGIE DU SYSTÈME CENAQ – HAUTE TENSION COURANT CONTINU (HTCC)

Le principal avantage de la topologie haute tension courant continu présentée à la Figure 17 est la capacité à transférer de l'énergie avec une réduction des pertes d'énergie entre des systèmes de fréquences différentes. Dans la station principale, la tension alternative est convertie (via le redresseur) en tension continue et sous cette forme modifiée, elle est transférée à l'onduleur local près du quai, où elle est à nouveau changée en tension alternative par des onduleurs.

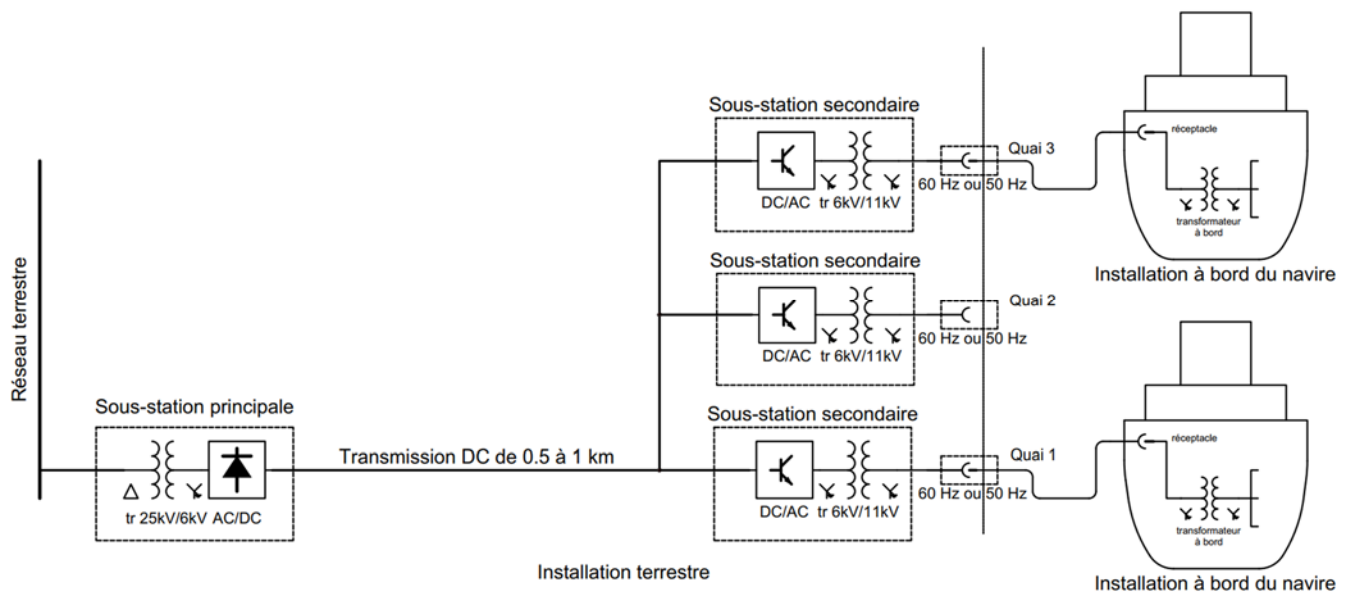
Les avantages du transfert de courant continu sont bien connus :

- Les pertes de transfert sont réduites de 33 %.
- La puissance de transfert est indépendante de la distance.
- La ligne de transmission ne nécessite pas de compensation de puissance réactive.

- Les systèmes HTCC peuvent combiner deux systèmes d'alimentation fonctionnant de manière asynchrone.
- Les systèmes HTCC permettent un contrôle rapide des volumes et des directions du flux d'énergie.

L'un des inconvénients de la topologie représentée sur la Figure 17 est une diminution de la fiabilité des systèmes en utilisant un convertisseur CA/CC dans la station de distribution principale. La défaillance de ce redresseur désactive l'ensemble du système électrique. De plus, plusieurs sous-stations secondaires avec de l'électronique de puissance sont nécessaires pour couvrir l'ensemble des points de connexion, ce qui augmente les coûts même si le réseau terrestre et l'alimentation du navire sont à la même fréquence.

Figure 17
Alimentation HT (transmission - HTCC)



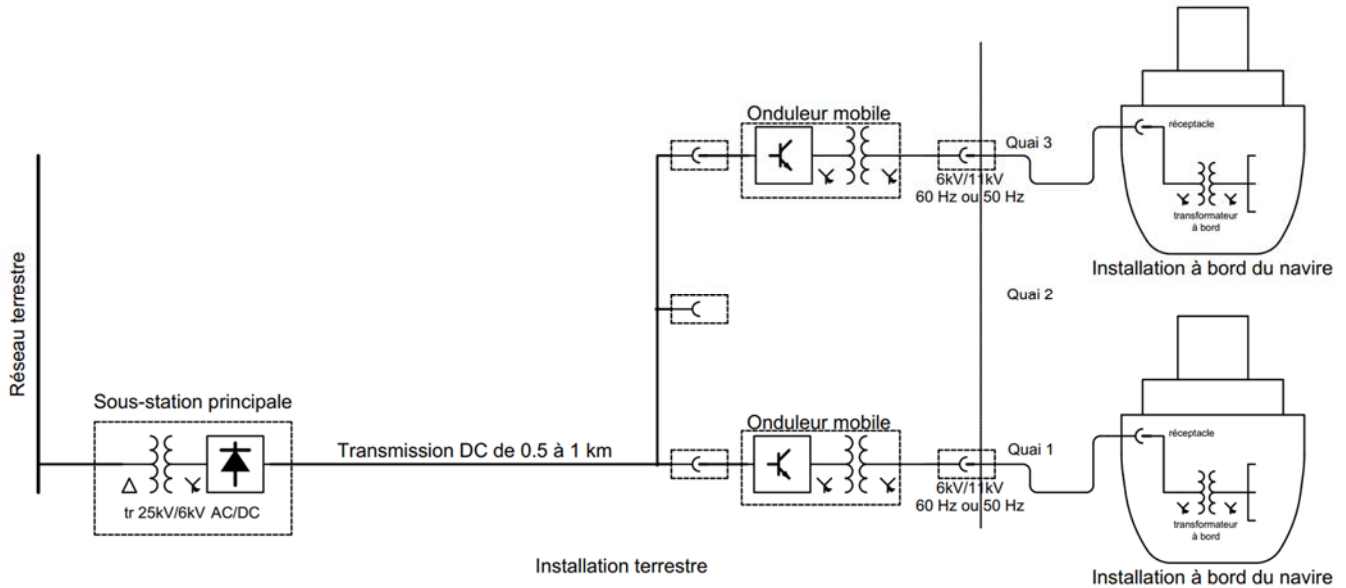
Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Cet inconvénient peut être atténué par l'utilisation d'une topologie modulaire à plusieurs convertisseurs CA/CC avec une puissance plus petite fonctionnant en courant continu et indépendamment sur chaque quai, ce qui diminue les pertes par rapport à un système entièrement en courant alternatif. Dans les topologies à haute tension à deux fréquences utilisant un ou des convertisseurs dans les sous-stations principales, les dispositifs de conversion à quai ne sont pas prévus. Cette topologie peut être intéressante pour les ports ayant plusieurs quais et un seul point d'alimentation loin des points de connexion et dans lesquels les l'ensemble des installations électriques sont projetées.

Un autre désavantage est l'espace requis par les onduleurs fixes de grandes dimensions qui interféreraient avec l'infrastructure des quais, causant des difficultés dans les opérations des ports. La solution à ce problème peut être des plateformes mobiles sur lesquelles des onduleurs et des transformateurs

correspondants sont installés (Figure 18). Cette solution est toutefois plus onéreuse du fait que les systèmes doivent être conçus pour être déplacés facilement et rapidement.

Figure 18
Transmission - HTCC avec l'utilisation de plateformes mobiles



Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

Résumé des technologies présentées

Le choix de la bonne topologie dépend des caractéristiques du port, de la variété des navires qui profitent des services d'alimentation du port (puissance, paramètres de tension et de fréquence du réseau électrique du navire), de la taille des quais et de leur vocation. Le Tableau 8 présente une comparaison des topologies décrites précédemment du système CENAQ.

Tableau 8
Comparaison des topologies décrites du système CENAQ

Topologie	Avantages	Désavantages
HT une fréquence	<p>Topologie la plus simple et la moins coûteuse.</p> <p>Cette configuration est très intéressante en Amérique du Nord, car la fréquence disponible est à 60 Hz.</p>	<p>Une seule fréquence disponible, celle du réseau. Il est cependant possible de prévoir des unités de conversion mobiles ou installées directement sur un quai.</p> <p>Une autre option est d'installer le convertisseur de fréquence requis à bord d'un navire.</p>
HT deux fréquences avec un convertisseur	<p>L'installation occupe une surface relativement petite et est placée à distance de l'environnement hostile des quais, donc à longue distance des quais.</p> <p>Le coût d'installation est légèrement inférieur au coût des autres topologies avec plusieurs convertisseurs.</p>	<p>Le système le plus sujet aux pannes (la panne du convertisseur désactive toutes les bornes 50 Hz).</p> <p>Disponibilité limitée d'un service hautement spécialisé pour les convertisseurs haute puissance.</p> <p>Faible qualité de l'électricité (le taux de distorsion harmonique THD élevé). Nécessité d'utiliser des filtres harmoniques.</p>
HT deux fréquences à plusieurs convertisseurs	<p>La défaillance de l'un des convertisseurs ne déconnecte qu'une seule borne, les autres terminaux fonctionnent sans aucun problème.</p> <p>Possibilité d'augmenter la fiabilité grâce à l'utilisation de la redondance multi-niveaux.</p> <p>Possibilité de fonctionnement en parallèle des modules afin d'assurer la puissance des navires à forte demande de puissance.</p> <p>Facilité d'accès au service.</p> <p>Haute qualité des tensions générées par les onduleurs basés sur des transistors IGBT.</p> <p>Possibilité de placer des installations autonomes si les convertisseurs sont dans des conteneurs et d'augmenter ainsi les possibilités d'extension du système CENAQ.</p>	<p>Le coût d'installation est légèrement plus élevé que dans la topologie à un convertisseur.</p> <p>L'emplacement nécessaire pour l'installation est plus important que celui avec juste un convertisseur.</p>
Haute tension courant continu (HTCC)	<p>La surface de la gare principale est la plus petite de toutes les variantes.</p> <p>Rendement élevé grâce à des pertes plus faibles dans les lignes de distribution des câbles CC.</p> <p>Lorsque l'onduleur est mobile, la configuration des quais est plus flexible.</p> <p>Modularité pour une expansion facile.</p>	<p>La mise en place d'onduleurs (convertisseurs CC à CA) fixes sur les quais interfère avec l'infrastructure portuaire.</p> <p>Les onduleurs sont plus exposés à l'environnement hostile des quais.</p> <p>La défaillance du convertisseur CA/CC dans la station principale empêche le fonctionnement des bornes si celui-ci n'est pas redondant.</p> <p>Les onduleurs augmentent les coûts même si la fréquence utilisée à bord du navire est la même que celle du réseau terrestre.</p>

Sources : Tranapowicz & German-Galkin, Innovation maritime.

En complément des topologies haute tension (6,6 kV et 11 kV) présentées dans cette section, les mêmes topologies, mais à basse tension, peuvent être installées pour s'adapter aux niveaux de tension des navires sans que ceux-ci doivent disposer d'un transformateur à bord. Toutefois, le nombre de niveaux de tension standards est important : 230 V, 380 V, 400 V, 440 V, 450 V, 575 V, 600 V et 690 V. Dans le cas où un même quai est utilisé par plusieurs navires, il devient donc plus difficile de rendre disponible une tension d'alimentation compatible aux besoins électriques de chacun d'eux.

Cependant, seule la plage de tensions de 400-690 V est couverte par la norme de connexion à quai basse tension IEC/IEEE 80005-3 [16]. Cette norme spécifie entre autres les connecteurs et réceptacles associés à une capacité en courant de 350 A en continu et de 16 kA en situation de court-circuit. De ce fait, si la charge électrique d'un navire demande plus de 350 A il est nécessaire d'utiliser plusieurs assemblages connecteurs/réceptacles en parallèle. Ainsi, il est possible d'utiliser jusqu'à 5 connexions en parallèle pour alimenter une charge de 1 000 kVA à 400 V. Toutefois, l'étude de Haddadian, Chavdarian et Peterson identifie une capacité en courant des connecteurs à 500 A, ce qui pourrait permettre l'alimentation d'une charge de 1 500 kVA à 400 V avec 5 connexions en parallèle [16]. La limitation en puissance à 1 MVA, ou possiblement 1,5 MVA disponible pour une connexion basse tension indique que ce type de connexion n'est pas viable pour les opérations à quai des navires-autodéchargeurs ayant des pointes de demande de puissance excédant 1,5 MVA. Même si elle nécessite l'installation d'un transformateur à bord, une connexion haute tension offre alors une puissance suffisante.

Soulignons que toutes les topologies possibles n'ont pas été présentées. Un choix a été fait de présenter les topologies les plus communes. Il s'avère cependant, dans tous les cas, qu'une des contraintes de l'électrification des quais est la capacité du réseau électrique actuel disponible aux ports.

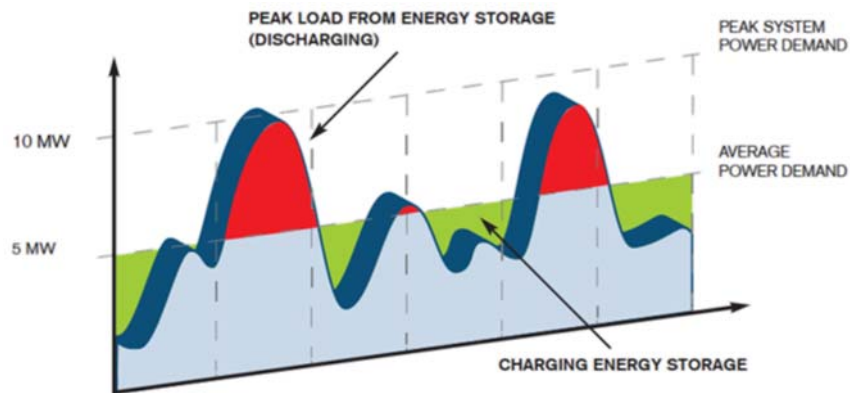
Capacité électrique suffisante

Pour pallier au problème de capacité insuffisante du réseau national, des projets de centrale thermique haute efficacité en cogénération peuvent contribuer à la fois à la génération d'électricité pour l'alimentation des quais et servir d'énergie thermique pour les activités des ports, tout en maintenant le niveau des émissions nettement en dessous des génératrices auxiliaires des navires pour une même puissance [17]. Cette approche demeure cependant moins intéressante au niveau environnemental qu'une électrification hydroélectrique.

Une autre approche pour pallier à la capacité des installations électriques des ports est de baser les infrastructures sur la consommation moyenne des navires et non seulement sur les pointes de demande. Dans cette approche, des unités d'emmagasiner d'énergie (UEE), habituellement des batteries, sont utilisées comme source tampon pour stabiliser, moyenniser ou niveler la demande énergétique des navires par rapport au réseau électrique terrestre. Cette approche peut être appliquée selon deux philosophies

principales. Premièrement, les UEE peuvent être situées à terre dans la sous-station d'alimentation des quais du port ou dans une sous-station secondaire de type conteneur pouvant être déplacé près des navires pour utilisation. Cette dernière option a pour avantage que le câblage entre la sous-station principale et les quais peut être dimensionné en fonction de la demande moyenne des navires et non la pointe de demande.

Figure 19
Illustration du nivelage des charges d'un navire et des périodes de charge et de décharge d'une UEE



Source : MJR Power & Automation.

La deuxième philosophie est d'installer de manière permanente une UEE sur le navire pour le nivelage des charges (Figure 19), tel que décrit par Farrier, Wu et Bucknall [19] ainsi que MJR Power & Automation [18] ou de manière amovible ou interchangeable telle que présentée par Current Direct [20].

Lorsqu'une UEE est installée de manière permanente sur le navire, le système nivelle les variations de charge à quai pour maintenir une demande sensiblement constante durant les manœuvres de chargement ou de déchargement. Il permet aussi de niveler les variations de charge lors des opérations de transit du navire, maximisant ainsi l'efficacité d'opération des génératrices auxiliaires.

Mentionnons que le Québec dispose déjà, dans la plupart des cas, d'infrastructures favorisant l'implantation d'alimentation à quai.

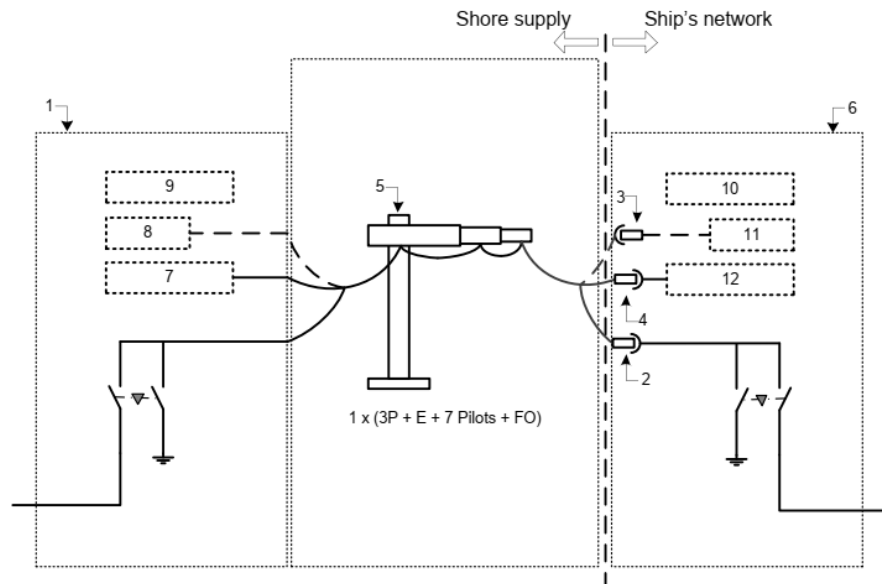
3.3 PRINCIPAUX MODES DE CONNEXION QUAI-NAVIRE

Pour raccorder les navires au système d'électrification à quai, plusieurs configurations de connexion sont présentées dans la norme IEC/IEEE 80005-1. Les variations sur le nombre de câbles, la polarité des connecteurs, la position des relais de protection, etc. sont présentées dans cette section.

3.3.1 SYSTÈME DE CONNEXION POUR NAVIRES ROULIER, CARGO ET DE CROISIÈRES

Le premier système de connexion schématisé à la Figure 20 est utilisé pour les navires de type roulier, cargo et pour les navires de croisières. Il est possible d'y observer le câble d'alimentation ainsi que les systèmes de sécurité et de communication du côté quai et du côté navire.

Figure 20
Diagramme général du système de connexion pour navires roulier, cargo et de croisières



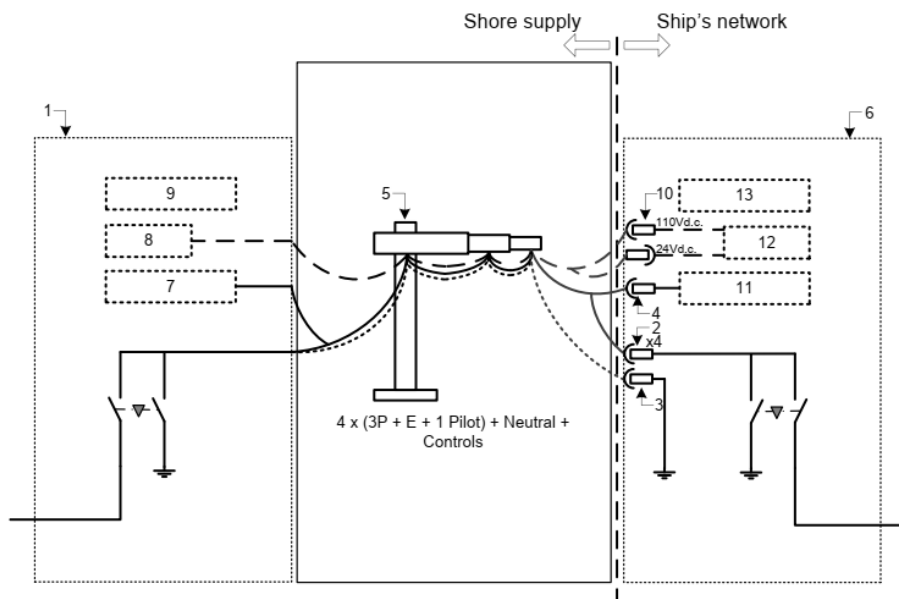
1. Système d'alimentation à quai.
2. Fiche (côté terre) et réceptacle (côté navire).
3. Fibre optique de communication pour contrôle et surveillance - réceptacle côté terre et fiche côté navire.
4. Fils témoins intégrés aux connecteurs.
5. Système de gestion des câbles, ici grue côté terre présentée.
6. Appareillage de connexion à bord.
7. Fils témoins d'entrebarrage côté terre.
8. Contrôle côté terre.
9. Relais de protection côté terre.
10. Relais de protection côté navire.
11. Contrôle côté navire.
12. Fils témoins d'entrebarrage côté navire.

Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

Bien que la norme IEC/IEEE 80005-1 ne définit aucun mode de connexion pour les vraquiers, cette configuration serait tout indiquée pour ce type de navire. En effet, un câble de distribution de puissance à haute tension permet de délivrer jusqu'à 6,5 MVA à 11 kV ou 3,6 MVA à 6,6 kV. Cette configuration est donc nettement suffisante pour les besoins des vraquiers autodéchargeurs présentés lors de cette étude.

Pour les navires de croisières, la configuration change légèrement en raison des puissances plus importantes demandées. Un nombre de câbles plus grand (jusqu'à 4 conducteurs et un neutre) doit être pris en charge par le système. La Figure 21 présente la configuration de ce système.

Figure 21
Diagramme général du système de connexion des navires de croisières



1. Système d'alimentation à quai.
2. Fiches (côté terre) et réceptacles (côté navire) de puissance, 4 fois.
3. Fiche (côté terre) et réceptacle (côté navire) du neutre.
4. Fils témoins intégrés aux connecteurs.
5. Système de gestion des câbles, ici grue côté terre présentée.
6. Appareillage de connexion à bord.
7. Fils témoins d'entrebarrage côté terre.
8. Communication pour contrôle et surveillance côté terre.
9. Relais de protection côté terre.
10. Fils de communication et de contrôle et connecteurs (110 Vcc et 24 Vcc).
11. Fils témoins d'entrebarrage côté navire.
12. Communication pour contrôle et surveillance côté navire.
13. Relais de protection côté navire.

Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

Trois systèmes de gestion de câble s'illustrent particulièrement pour ce type de connexion et sont présentés à la Figure 22.

Figure 22
Méthodes de connexion basées sur les configurations de connexion des navires rouliers et de croisières



Source : Cavotec.

La première méthode consiste en une grue extensible pivotante offrant un grand degré de liberté pouvant facilement s'adapter aux différentes configurations des navires.

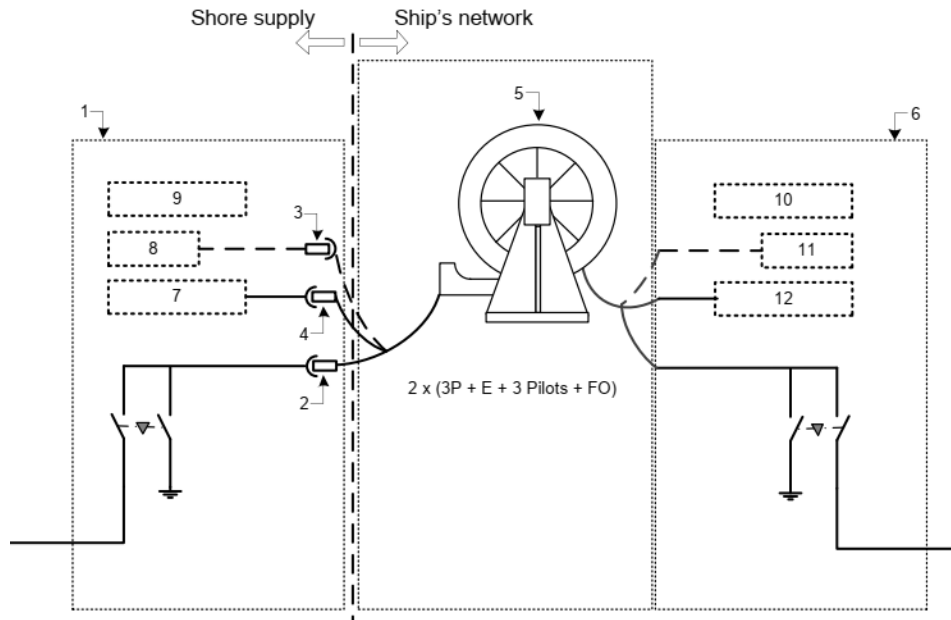
La seconde utilise une tourelle fixée au quai avec un bras télescopique pour réaliser le raccordement. Cette méthode est un peu plus restrictive et doit s'adapter au point de connexion en fonction de la position d'amarrage.

La troisième méthode utilise une grue mobile dont l'alimentation se fait par le déroulement de câbles haute tension sur le quai ou dans un caniveau assurant la protection des câbles. Il est certain que l'utilisation d'une grue mobile avec son système d'enroulement des câbles offre une plus grande flexibilité par rapport au positionnement du navire au quai comparativement aux deux autres méthodes, et peut permettre de diminuer le nombre de points de connexion. Toutefois, la gestion des câbles déroulés sur le quai apporte un enjeu de sécurité dû à leur proximité. Un mécanisme de caniveau et de portes de protection être utilisé pour protéger les câbles, mais sa fiabilité dans les régions hivernales peut s'avérer plus difficile.

3.3.2 SYSTÈME DE CONNEXION POUR NAVIRES PORTE-CONTENEURS

Le mode de connexion des navires porte-conteneurs diffère des autres types de navires. En effet, le système de gestion de câbles est souvent hissé à bord à l'aide des grues de déchargement et les câbles sont ensuite déroulés du navire vers un point de raccordement dans un caniveau sur le quai. Un conteneur de raccordement spécialement conçu à cet effet est souvent utilisé pour regrouper les systèmes électriques nécessaires.

Figure 23
Diagramme général du système de connexion des porte-conteneurs



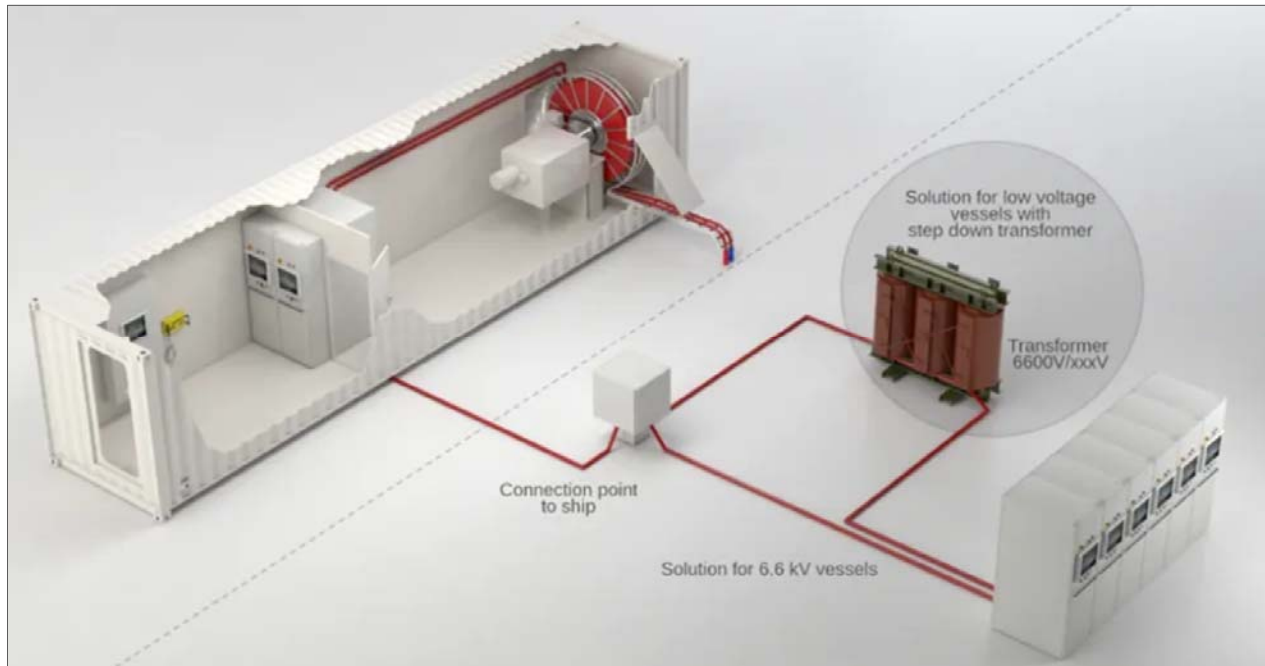
1. Système d'alimentation à quai.
2. Réceptacle (côté terre) et fiche (côté navire).
3. Fibre optique de communication pour contrôle et surveillance - fiche côté terre et réceptacle côté navire.
4. Fils témoins intégrés aux connecteurs.
5. Système de gestion des câbles, ici enrouleuse sur ou au-dessus du pont du navire.
6. Appareillage de connexion à bord.
7. Fils témoins d'entrebarrage côté terre.
8. Contrôle côté terre.
9. Relais de protection côté terre.
10. Relais de protection côté navire.
11. Contrôle côté navire.
12. Fils témoins d'entrebarrage côté navire.

Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

Ce système présente sensiblement la même configuration de circuit, à l'exception du système de gestion de câble qui est différent et du nombre de conducteurs utilisés. En effet, deux câbles parallèles avec trois conducteurs pilotes doivent être utilisés pour délivrer une puissance maximale de 7,5 MVA à 6,6 kV.

Si le navire utilise une basse tension (<6,6 kV), un transformateur abaisseur de tension peut être installé en permanence sur le navire ou être incorporé au conteneur de raccordement.

Figure 24
Conteneur de connexion d'alimentation à quai sur un porte-conteneurs



Source : Wärtsilä.

En plus de contenir l'enrouleur de câble, le conteneur contient habituellement l'appareillage de protection et peut aussi contenir le convertisseur de fréquence au besoin.

L'avantage de cette configuration est que le conteneur peut être déplacé pour s'adapter à la configuration du quai et le côté d'accostage du navire en respectant une longueur raisonnable de câble sur le pont.

Figure 25
Enrouleur de câbles sur le pont du navire. Conteneur avec enrouleur de câbles. Caniveau avec connecteurs de raccordement

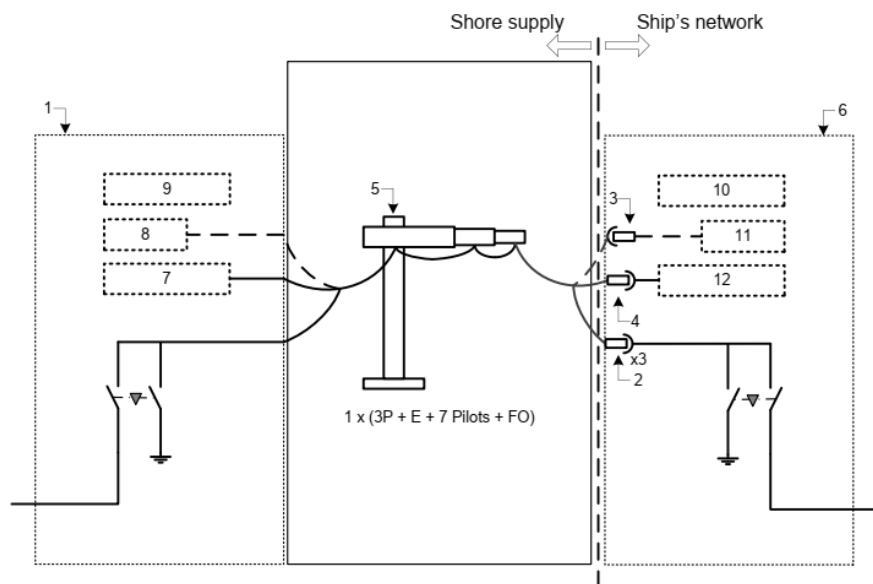


Source : Cavotec.

3.3.3 SYSTÈME DE CONNEXION POUR NAVIRES-CITERNES DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ (GNL)

Contrairement aux connexions des porte-conteneurs, où l'accès au quai le plus près du navire est important, les terminaux des navires-citernes de gaz ou pétroliers diffèrent grandement. Il en va de même pour la gestion des câbles d'alimentation qui est plus distante des navires. Pour les navires-citernes de GNL, le raccordement de l'alimentation à quai peut être effectué en utilisant jusqu'à trois câbles pour permettre un maximum possible de 10,7 MVA à 6,6 kV.

Figure 26
Diagramme général du système de connexion des navires transportant du GNL



1. Système d'alimentation à quai.
2. Fiche (côté terre) et réceptacle (côté navire).
3. Fibre optique de communication pour contrôle et surveillance - réceptacle côté terre et fiche côté navire.
4. Fils témoins intégrés aux connecteurs.
5. Système de gestion des câbles, ici grue côté terre présentée.
6. Appareillage de connexion à bord.
7. Fils témoins d'entrebarrage côté terre.
8. Contrôle côté terre.
9. Relais de protection côté terre.
10. Relais de protection côté navire.
11. Contrôle côté navire.
12. Fils témoins d'entrebarrage côté navire.

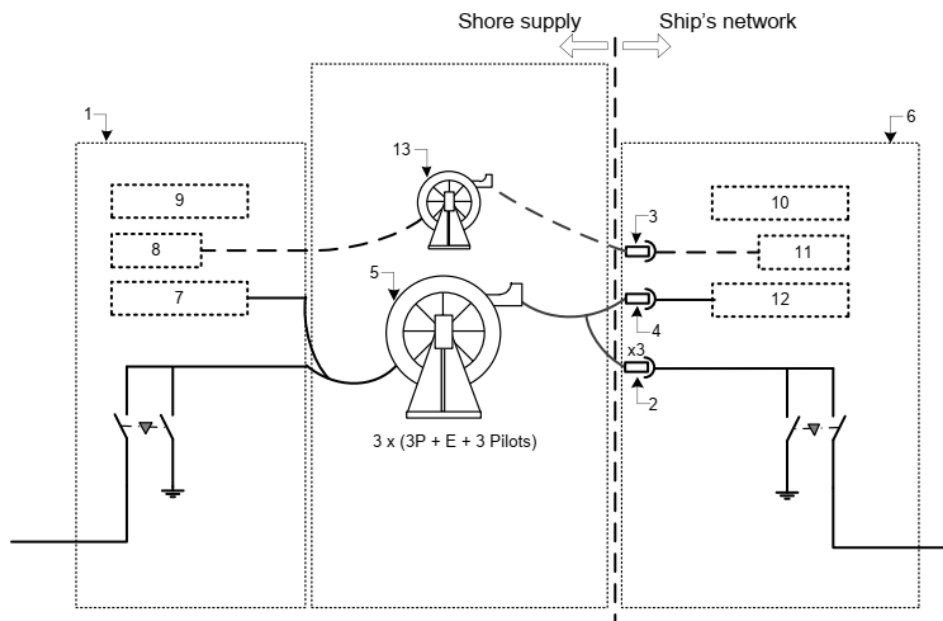
Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

3.3.4 SYSTÈME DE CONNEXION POUR PÉTROLIERS

Le système de connexion pour pétrolier est le seul système de connexion où les câbles de puissance et des câbles de contrôle sont raccordés au navire par deux systèmes de gestion de câble différents.

Dans cette configuration de connexion, chacun des trois câbles peut supporter une puissance de 3,6 MVA, pour un total possible de 10,8 MVA à 6,6 kV.

Figure 27
Diagramme général du système de connexion des navires-citernes



1. Système d'alimentation à quai.
2. Fiche (côté terre) et réceptacle (côté navire).
3. Fibre optique de communication pour contrôle et surveillance - réceptacle côté terre et fiche côté navire.
4. Fils témoins intégrés aux connecteurs.
5. Système de gestion des câbles, ici grue côté terre présentée.
6. Appareillage de connexion à bord.
7. Fils témoins d'entrebarrage côté terre.
8. Contrôle côté terre.
9. Relais de protection côté terre.
10. Relais de protection côté navire.
11. Contrôle côté navire.
12. Fils témoins d'entrebarrage côté navire.
13. Système de gestion des câbles de contrôle.

Sources : ISO/IEEE 80005-1, Innovation maritime.

3.4 SITUATION AU QUÉBEC ET AU CANADA

Port de Montréal

Parmi les APC, seul le port de Montréal est équipé d'un système d'alimentation à quai au Québec. C'est en 2017, dans le cadre de la réhabilitation de la jetée Alexandra (aujourd'hui le Grand Quai) et du terminal de croisières que l'APM a mis en place les équipements nécessaires à l'électrification destinée aux navires de croisières. Schneider Electric a conçu et réalisé les équipements nécessaires à l'installation d'un poste électrique de 6,6 kV et 11 kV à 60 Hz réalisé entre 2016 et 2017 pour les navires de croisières. Une variante de la topologie CENAQ haute tension une fréquence a été privilégiée (voir 3.2.1). Le système de branchement aux navires est assuré par une unité AMPMobile de Cavotec conforme au standard IEC/IEEE 80005-1.

Le port de Montréal a pu bénéficier d'une aide de 5 000 000 \$ du *Programme d'Alimentation à Quai pour les Ports* ainsi que d'un financement de 3 000 000 \$ du gouvernement du Québec pour le projet d'alimentation électrique à la jetée Alexandra, conforme au standard IEC/IEEE 80005-1. Cela a aussi contribué à l'électrification par connexion directe des quais 25, 27, 29 et M2. Des investissements totaux de l'ordre de 11 M\$ ont été requis.

Port d'Halifax [34] [35]

En 2014, Cochran Marine a terminé la conception et l'installation d'un système d'alimentation à quai pour l'administration portuaire d'Halifax. Le système dessert jusqu'à 20 MW les plus gros navires de croisières entrant aux quais 20, 21 et 22. Ce système d'alimentation à quai est équipé du même système d'automatisation et du même dispositif de positionnement de câble utilisés dans d'autres installations de Cochran Marine. Le nombre de branchements à quai se situe entre 20 à 25 par année.

Le système de l'intégrateur Cochran Marine est composé d'une sous-station électrique pouvant effectuer la commutation entre les tensions de 6,6 kV et 11 kV à 60 Hz ainsi que d'une tour semi-mobile pouvant être déplacée sur l'un des trois quais d'accostage. La tête de la tour dispose d'un rail extensible sur lequel les câbles et connecteurs de raccord conformes au standard IEC/IEEE 80005-1 sont situés.

Comme le port de Montréal, celui d'Halifax a adopté une topologie CENAQ haute tension une fréquence (voir 3.2.1).

Figure 28
Tour semi-mobile



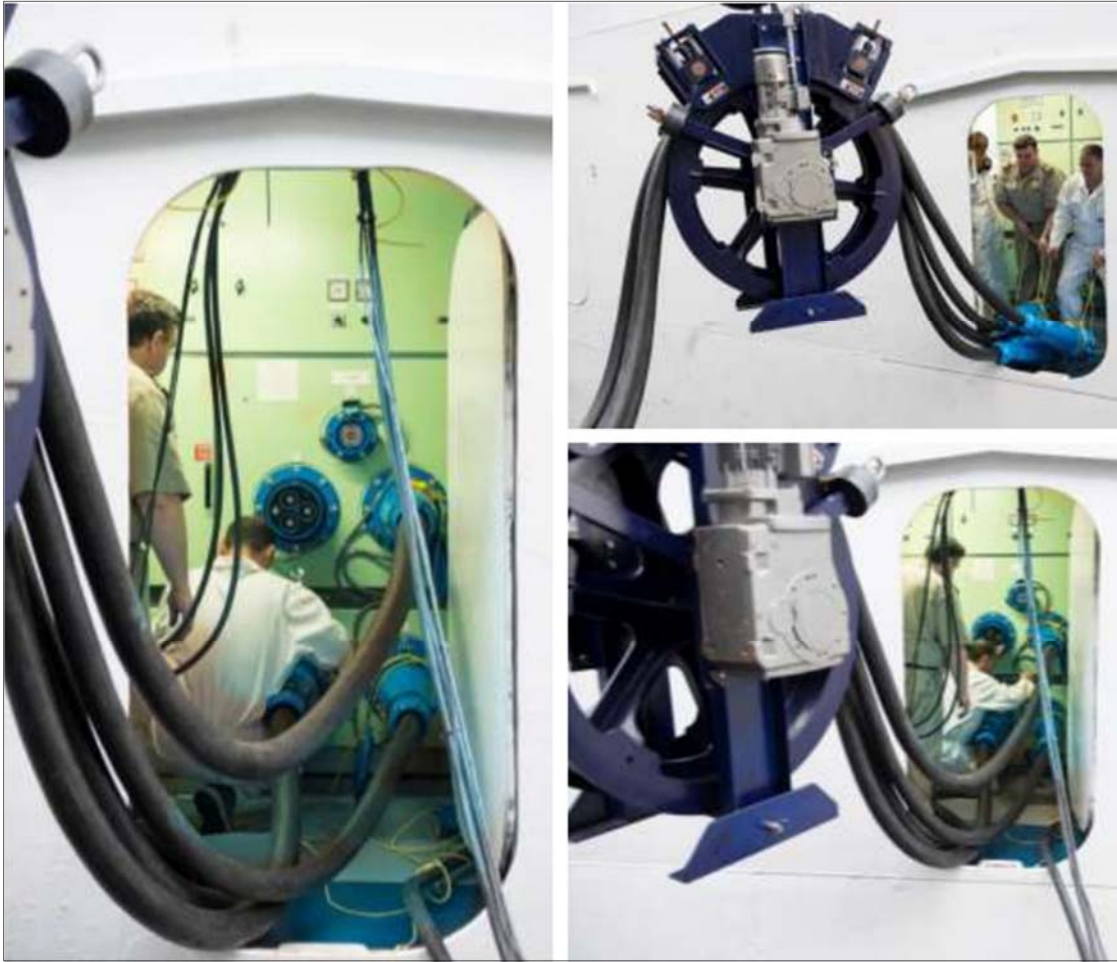
Source : cruisehalifax.ca

Figure 29
Sous-station électrique



Source : cruisehalifax.ca

Figure 30
Opération de connexion d'un navire



Source : cruisehalifax.ca

Port de Vancouver [4]

Les deux premiers points de raccordement au terminal de croisières du port de Vancouver sont composés d'une sous-station électrique pouvant effectuer la commutation entre les tensions de 6,6 kV et 11 kV à 60 Hz ainsi que de deux tours fixes. La tête de la tour dispose d'un rail extensible sur lequel les câbles et les connecteurs de raccord conformes au standard IEC/IEEE 80005-1 sont situés. Nous n'avons pas d'information précise au sujet du troisième point de raccordement.

Au terminal à conteneurs Centerm de DP World, Cavotec a livré en 2018 des couvercles de fosse à trois quais et trois boîtiers de prise de courant à quai de 6,6 kV 60 Hz. De même, au Deltaport de Global Container Terminals, le plus grand terminal à conteneurs du Canada, deux couvercles de fosse d'alimentation à quai et deux boîtiers de prise de courant à quai ont été mis en service en 2019.

Au port de Vancouver, l'électricité provient principalement d'hydroélectricité à faibles émissions, réduisant considérablement les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre tout en réduisant le bruit des moteurs. Les autorités portuaires de Vancouver continuent de prendre l'initiative de rendre les connexions d'alimentation à quai disponibles aux différents terminaux maritimes et d'offrir des incitatifs aux armateurs tels que des réductions sur les droits de port pour les navires équipés d'une alimentation à quai. À condition que la demande d'alimentation à quai continue d'augmenter, les installations d'alimentation à quai aux terminaux seront mises en place progressivement sur un certain nombre d'années.

3.5 PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES D'ALIMENTATION À QUAI

- Telle que déjà mentionnée, l'alimentation à quai peut être efficace pour réduire considérablement les émissions de polluants des navires à quai. Dans des circonstances optimales, lorsqu'un navire est connecté à l'alimentation à quai, les émissions globales de polluants peuvent être réduites jusqu'à 98 % en utilisant l'électricité du réseau électrique régional (en fonction de la combinaison de sources d'énergie) [5].
 - Pour que l'alimentation à quai soit économiquement rentable, des facteurs tels que la durée de connexion effective, le taux de consommation électrique, les coûts énergétiques, le temps total passé à quai et les frais de branchement/débranchement doivent être pris en compte dans l'évaluation et se rapportent à l'efficacité globale de l'alimentation à quai. Ces facteurs entrent aussi dans le calcul de la réduction des émissions des navires.
 - L'analyse suggère que l'alimentation à quai peut être plus efficace et plus rentable lorsqu'elle est appliquée aux terminaux et aux ports avec un pourcentage élevé de navires qui reviennent fréquemment, généralement des navires de croisières et des porte-conteneurs ou transits intérieurs qui utilisent fréquemment les mêmes quais.
- L'utilisation de l'alimentation à quai pour les navires commerciaux aux États-Unis est relativement nouvelle et actuellement relativement peu disponible, à l'exception de certains grands ports de la côte Ouest et de quelques ports de la côte Est. Il existe actuellement (en 2017) dix ports utilisant des systèmes haute tension desservant des navires de croisières, des porte-conteneurs et des navires réfrigérés, et 6 ports utilisant des systèmes basse tension desservant des remorqueurs et des bateaux de pêche. Tous sont alimentés à 60 Hz. Bien que la technologie soit relativement nouvelle dans le secteur commercial, l'alimentation à quai est utilisée avec succès par la marine américaine depuis des décennies et est incluse dans le Programme d'économie d'énergie à bord des navires de la marine.

- Les navires qui font fréquemment escale dans les mêmes ports et restent à quai plus longtemps sont potentiellement de très bons candidats pour l'alimentation à quai. Les traversiers en sont un exemple, comme certains vraquiers de transit local.
- Les navires peuvent être modernisés avec l'appareillage de connexion et de synchronisation pour se connecter aux systèmes d'alimentation à quai du port sans devoir effectuer un arrêt complet des équipements à bord. Des normes internationales d'alimentation à quai sont en place pour permettre aux ports et aux armateurs de sélectionner plus facilement l'équipement approprié.
- Plusieurs configurations de connexion peuvent être déployées sur un quai pour électrifier des navires. Le choix de configuration de connexion dépend des besoins des navires et des services d'électrification que le port désire offrir.
- Pour des puissances consommées de plus de 1 000 kVA, une connexion haute tension (6,6 kV ou 11 kV) est recommandée pour limiter le nombre de connecteurs et le courant délivré. Pour des puissances inférieures à 1 000 kVA, la connexion peut se faire à haute tension, mais aussi à basse tension (230 V, 380 V, 400 V, 440 V, 450 V, 575 V, 600 V et 690 V). La grande gamme de valeurs de basse tension occasionne des contraintes supplémentaires dans la conception de tels systèmes et limite les potentiels de compatibilité entre les navires.
- Les obstacles à l'installation d'alimentation à quai comprennent les coûts d'infrastructure et les tarifs d'électricité élevés. L'alimentation à quai nécessite une infrastructure dans les ports, dans certains cas, une amélioration du réseau de distribution électrique local et des modifications des navires. Le coût relatif de l'utilisation de l'alimentation à quai au lieu des propres sources de carburant d'un navire est plus attrayant lorsque les coûts de carburant sont supérieurs aux coûts d'électricité.
- L'outil de calcul des coûts OPS permet de calculer les coûts globaux d'un projet à l'étude. Il calcule les coûts d'exploitation et d'investissement et fournit un moyen d'évaluer les effets de l'optimisation des paramètres tels que l'occupation des postes d'amarrage, les coûts d'approvisionnement en électricité, les coûts de carburant, etc.

4 PRINCIPAUX ENJEUX DU BRANCHEMENT À QUAI

Déjà répandu dans les ports de Californie, de la côte Ouest du Canada ou de la Chine, le branchement électrique des quais a aussi gagné l'Allemagne, les Pays-Bas, et plus récemment le port de Marseille [21].

« *Il y a encore un manque de visibilité des ports sur les alternatives plus écologiques* », note Camille Valero en parlant des autorités portuaires qui n'utilisent pas suffisamment l'alimentation à quai comme outil de visibilité de leur portait « environnemental » par rapport à la population [21].

Malgré le fait que l'électrification à quai ait un bienfait notable pour l'environnement, plusieurs éléments importants sont à considérer lors d'un projet d'implantation. Cette section vise à mettre en évidence les principaux points à prendre en compte lors de son élaboration. On présente également les recommandations de la British Ports Association découlant d'une étude portant sur les principaux freins à l'électrification des quais au Royaume-Uni.

4.1 ÉLÉMENTS À CONSIDÉRER POUR LE SUCCÈS D'UN PROJET D'IMPLANTATION D'ÉLECTRIFICATION À QUAI

4.1.1 ANALYSE INITIALE

Plusieurs pays ont adopté des règlements ou mis de l'avant des initiatives visant à décarboner l'économie et tendre vers des cibles environnementales ambitieuses. Comme l'électrification des quais peut contribuer de façon notable à ces objectifs, il est opportun d'examiner les leviers financiers (programmes d'aide publics) pouvant être mis à contribution pour soutenir une telle démarche.

4.1.2 SÉLECTION DU TERMINAL

Les ports ne sont pas tous des candidats optimaux pour l'installation d'une alimentation à quai. La situation locale particulière doit donc être soigneusement examinée, à la fois du point de vue des coûts économiques et des avantages environnementaux. Entre autres, il est primordial d'effectuer une analyse du trafic maritime des terminaux pour y identifier une tendance sur le type de navire ainsi que leur puissance d'opération susceptible de profiter d'une alimentation à quai. Il est aussi requis d'examiner la configuration des quais et les options de manœuvre (amarrage/appareillage) pour les navires qui voudraient profiter du service d'alimentation à quai.

4.1.3 UTILISATION DU TERMINAL ET CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Un autre critère de sélection est le niveau d'utilisation du terminal. Plus le terminal est utilisé, plus la consommation d'énergie est importante, plus les bénéfices environnementaux seront importants. Les

navires faisant fréquemment des escales au port, avec de longs séjours au port et des modèles de consommation d'énergie élevés, offrent les meilleures possibilités de réduction des émissions et un meilleur retour sur l'investissement.

Cela implique toutefois que la disponibilité en énergie électrique y soit suffisante.

4.1.4 DISTANCE DES COMMUNAUTÉS LOCALES

Étant donné que la mise en œuvre de projets d'électrification des quais implique souvent des investissements importants, la modélisation de la qualité de l'air devrait être utilisée afin de prioriser les projets d'investissement en fonction de l'impact sur les communautés voisines. Dans les ports de Los Angeles et Long Beach, il n'y a pas de zone tampon entre la communauté locale et le port. L'électrification des quais s'est imposée comme une mesure nécessaire dans le contexte de proximité de la communauté.

De même, au port de Rotterdam, l'électrification des quais a été mise en œuvre au terminal de Stena Line, qui est proche du quartier résidentiel Hoek van Holland. À l'inverse, des recherches [13] ont montré que l'installation d'OPS au terminal Euromax de Maasvlakte 2 ne profiterait pas aux communautés locales, car celle-ci est située en dehors de la région immédiate des impacts sur la qualité de l'air. Les plus grands bénéfices sont à tirer lorsque les terminaux sont situés à proximité des agglomérations.

4.1.5 IMPLICATION DES ARMATEURS

Le succès de l'alimentation à quai dépend également de l'engouement des armateurs à se tourner vers cette technologie. Plusieurs armateurs internationaux ont déjà investi dans la technologie d'électrification à bord de leurs navires. Ceux-ci incluent NYK Line, Evergreen, Princess Cruise, Disney Cruise Line, Cunard Cruise Norwegian Cruise Line, Holland America Line, China Shipping, MOL, Stena Line, Wagenborg, TransAtlantic, SOL, TransLumni, I CL et Cobelfret [13].

Pour le Québec, les principaux armateurs consultés se sont montrés intéressés par l'intégration de cette technologie. Le raccordement des navires leur apporterait des gains à la fois environnementaux et, sous réserve des pratiques tarifaires en place dans les ports, économiques.

4.1.6 LES TERMINAUX À CONTENEURS ONT BESOIN DE PLUSIEURS POINTS DE CONNEXION

Pour les navires comme les pétroliers, les navires de croisières et les navires rouliers qui accostent généralement au même quai, la connexion à terre est plus facile. Aux terminaux de conteneurs, où les navires n'accostent pas toujours au même endroit, il est nécessaire de disposer de plus de points de connexion [13].

4.1.7 COÛT DES MODIFICATIONS

Tel que présenté au Tableau 9, le coût d'adaptation d'un navire pour la connexion à quai dépend à la fois de son type et de son tonnage. Ce coût dépend également de la conception initiale des systèmes électriques du navire et de la possibilité de faire varier la plage de tension et de fréquence. Lors d'un branchement à quai en Amérique du Nord, par exemple, le navire doit posséder un convertisseur de fréquence si ses systèmes fonctionnent à 50 Hz.

Tableau 9
Coût estimé pour la modification (retrofit) de l'alimentation à bord des navires selon leur type et leur tonnage (jauge brute)

Coût d'investissement pour le navire (kUSD)	1000 – 4999 JB	5000 – 9999 JB	10000 – 24999 JB	25000 – 49999 JB	50000 – 99999 JB	≥ 100000 JB
Pétroliers	50 – 350	100 – 400	100 – 400	100 – 400	300 – 750	300 – 750
Citernes de produits chimiques/produits liquides	50 – 350	100 – 400	300 – 750	300 – 750		
Gaziers	50 – 350	300 – 750	300 – 750	300 – 750	300 – 750	300 – 750
Vraquiers	50 – 350	50 – 350	500 – 1000	500 – 1000	100 – 400	
Cargos généraux	50 – 350	50 – 350	500 – 1000	100 – 400		
Porte-conteneurs	50 – 350	50 – 350	100 – 400	300 – 750	300 – 750	300 – 750
Rouliers	50 – 350	50 – 350	100 – 400	100 – 400	300 – 750	

Source : GLOMEEP.

La modernisation d'un navire afin de permettre une connexion à quai haute tension nécessite une évaluation au cas par cas. L'ajout de la technologie de connexion électrique à quai sur un navire existant nécessitera un investissement en capital plus élevé que si l'intégration des composants requis se fait lors de la construction du navire. Selon Schneider Electric, un navire peut être équipé d'une technologie de raccordement électrique à quai pour un montant compris entre 200 000 € et 500 000 € lorsqu'il est en cale sèche pour maintenance. Ce chiffre peut varier considérablement en fonction de la taille et des besoins en puissance du navire [39] [40].

Points saillants

Du point de vue technique, les technologies de branchement à quai sont largement disponibles et éprouvées depuis plusieurs années. La fiabilité et la robustesse des systèmes déployés dépendent alors davantage du choix des composantes et de la configuration de circuit choisie (présentés à la section 3) en fonction des coûts d'implantation.

La seule contrainte technique restante demeure la capacité du réseau électrique existant à fournir suffisamment de puissance aux nouveaux projets d'électrification. Au Québec, puisque la presque totalité

de l'énergie électrique produite est renouvelable, une mise à jour des infrastructures en place s'avère être une des meilleures solutions environnementales. Cependant, dans le cas de certaines provinces ou de certains pays où le réseau de distribution électrique est alimenté par des énergies non renouvelables, ou dans les cas où une mise à jour du réseau électrique représente des investissements trop importants, l'ajout de générateurs directement dans les installations du port peut être considéré. Une étude de cas est présentée au chapitre suivant. L'empreinte écologique de ces générateurs peut alors être réduite en utilisant des carburants alternatifs comme sources d'énergie.

Pour ce qui est de l'implication des parties prenantes, il est primordial que les gouvernements facilitent le déploiement des infrastructures portuaires d'électrification par un soutien à l'investissement et encouragent le branchement à quai pour augmenter le nombre potentiel de connexions. L'objectif est de contribuer à rendre les projets d'électrification économiquement intéressants à la fois pour les administrations portuaires et les armateurs.

La particularité du Québec réside dans le fait qu'une société d'État est le principal fournisseur d'électricité. Ceci pourrait faciliter les échanges avec les gouvernements et permettre un meilleur support financier dans l'implantation des projets d'électrification. En plus d'avoir un effet significatif sur l'environnement, ces projets augmenteront les ventes d'électricité pour Hydro-Québec, ce qui pourrait atténuer les efforts d'investissement.

4.2 L'ÉTUDE DE LA « BRITISH PORTS ASSOCIATION »

La British Ports Association a publié en 2020 un rapport [22] formulant neuf recommandations nécessaires, selon elle, à la réussite de projets d'électrification des quais. Ce rapport fait état, entre autres, qu'une implication de tous les acteurs, mais surtout des gouvernements, est nécessaire pour garantir le succès de tels projets. Le rapport souligne que :

- L'alimentation à quai fera partie d'un ensemble de solutions de réduction des émissions des navires à quai dans les ports britanniques pour l'avenir.
- Il existe des obstacles importants à la mise en œuvre de l'alimentation à quai au Royaume-Uni, avec l'incertitude et les risques liés aux ports et les événements internationaux influençant les activités de manutention des marchandises.
- Le principal obstacle est le coût du capital : aucun projet d'alimentation à quai dans le monde n'a été entrepris sans le soutien du gouvernement. Un fonds maritime vert pour soutenir l'alimentation à quai au Royaume-Uni est clairement nécessaire pour aider à faire face à des coûts prohibitifs, en particulier autour des réseaux et de la production d'énergie.

- Le prix de l'électricité au Royaume-Uni est beaucoup plus élevé que dans d'autres pays où l'alimentation à quai est fournie. La plupart des ports avec fourniture d'électricité à quai bénéficient d'un soutien pour aider à faire de l'électricité une énergie plus compétitive et cela doit être reproduit au Royaume-Uni.
- Il y a un manque de demandes constantes de la part des navires faisant escale au Royaume-Uni pour l'alimentation à quai. Le gouvernement doit s'attaquer à cela. La BPA propose une norme de quai zéro émission pour discussions avec l'industrie et le gouvernement, ce qui augmenterait la demande de technologie de réduction des émissions et fournirait une certitude aux investisseurs. On évoque le besoin de répartir équitablement les coûts de la décarbonation et de la réduction des émissions.

Le principal argument de la British Ports Association est que l'électrification à quai ne peut se faire sans un investissement public dans quatre domaines clés :

- 1) La planification avant-projet et les études de faisabilité.
- 2) Les mises à niveau du réseau ou la production hors réseau.
- 3) L'implantation des infrastructures côtières.
- 4) Les systèmes électriques à bord.

Tableau 10
Recommandations de la British Ports Association

	Recommandation	Responsabilité
Recommandations primaires		
1	Un fonds maritime propre pour soutenir la réduction des émissions dans le secteur maritime. Barrière : coûts d'investissement élevés.	Département des transports.
2	Supprimer les taxes sur l'électricité côtière pour l'aligner sur les carburants marins. Barrière : prix élevé de l'électricité.	Gouvernement.
3	Mesures basées sur des objectifs pour augmenter la demande, comme une norme de quai zéro émission. Barrière : manque de demande cohérente.	Industrie à développer; le gouvernement doit introduire et administrer.
Recommandations secondaires et prochaines étapes		
4	Conseil réglementaire et soutien aux industries maritimes pour la réduction des émissions.	Département des transports.
5	Explorer l'électricité en tant que service comme modèle alternatif potentiel de fournir de l'électricité à quai.	Industrie et le Gouvernement.
6	Un engagement national et international continu à soutenir le développement de l'alimentation à quai et des options plus larges de réduction des émissions.	La BPA, l'industrie et le Gouvernement.
7	Recherche sur la quantification des coûts et des avantages de l'alimentation à quai et des autres options de réduction des émissions, y compris le développement d'un calculateur d'émissions.	Dirigé par le Gouvernement et la BPA.
8	Une revue du système de planification énergétique et de la manière dont il soutient les réductions des émissions des navires.	Dirigé par le Gouvernement et l'industrie.
9	Effectuer plus d'analyses et de recherches sur les demandes actuelles et la modélisation des scénarios des demandes futures.	La BPA et ses partenaires.

Source : British Ports Association.

Comme mentionnés à la section précédente, les projets d'électrification à quai nécessitent des investissements importants et requièrent donc un seuil critique de connexions annuelles pour supporter ces investissements. Il n'est donc pas étonnant que les deux premières recommandations de la BPA proposent une aide financière d'implantation et une réduction de coûts à l'utilisateur pour encourager l'implantation de cette technologie. La BPA va également plus loin lors de sa troisième recommandation où elle propose la mise en œuvre d'une réglementation pour obliger la connexion à quai des navires.

Il est à noter que la BPA n'est pas le seul acteur à recommander une législation sur les activités portuaires pour encourager le nombre de connexions à quai. En effet, la Californie a mis en application le 1^{er} janvier 2014 une loi qui oblige les exploitants de navires (compagnies maritimes) faisant escale dans les ports californiens à éteindre leurs moteurs auxiliaires et se brancher au réseau électrique lorsqu'ils sont à quai. Les flottes, depuis 2014 et de façon progressive, doivent obligatoirement se brancher pour respecter la réglementation en place (Tableau 11).

Tableau 11
Pourcentage des visites de la flotte devant utiliser l'alimentation à quai dans chaque port californien

Shore Power Regulation (% des visites de la flotte dans chaque port californien)	
2014-2016	50%
2017-2019	70%
2020+	80%

Source : Port of Long Beach.

De plus, si un navire est actuellement équipé pour l'alimentation à quai et qu'un poste d'amarrage prêt pour l'alimentation est disponible, le navire doit se brancher sur l'alimentation à quai. Le règlement s'applique aux porte-conteneurs, aux navires frigorifiques et aux navires de croisières. En vertu du règlement, les ports de Long Beach et de Los Angeles sont considérés comme un seul port avec une seule flotte. Le port de Long Beach a construit l'infrastructure côté terre. Les compagnies maritimes sont responsables des modifications à bord des navires.

Les exploitants de navires s'exposent à des sanctions financières s'ils ne se conforment pas au règlement. Les sanctions sont énoncées dans la section 42400 du *Code californien sur la santé et la sécurité*. Elles vont, selon les circonstances, de 1 000 \$ à 75 000 \$ par infraction.

Outre l'exemple californien, les expériences d'électrification des quais dans d'autres ports du monde peuvent s'avérer intéressantes à considérer avant un éventuel engagement plus ferme du Québec dans cette voie. Le Tableau 12 met en évidence les recommandations et les facteurs de succès relevés dans une dizaine de grands ports du monde. Les nécessaires études préalables d'achalandage, la communication avec les armateurs et l'importance d'un prix d'électricité stable et prévisible apparaissent comme des points importants.

Tableau 12
Recommandations et facteurs de succès

Ports	Recommandations à un port qui envisage d'installer un système d'alimentation	Si vous deviez réinstaller un système OPS, qu'auriez-vous fait différemment ?	Facteurs de succès
Vancouver	<p>Subventions gouvernementales nécessaires.</p> <p>Un taux d'utilité favorable est essentiel.</p> <p>Planification pour obtenir le retour sur l'investissement de l'installation du système de l'alimentation à quai.</p> <p>Le port insiste sur le fait qu'il est très important de vérifier que les porte-conteneurs qui doivent être connectés aux installations d'alimentation disposent des systèmes compatibles.</p>	<p>Installer des systèmes d'enrouleurs de câbles mobiles au terminal de croisière en raison de la variété des tailles de navires de croisière et du terminal encombré.</p> <p>Installer plus de fosses à réceptacles dans l'un des terminaux à conteneurs (il y en a actuellement 2, 3 serait optimal).</p>	<p>Tarif d'électricité prévisible et favorable sécurisé avec le fournisseur de services publics.</p> <p>Tirer parti des projets d'expansion des terminaux et installer des conduits de câbles des sous-stations terminales à la face d'accostage en anticipant les alimentations à quai.</p> <p>Négociation de contrats avec les opérateurs de terminaux pour l'assistance à la construction et l'exploitation future du système d'alimentation.</p> <p>Communication des projets d'alimentation avec le public pour gagner du soutien et augmenter la pression sur les opérateurs de terminaux pour une installation au bon moment.</p>
Seattle	<p>Système de gestion des câbles flexible qui permet aux navires de se connecter dans plusieurs configurations.</p> <p>Assurez-vous d'utiliser un équipement de connexion standard de l'industrie qui s'aligne avec la majorité des clients.</p> <p>Engager le service public pour développer des structures tarifaires qui incitent les navires à se brancher.</p>		<p>Engager le fournisseur de services publics tôt et travailler en étroite collaboration avec les compagnies de croisières.</p>
Los Angeles	<p>Coordonner avec les armateurs toutes les dispositions possibles d'alimentation des navires (normalisation).</p> <p>Déterminer les points de connexion qui pourraient accueillir la plupart des navires.</p>	<p>Plus de point de connexion pour être plus flexible.</p> <p>Mettre en œuvre le boîtier de prise mobile d'alimentation le long du quai.</p>	<p>Au début du déploiement de "Schneider" PL SCADA où le PLC surveille presque tous les points d'intérêt électriques comme l'état du disjoncteur, l'état des défauts et génère des historiques d'événements.</p>

Ports	Recommandations à un port qui envisage d'installer un système d'alimentation	Si vous deviez réinstaller un système OPS, qu'auriez-vous fait différemment ?	Facteurs de succès
Zeebrugge	L'installation d'alimentation à quai n'est économiquement viable que si elle est beaucoup utilisée.		
Kristiansand	Le port a besoin de personnel électrotechnique compétent. Évaluer la mise en œuvre avec un calcul économique et intégrer certains risques. Commencer avec un groupe sélectionné de navires, par exemple conteneurs ou vrac.		Personnes au port ayant une connaissance de l'alimentation à quai qui entretiennent un dialogue étroit avec les navires en correspondance.
New York et New Jersey	Négocier un tarif d'électricité avantageux.		Partenariat avec les armateurs.
Hambourg	Utilisation de la CEI/IEEE 80005-1. Standardisation. Travailler ensemble sur un pied d'égalité. Travailler sur un modèle de facturation standardisé. Un seul visage pour le client.	Systèmes de traçage automatique des marées (en tenant compte des navires de croisière). Mesure de consommation intelligente. Connexions flexibles, par ex. croisière convient également aux navires d'expédition.	Proposer un prix un peu moins cher en raison des dépenses d'investissement de capital.
Stockholm	Il est difficile de rendre une installation économiquement viable. Recherche de financement pour les installations. Inclure les coûts des installations dans les frais de port.	Avoir un dialogue actif, continu et constructif avec les armateurs et les autres ports concernés dès le départ. Un processus d'approvisionnement commun pour les installations à venir.	Un dialogue actif, continu et constructif avec les compagnies maritimes et les autres ports concernés.
Ystad	Avoir un bon dialogue avec les opérateurs (navires).		Avoir un convertisseur de fréquence dans le port et non sur chaque navire.

Sources : CENIT, World Ports Climate Action Program.

Du côté des armateurs, la même étude rapporte que c'est pour beaucoup des questions financières qui limitent l'électrification des navires. Le coût et le retour sur l'investissement apparaissent comme les deux principaux obstacles.

Tableau 13
Principaux obstacles pour l'implantation d'un système de raccordement sur les navires

Le coût	37%	Compétition avec d'autres solutions	4%
Le temps de retour sur investissement	22%	La disponibilité des ports avec l'alimentation à quai	15%
Le temps d'arrêt pour adapter les navires	3%	Les navires en transit	4%
Le manque d'incitatifs	11%	La réglementation	4%

Sources : CENIT, World Ports Climate Action Program.

5 COÛTS ET BÉNÉFICES ASSOCIÉS À L'ÉLECTRIFICATION DES QUAIS

Il n'est pas aisé d'évaluer les coûts associés à l'électrification des quais ou des navires. De fait, plusieurs facteurs peuvent avoir des incidences importantes sur les coûts. Seules des analyses détaillées, au cas par cas, peuvent permettre d'avoir des estimations justes. L'étude de cas apparentés peut cependant permettre d'apporter un éclairage quant aux investissements requis, tant pour les ports que les armateurs, pour mettre en place les technologies d'électrification. Dans cet esprit, cette section présente différents cas de travaux d'électrification réalisés sur des navires ou dans des ports. Son objectif est de mettre en évidence, par des exemples concrets, les coûts et les bénéfices associés à l'électrification.

La seconde partie du chapitre présente les résultats d'une analyse visant à estimer les gains environnementaux globaux (GES) dans l'hypothèse de l'électrification des quais et des navires opérant aux ports de Montréal, Québec et Trois-Rivières.

5.1 ÉTUDES DE CAS

5.1.1 ÉLECTRIFICATION D'UN NAVIRE MARCHAND : LA MISE À JOUR DU *HAFNIA LISE*

Description du navire

Figure 31
M/T Hafnia Lise manœuvrant dans le fleuve Saint-Laurent



Source : Green Ship of the Future.

Le *M/T Hafnia Lise* est un pétrolier de la classe MR (Medium Range) de 183 m de long par 32,26 m de large, construit en 2016 au chantier naval de Guangzhou, en Chine. Le navire est classé glace + 1A1.

Tableau 14
Modèle commercial du *Hafnia Lise*

Jours de charge	131 jours/an	36%
Jours de ballast	47 jours/an	13%
Jours à quai	172 jours/an	47%
Jours d'inactivité	15 jours/an	4%

Source : Green Ship of the Future.

L'alimentation CA est fournie par les moteurs auxiliaires et les générateurs d'arbre du navire en mer. Il est souhaité, à quai, de se connecter à une source d'alimentation CA pour permettre de déconnecter électriquement les générateurs auxiliaires et désactiver les moteurs auxiliaires du navire. Cela pour permettre d'économiser du carburant, des heures de fonctionnement et la maintenance des générateurs et moteurs auxiliaires du navire. Cela doit être fait sans interrompre l'alimentation des divers composants électriques du navire. Pour le port (et la communauté locale), toutes les émissions pendant le séjour au port sont éliminées lors de l'utilisation de l'alimentation à quai.

Il est nécessaire de convertir l'alimentation à quai pour une utilisation à bord du navire et également de transférer l'alimentation principale du navire à l'alimentation à quai CA sans interrompre l'alimentation des composants électriques à bord du navire. Un convertisseur placé à bord peut être utilisé pour ces différents besoins.

Notons que peu de ports offrent une alimentation à quai aux pétroliers, en raison du risque d'incendie. De plus, le coût de l'installation, qui doit pouvoir fonctionner dans un environnement explosif, est un frein. Le port de Long Beach (États-Unis) est l'un des rares ports au monde à proposer une alimentation à quai aux pétroliers, prouvant qu'il est possible de rendre l'alimentation à quai disponible dans l'environnement d'un terminal pétrolier.

Économies d'énergie basées sur les calculs de base

En ce qui concerne le *Hafnia Lise*, le coût de l'alimentation à quai doit être inférieur à 0,11 USD/kWh (soit environ 0,14 CAD/kWh au moment de l'étude), ce qui est le prix de revient moyen pour produire de l'électricité sur le *Hafnia Lise* (en ne tenant compte que du coût du carburant sans les coûts de maintenance). L'utilisation de l'alimentation à quai réduira les coûts d'entretien des moteurs auxiliaires, réduira le niveau de bruit à bord et réduira les émissions dans le port et les zones environnantes.

Les calculs sont faits à partir de la charge électrique théorique (calculée lors de la construction du navire) nécessaire pour le séjour au port et pour le déchargement.

Le coût estimé pour la mise en œuvre de l'alimentation à quai sur un pétrolier MR de la taille du *Hafnia Lise* est compris entre 300 000 \$ et 750 000 \$ US (voir Tableau 9).

Tableau 15
Résumé des données de l'étude

CONDITIONS PRÉALABLES	
Charge électrique en attente au port	491 kW
Charge électrique - période de déchargement	2 373 kW
Prix moyen de l'alimentation à quai des ports américains	0,10 USD/kWh
Prix moyen de l'alimentation à quai des ports canadiens	0,10 CAD/kWh
Prix DMA 0,1 %	638 USD/mt
Coût d'entretien par génératrice auxiliaire	0.26 USD/h
Génératrice auxiliaire en cours de fonctionnement pendant l'attente au port	1 unité
Générateurs auxiliaires fonctionnant pendant le déchargement	3 unités
ÉCONOMIES FINANCIÈRES	
Port américain	
Séjour portuaire, incl. économies de maintenance	≈ 350 USD/jour
Déchargement, incl. économies de maintenance	≈ 1 500 USD/jour
Port canadien	
Séjour portuaire, incl. économies de maintenance	≈ 650 USD/jour
Déchargement, incl. économies de maintenance	≈ 2 900 USD/jour
RÉDUCTION CO2	
Séjour au port	≈ 7,5 tonnes/jour
Déchargement	≈ 36 tonnes/jour

Source : Green Ship of the Future.

Note : Un prix du carburant de 638 USD/mt a été utilisé pour calculer le retour sur investissement. Celui-ci est sujet à des changements en fonction de la fluctuation du prix du carburant.

Considérant les hypothèses suivantes :

1. 70 % du temps à quai est utilisé pour le déchargement
2. 30 % du temps à quai est utilisé pour un séjour portuaire
3. Le temps à quai est réparti à 50 % aux ports canadiens et 50 % aux ports américains

Le retour sur l'investissement serait obtenu en un peu plus d'un an pour un investissement de 300 k\$ et un peu plus de trois ans pour un investissement de 750 k\$.

5.1.2 ÉLECTRIFICATION D'UN QUAI : LE CAS DU TERMINAL DE CROISIÈRES DE WHITE BAY, BALMAIN, AUSTRALIE

Bien que ce projet d'électrification ne soit pas encore réalisé, des données de l'étude [27] permettent de faire un comparatif avec ce qui devrait être pris en compte pour un projet d'électrification à quai d'un système haute tension au Canada.

Résumé de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité visait entre autres l'installation :

1. D'une sous-station électrique entre le réseau électrique du fournisseur Ausgrid à 33 kV et les points de connexion à quai à un maximum de 11 kV.
2. D'un convertisseur de 50 Hz à 60 Hz.
3. 21 points de connexion aux quais 4 et 5 du terminal de croisières du port avec un espacement d'environ 25 m entre chaque point sur une distance totale de 625 m. Ceci correspond à quatre fois plus de points de connexion que la majorité des ports pour une même distance de quai.

La capacité de la connexion à quai est définie à une puissance maximum de 12 MW ou l'équivalent d'une charge de 15 MVA en assumant que le facteur de puissance est de 0,8.

Parmi les hypothèses avancées dans l'étude, il est considéré que les équipements d'électrification des quais ont une durée d'opération de 20 ans. La compilation des spécifications des navires accostant au terminal démontre que deux niveaux de tension de connexion sont utilisés, soit 6,6 kV et 11 kV.

Le coût de la conception et de l'installation de l'équipement d'alimentation à quai sur le site a été estimé entre 10 et 12 millions de dollars australiens (9,4 à 11,3 M\$ canadiens). Le coût couvre les éléments de conception et d'installation suivants :

- Conception globale du système en fonction du site WBCT.
- Tableau d'arrivée 33 kV pour la terminaison et la commutation du câble Ausgrid 33 kV.
- Transformateur 33 kV/11 kV ou 33/6,6 kV 15 MVA comme entrée de l'équipement de conversion de fréquence.
- Équipement de conversion de fréquence statique triphasé, y compris IGBT (transistors bipolaires à grille isolée), régulateur de tension et système de contrôle.
- Transformateur de sortie à tension variable de 15 MVA pour la connexion à l'alimentation électrique du navire amarré.

Les coûts totaux pour l'installation à quai sont estimés autour de 25 M\$ australiens (23,5 M\$ canadiens).

Tableau 16
Résumé des coûts globaux de l'installation d'alimentation à quai au White Bay Cruise Terminal
(en \$ australiens)⁸

Items	Coûts	Commentaires	Notes
Frais de conception Ausgrid	200 000 \$		1
Conception d'une connexion par câble de 33 kV entre le point de connexion désigné par Ausgrid et le site WBCT	400 000 \$	À ce stade, aucune mise à niveau du poste de Rozelle ne semble nécessaire pour ce projet.	1
Coût pour la fourniture et l'installation du câble 33 kV	5 à 7M\$	Installation selon la norme de réseau Ausgrid NS168. Le coût couvre les éléments de conception et d'installation suivants : fourniture de 2,5 à 3,5 km de câble souterrain de 33 kV, selon le choix du tracé.	1
Coût de la conception et de l'installation de l'équipement d'alimentation à quai sur le site	10 à 12 M\$	Prix budget de Siemens, ABB et Schneider.	2
Coût de la conception et de l'installation du système de connexion par câble navire-terre	2 à 3 M\$	Prix budget de Siemens et Schneider.	3
Gestion de projet	2,9 M\$	Préparation du cahier des charges, attribution du contrat et gestion du projet.	
Contingence du projet	10%	Typique pour un projet de cette nature.	
Coût budgétaire total	23 M\$ – 28 M\$	Suggérer une marge de +30 %/-10 % (voir note 2 ci-dessous).	

Note 1 : Ces coûts peuvent être différents par rapport à d'autres fournisseurs d'électricité.

Note 2 : Incluant le coût d'un convertisseur de fréquence de 50 Hz à 60 Hz (non requis en Amérique du Nord).

Note 3 : Ce coût peut varier légèrement si l'on y inclut d'autres soumissionnaires tel que Watts Marine et Cavotec.

Source : NAVARI.

L'étude de faisabilité comprend le coût d'un convertisseur de fréquence de 50 Hz à 60 Hz. Cet élément n'est pas nécessaire pour une installation nord-américaine, car le réseau électrique d'Hydro-Québec est déjà à 60 Hz. Il faut noter que le convertisseur représente habituellement près de 50 % des frais d'appareillage d'un système d'alimentation à quai. En plus, l'étude prévoit l'installation de 21 points de connexion pour les deux quais, ce qui est un nombre inhabituellement très élevé.

Rappelons que les investissements requis pour l'installation de l'alimentation à quai au port de Montréal (Grand Quai, terminal de croisières) ont été de l'ordre de 11 M\$. Le port de Québec avait quant à lui examiné l'opportunité d'investir dans une telle technologie. On rapporte que les investissements requis

⁸ 1 \$ australien = 0,94 \$ canadien.

auraient été de 13 M\$ [36]. Ces chiffres sont cohérents avec ceux rapportés de l’Australie (Tableau 16) en considérant qu’un convertisseur de fréquence n’est pas requis au Québec.

5.1.3 BASSE OU HAUTE TENSION : LE CAS DU PORT DE GÄVLE

Cette étude [29] discute des gains et des coûts d’un système d’alimentation électrique pour un terminal de conteneurs au port de Gävle, un des plus importants ports de Suède pour les porte-conteneurs, mais aussi les navires-cargo, les rouliers, les navires-citernes et les navires de croisières. Il faut noter que le port de Gävle ne peut accueillir des navires de plus de 42 mètres de largeur et 12,20 mètres de tirant d’eau en raison de ses configurations actuelles.

La comparaison des systèmes de connexion haute tension (HVSC) et basse tension (LVSC) y est faite pour des puissances moyennes à quai comprises entre 225 et 410 kW. Un sondage technique a cependant révélé que des pointes de demandes pouvaient s’élever jusqu’à 850 kW de manière répétée. Avec ce profil de charge, des points de raccordement de 1 000 kW (1250 kVA) ont été définis.

En raison de cette puissance nécessaire, une connexion haute tension à 6,6 kV est préférée à une connexion basse tension. En effet, une connexion basse tension aurait nécessité un nombre de câbles supérieur aux recommandations de la norme IEC/IEEE 80005-3. L’étude rapporte aussi que les connexions à quai basse tension sont relativement récentes et moins standardisées.

Il est cependant important de préciser que la majorité des porte-conteneurs faisant escale sont alimentés via un réseau de distribution basse tension (400 ou 440 V). La configuration d’électrification choisie à quai oblige donc tous les navires à se doter d’un transformateur de puissance haute tension à basse tension. Comme discuté dans une section précédente, cet ajout n’implique cependant pas d’investissement majeur additionnel du fait qu’un seul connecteur est nécessaire, ce qui réduit le temps de branchement/débranchement et peut être rentabilisé assez rapidement.

Des comparaisons ont permis également d’identifier que le coût de mise à jour des navires restait sensiblement le même qu’il s’agisse de haute ou de basse tension.

Enfin, en considérant un coût de carburant à 500 \$/tonne et un coût d’électricité à 0,70 SEK/kWh (0,09 CAN/kWh), l’étude conclut qu’un système d’alimentation électrique à quai peut faire baisser les coûts énergétiques jusqu’à 71 %. Cette réduction de coût tient compte de la diminution de la puissance requise par les navires lors du raccordement à un réseau électrique en raison de l’arrêt du ou des moteurs auxiliaires et de leurs systèmes de refroidissement. Cette réduction de puissance est estimée à 40 % de la puissance normalement fournie par le navire.

5.1.4 BASSE OU HAUTE TENSION : LE CAS DU PORT DE ROTTERDAM

Cette étude [28] porte sur une analyse comparative de type SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities & Threats) entre l'alimentation à quai « Shore Side Electricity (SSE) » et l'utilisation de génératrice mobile de type conteneur fonctionnant au GNL (Becker LNG PowerPac) qui est chargée à bord. De plus, l'étude compare les options techniques d'alimentation à quai à haute et basse tension.

Il apparaît que l'investissement majeur dans l'achat d'un convertisseur de fréquence de 50 Hz à 60 Hz est identifié comme une faiblesse importante du fait que la grande majorité des réseaux électriques des porte-conteneurs fonctionnent sur le 60 Hz. Malgré cette faiblesse, l'alimentation à quai ressort comme la solution la plus viable comparativement à l'utilisation de la génératrice au GNL. Rappelons que la fréquence du réseau électrique au Québec et en Amérique du Nord est déjà à 60 Hz, l'investissement dans un convertisseur de fréquence n'est pas nécessaire pour alimenter à quai les porte-conteneurs.

Pour déterminer quelle option technique d'alimentation est à recommander, l'étude se réfère aux réalisations des ports de Los Angeles et Long Beach aux États-Unis, des ports de Shanghai, Shenzhen, Dalian et Nansha en Chine et des ports de Göteborg, Hoek van Holland et Rotterdam en Europe ainsi que la consommation moyenne des porte-conteneurs avec et sans conteneurs réfrigérés. En conclusion, il ressort qu'une installation complètement basse tension n'est pas viable pour fournir les puissances supérieures de 1000 kW consommées par l'ensemble des navires lors des opérations à quai. Les pertes énergétiques sont, de fait, plus importantes à basse tension pour des puissances élevées.

Ceci s'explique par le fait que les pertes joules des conducteurs sont égales à la résistance des câbles multipliée par le carré du courant qui y circule. Pour la même puissance, en augmentant d'un facteur de 10 la tension, les pertes sont réduites d'un facteur de 100 (courant 10x plus petit). Il est alors possible de réduire le nombre de câbles et leur grosseur. Un consensus à une tension de 6,6 kV ressort comme une option idéale, telle que présentée dans la norme IEEE 80005-1. En effet, cette norme prescrit deux tensions d'alimentation pour les connexions haute tension, soit 6,6 kV et 11 kV. Puisque la majorité des puissances requises demeurent sous la barre des 10 MVA, une tension de 6,6 kV semble toute désignée pour ces applications.

Une autre étude de cas présentée par Great Lakes Maritime Research Institute [25] sur l'amélioration de l'efficacité de deux vraquiers autodéchargeurs opérant sur les Grands Lacs démontre qu'une alimentation basse tension n'est pas suffisante pour supporter la puissance requise lors des opérations de déchargement. En effet, sur les navires étudiés, une connexion de raccordement est prévue à 450 Vca pour alimenter les navires lors de leurs escales. Or, les puissances requises lors des opérations de déchargement sont

respectivement de 3 160 kW et 1 714 kW, nécessitant donc un nombre de connecteurs supérieurs aux requis des normes IEC/IEEE 80005-3 pour respecter les courants maximums permis.

Une connexion haute tension respecterait les normes en vigueur en plus de faciliter grandement les opérations de raccordement avec seulement un ou deux connecteurs.

Il est à noter que les connexions haute tension sont déjà utilisées pour l'électrification des navires de croisières et les porte-conteneurs, qui semblent avoir adopté ce standard.

5.1.5 UN MODÈLE DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN COGÉNÉRATION : LE CAS DU PORT D'ANCÔNE EN ITALIE

Cette étude de 2020 [17] visait à évaluer l'impact technique et économique de deux scénarios (1,5 MW et 2 MW) d'utilisation d'une centrale thermique terrestre au gaz naturel pour la génération d'électricité en cogénération. L'analyse sur un an démontre que 83 % à 92,5 % des besoins en électricité à quai des navires peuvent être couverts tout en fournissant de 61 % à 74 % des besoins thermiques des 14 bâtiments autour du port pour la même période.

En plus d'avoir une efficacité accrue, les centrales thermiques terrestres au gaz naturel permettent une réduction significative des GES comparativement à la même puissance électrique générée par les unités auxiliaires des navires, en plus de fournir en grande partie les besoins thermiques des bâtiments par la récupération de chaleur de la centrale. Cela améliore nettement le bilan énergétique de l'installation.

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- En matière d'énergie, le scénario A (1 560 kW) utilise une quantité de carburant inférieure au scénario B (2 000 kW) par leur puissance respective délivrée.
- Le scénario B permet une alimentation complète en électricité des installations pendant trois mois par an, contre seulement un mois pour le scénario A, grâce à la plus grande quantité d'électricité produite.
- Le scénario B satisfait mieux la demande thermique des bâtiments (74,55 %) par rapport au scénario A (61,18 %).
- Du point de vue économique, le scénario B permet une valeur actuelle nette supérieure avec un retour sur investissement plus faible.

De plus, la faisabilité du point de vue des compagnies maritimes a été démontrée, avec des économies annuelles d'environ 850 000 euros (1 240 000 \$⁹), soit environ 59 % des coûts actuels. Cette économie de l'ordre de 40 % s'explique principalement en raison du coût d'électricité et du coût de chauffage au moment de l'étude au port d'Ancône.

5.1.6 ESTIMATION DES BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX : LE CAS DU PORT DE VANCOUVER

En 2009, avec un système de Cochran Marine, le terminal de croisières situé à la Place du Canada est devenu le premier terminal au Canada et le troisième au monde à proposer des installations d'alimentation à quai pour les navires de croisières. En 2013, un point de raccordement supplémentaire a été installé dans le but de faciliter davantage les branchements.

Depuis 2009, les installations d'alimentation à quai destinées aux navires de croisières dans le Port de Vancouver ont permis d'éliminer 685 tonnes de polluants atmosphériques et 25 206 tonnes de gaz à effet de serre (Tableau 17).

Tableau 17
Réductions des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre par escale*

Économies de carburant	16,0 tonnes
Réductions nettes d'émissions de gaz à effet de serre (CO ²)	50,6 tonnes
Réduction des aérocontaminants importants**	1,1 tonne

* Par escale, grâce à l'utilisation de l'alimentation à quai au terminal de croisières du Port de Vancouver. Estimations basées sur un navire de 110 000 tonneaux de jauge brute muni d'un moteur de niveau II, à quai pendant 10 heures.

** Les aérocontaminants importants comprennent les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les particules solides fines, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et l'ammoniac. L'alimentation à quai est également offerte aux navires porte-conteneurs au terminal de conteneurs Centerm et à Deltaport, le plus important terminal de conteneurs au Canada.

Source : Port de Vancouver.

Le terminal de porte-conteneurs a été plus tard doté d'équipements d'électrification à quai. Les prévisions de réduction d'émissions atmosphériques (par escale) sont présentées au Tableau 18.

⁹ Selon le taux de change actuel

Tableau 18
Réductions prévues des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre*

Économies de carburant	30,7 tonnes
Réductions nettes d'émissions de gaz à effet de serre (CO2)	94,6 tonnes
Réduction des aérocontaminants importants**	1,4 tonne

*Par escale, grâce à l'utilisation de l'alimentation à quai au terminal de conteneurs du Port de Vancouver. Estimations basées sur un navire d'une capacité de 8 500 équivalents vingt pieds (EVP) muni d'un moteur de niveau II, à quai pendant 60 heures.

**Les aérocontaminants importants comprennent les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les particules solides fines, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et l'ammoniac.

Source : Port de Vancouver.

L'administration portuaire Vancouver Fraser a appliqué la norme internationale IEC/ISO/IEEE 80005-1 2012-07 pour les systèmes de connexion à quai haute tension (HVSC : High Voltage Shore Connection) pour ses installations d'alimentation à quai. Les exigences générales pour les raccordements aux services publics au port de Vancouver sont les suivantes :

- Tensions et fréquences
 - Tension nominale de fonctionnement de l'alimentation à quai : triphasé 6,6 kV CA.
 - Au point de connexion, en regardant la face femelle/connecteur, la séquence de phase doit être conforme à la norme internationale IEC/ISO/IEEE 80005-1 2012-07, annexe D.
 - Fréquence d'opération : la fréquence côté quai est de 60 Hz (notez qu'il ne s'agit pas d'une double fréquence 50/60 Hz, car seulement 60 Hz sont requis pour les navires faisant escale dans la région du nord-ouest du Pacifique).
- Prises de courant
 - La conception, les dimensions, la disposition générale et les caractéristiques nominales d'une prise d'alimentation sont décrites dans la CEI 62613-1 : 2001 et la CEI 62613-2 : 2001 : fiches, prises de courant et coupleurs de navire pour systèmes HVSC.
 - Chaque chambre de connexion AMP — HVSC côté quai dispose de deux sorties.
 - Deux câbles d'alimentation haute tension parallèles comprenant chacun trois conducteurs sous haute tension, trois conducteurs pilotes et un conducteur de continuité des masses (terre) doivent être utilisés pour les systèmes HVSC jusqu'à une puissance maximale appelée de 7,5 MVA.
 - CEI 62613-1 : le courant nominal du circuit de quai de la prise de courant est de 16 kA/1 s et un courant de crête maximal du circuit de quai de 40 kA.
 - Le système de gestion des câbles doit être situé à bord du navire.

Un tarif d'électricité juste et compétitif fait partie intégrante de l'adoption et de la croissance réussie de la technologie d'alimentation à quai.

BC Hydro a établi un tarif non ferme pour l'alimentation à quai (le supplément tarifaire 86 (TS 86)), pour les navires admissibles (y compris les porte-conteneurs, les navires de croisières, les vraquiers et autres navires de haute mer). Ce tarif permet aux opérateurs de terminaux de fournir une alimentation à quai à un coût d'électricité unitaire prévisible (c'est-à-dire sans incertitude de coût unitaire résultant de la présence d'une surcharge sur le réseau comme dans les autres secteurs industriels).

Il n'y a pas de frais de demande dans TS 86 — les navires sont facturés pour la consommation d'énergie mesurée uniquement, plus des frais administratifs nominaux (exemple : dans la catégorie de consommation 1891, on a 0,10158 CAD/kWh + 150 CAD/mois).

Principaux constats tirés des études de cas

Les études de cas ont permis de mettre en lumière des éléments importants liés aux projets d'électrification des quais. Les principaux éléments à retenir sont les suivants :

- Pour certains navires, leur temps à quai peut représenter une portion importante de leur temps d'opération. Une électrification à quai soutenue par des sources d'énergie renouvelable peut donc diminuer de manière importante les émissions totales de GES.
- Malgré le fait que l'installation d'un système de raccordement à quai sur un navire peut nécessiter un investissement important, si les coûts d'électricité disponibles sont favorables, un tel système peut rapidement être rentabilisé au bout de quelques années. La rentabilité est cependant dépendante des pratiques tarifaires adoptées par les ports, notamment pour les services de branchement/débranchement.
- Les terminaux de croisières et de porte-conteneurs électrifiés au port de Vancouver permettent d'économiser d'importantes quantités de carburant. Ces terminaux sont alimentés en haute tension (6,6 kV) à 60 Hz. Des tarifs d'électricité compétitifs basés uniquement sur la quantité consommée et non sur les surcharges demandées au réseau permettent une bonne pénétration de cette technologie.
- Afin d'optimiser sa production en électricité, le port d'Ancône en Italie a évalué un scénario d'implantation de centrales thermiques par cogénération. Les résultats de l'étude démontrent qu'en plus de fournir 1,5 MW électrique, la centrale permettrait de répondre à plus de 60 % des besoins en chauffage des installations. Cela se traduit par une diminution de près de 59 % des coûts actuels d'énergie pour l'électricité et le chauffage des 14 bâtiments du port. Dans l'étude, ces centrales

sont alimentées par du GNL, mais des carburants alternatifs pourraient être utilisés afin de diminuer l'impact environnemental.

- Le terminal de croisières de White Bay en Australie présente un cas d'électrification de deux quais à haute tension pour une puissance totale de 15 MVA. Le coût de réalisation de ce projet est évalué à environ 25 M\$ canadiens. Il est à noter que ce coût inclut un convertisseur de fréquence de 50 à 60 Hz au coût d'environ 12 M\$ canadiens, non requis pour un projet d'électrification en Amérique du Nord, et 21 points de connexion sur les deux quais espacés à tous les 25 m.
- Des études comparatives entre l'efficacité basse tension et haute tension semblent démontrer que pour des consommations de puissance de navire supérieures à 1 000 kVA, des installations de connexion haute tension permettent de diminuer les pertes dans les câbles en diminuant le courant y circulant et seraient donc à privilégier.
- Une tension d'alimentation à 6,6 kV semble faire consensus pour des puissances variant de 1 MVA à 10 MVA. Cette plage de puissance des porte-conteneurs serait applicable aux cargos et aux vraquiers autodéchargeurs.
- Pour des puissances inférieures à 1 000 kVA, les coûts d'installation basse tension seraient probablement inférieurs à ceux d'un système haute tension. Il faut cependant noter qu'un système basse tension engendre plus de pertes énergétiques lors de l'alimentation à quai et est limité dans la variété des navires pouvant s'y raccorder. Ces deux derniers éléments diminuent la rentabilité des installations à long terme et doivent impérativement être considérés lors de l'élaboration d'une solution basse tension.
- Les coûts de mise à jour des navires restent sensiblement les mêmes pour un réseau haute tension ou basse tension.

5.2 ESTIMATION DES GAINS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS POUR TROIS PORTS DU QUÉBEC

L'exercice qui suit est basé sur une approche théorique. Il vise à estimer les gains environnementaux potentiels (réduction des GES) qui pourraient découler de la mise en place dans les ports et son adoption par les armateurs d'un service d'alimentation à quai à Montréal (Tableau 19), Québec (Tableau 20) et Trois-Rivières (Tableau 21). Les résultats sont théoriques mais permettent d'avoir une estimation des retombées environnementales potentielles dans chacun des ports.

Aux fins de l'exercice, l'année 2019 a été utilisée comme période de référence. À partir des données AIS¹⁰ des navires, pour chacun des ports et chacun des types de navires, le nombre d'escales et la durée moyenne de chacune de celles-ci ont été extraites. Toutes les escales de moins de 90 minutes (soit l'hypothèse de temps maximum de branchement/débranchement des navires) ont été exclues. Cette première étape a permis d'estimer le temps total à quai des navires qui auraient pu théoriquement se brancher à quai. De cette durée, on soustrait 90 minutes pour chaque escale, soit le temps théorique retenu pour procéder au branchement et au débranchement des navires. Le résultat permet d'obtenir le total des heures de branchement. La demande en puissance moyenne des différents types de navire est tirée du Tableau 5 (page 38).

On pose les hypothèses suivantes pour faire les estimés :

1. Les flottes domestiques et étrangères avaient des profils de besoins énergétiques semblables à celles naviguant dans le monde (Tableau 5).
2. Tous les navires étaient propulsés au diesel marin (MDO)¹¹.
3. On considère que la consommation énergétique des navires reste la même lorsqu'on passe d'une alimentation venant du carburant vers une alimentation venant du réseau électrique à quai.
4. La relation moyenne entre la consommation de carburant et les émissions de GES est constante entre les différentes flottes et est estimée à 0,7 Kg de GES par kWh d'énergie électrique produite à quai [38].
5. Le coût d'achat du kWh auprès d'Hydro-Québec pour les armateurs est fixé à 0,10 \$¹². Ce coût est similaire à celui de BC Hydro pour la tarification de l'électrification à quai.
6. Le coût de revient d'un kWh produit à partir de carburant fossile est estimé à 0,15 \$¹³ au moment de l'étude.

Les tableaux présentent des scénarios pour lesquels 25 %, 50 % et 75 % des différents types de navire utiliseraient l'alimentation à quai.

¹⁰ AIS : Système d'identification automatique des navires.

¹¹ Cette hypothèse est, c'est connu, pas tout-à-fait exacte. Une part des navires utilise des carburants alternatifs (GNL, biocarburants, etc.) moins dommageables pour l'environnement.

¹² Il faut noter que des frais de services liés à l'utilisation de l'alimentation électrique peuvent aussi s'ajouter au coût de l'électricité. Les pratiques diffèrent d'un port à l'autre.

¹³ Cette estimation est liée au coût du carburant sur les marchés mondiaux et peut varier de façon notable selon la situation économique et politique.

Tableau 19
Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Montréal

	Durée totale des ecales (h)	Total des heures branchées ² (h)	Demande de puissance moyenne (kWh)	Total de la demande de puissance (kWh)	Gain potentiel tonnes de GES ^{1,3} (total)	Gain potentiel GES (tonnes)			Coût total énergie avant alimentation à quai	Économies sur production d'électricité	Potentiel de revenus pour Hydro-Québec ³
						25 % des escales	50 % des escales	75 % des escales			
Cargo général/vraquier											
	20641,9	20412,4	300	6123732,5	4286,6	1071,7	2143,3	3215,0	918 560 \$	306 187 \$	612 373 \$
	34155,8	32588,3	300	9776487,9	6843,5	1710,9	3421,8	5132,7	1 466 473 \$	488 824 \$	977 649 \$
Croisières	2226,0										
Moins de 200 m	1640,0	1538,0	4100	6305981,1	4414,2	1103,5	2207,1	3310,6	945 897 \$	315 299 \$	630 598 \$
Entre 200 et 300 m	586,0	548,5	7500	4113554,2	2879,5	719,9	1439,7	2159,6	617 033 \$	205 678 \$	411 355 \$
Navire-citerne											
	49067,0	47426,0	1400	66396343,2	46477,4	11619,4	23238,7	34858,1	9 959 451 \$	3 319 817 \$	6 639 634 \$
	7254,6	7214,1	1400	10099726,8	7069,8	1767,5	3534,9	5302,4	1 514 959 \$	504 986 \$	1 009 973 \$
Porte-conteneurs	28720,9										
140 m ou plus	28676,3	27968,3	1200	33561977,3	23493,4	5873,3	11746,7	17620,0	5 034 297 \$	1 678 099 \$	3 356 198 \$
Moins de 140 m	44,6	40,1	170	6812,0	4,8	1,2	2,4	3,6	1 022 \$	341 \$	681 \$
TOTAL :	142066,2			TOTAL :	95469,2	23867,3	47734,6	71601,9	20 457 692 \$	6 819 231 \$	13 638 462 \$

¹ Basé sur la génération de 0.7 kg de GES par kWh d'énergie électrique produite à quai par les génératrices auxiliaires

² Temps de branchement/débranchement : 1,5 h par escale

³ Dans l'hypothèse où tous les navires utiliseraient le service d'alimentation à quai

Sources : Innovation maritime, divers.

Tableau 20
Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Québec

	Durée totale des escales (h)	Total des heures branchées ² (h)	Demande de puissance moyenne (kWh)	Total de la demande de puissance (kWh)	Gain potentiel tonnes de GES ^{1,3} (total)	Gain potentiel GES (tonnes)			Coût total énergie avant alimentation à quai	Économies sur production d'électricité	Potentiel de revenus pour Hydro-Québec ³
						25 % des escales	50 % des escales	75 % des escales			
Cargo général/vraquier											
	9787,2	9725,7	300	2917697,3	2042,4	510,6	1021,2	1531,8	437 655 \$	145 885 \$	291 770 \$
	27208,6	26574,1	300	7972226,0	5580,6	1395,1	2790,3	4185,4	1 195 834 \$	398 611 \$	797 223 \$
Croisières											
Moins de 200 m	2778,5	2610,5	4100	10703177,6	7492,2	1873,1	3746,1	5619,2	1 605 477 \$	535 159 \$	1 070 318 \$
Entre 200 et 300 m	1172,2	1073,2	7500	8048895,8	5634,2	1408,6	2817,1	4225,7	1 207 334 \$	402 445 \$	804 890 \$
300 m ou plus	258,3	249,3	10000	2492988,9	1745,1	436,3	872,5	1308,8	373 948 \$	124 649 \$	249 299 \$
Navire-citerne											
	20056,7	19137,2	1400	26792078,1	18754,5	4688,6	9377,2	14065,8	4 018 812 \$	1 339 604 \$	2 679 208 \$
	620,0	602,0	1400	842849,0	590,0	147,5	295,0	442,5	126 427 \$	42 142 \$	84 285 \$
Porte-conteneurs											
140 m ou plus	32,4	29,4	1200	35270,7	24,7	6,2	12,3	18,5	5 291 \$	1 764 \$	3 527 \$
TOTAL :	61913,9			TOTAL :	41863,6	10465,9	20931,8	31397,7	8 970 777 \$	2 990 259 \$	5 980 518 \$

¹ Basé sur la génération de 0.7 kg de GES par kWh d'énergie électrique produite à quai par les génératrices auxiliaires

² Temps de branchement/débranchement : 1,5 h par escale

³ Dans l'hypothèse où tous les navires utiliseraient le service d'alimentation à quai

Sources : Innovation maritime, divers.

Tableau 21
Gains environnementaux annuels potentiels pour le port de Trois-Rivières

	Durée totale des escales (h)	Total des heures branchées ² (h)	Demande de puissance moyenne (kWh)	Total de la demande de puissance (kWh)	Gain potentiel tonnes de GES ^{1,3} (total)	Gain potentiel GES (tonnes)			Coût total énergie avant alimentation à quai	Économies sur production d'électricité	Potentiel de revenus pour Hydro-Québec ³
						25 % des escales	50 % des escales	75 % des escales			
Cargo général/vraquier											
	8842,4	8732,9	300	2619876,1	1833,9	458,5	917,0	1375,4	392 981 \$	130 994 \$	261 988 \$
	12827,4	12602,4	300	3780728,1	2646,5	661,6	1323,3	1984,9	567 109 \$	189 036 \$	378 073 \$
Croisières											
Moins de 200 m	361,7	324,2	4100	1329152,8	930,4	232,6	465,2	697,8	199 373 \$	66 458 \$	132 915 \$
Navire-citerne											
	1340,6	1289,6	1400	1805452,1	1263,8	316,0	631,9	947,9	270 818 \$	90 273 \$	180 545 \$
	215,1	207,6	1400	290633,0	203,4	50,9	101,7	152,6	43 595 \$	14 532 \$	29 063 \$
Porte-conteneurs											
140 m ou plus	67,9	63,4	1200	76065,7	53,2	13,3	26,6	39,9	11 410 \$	3 803 \$	7 607 \$
Moins de 140 m	35,6	34,1	170	5798,0	4,1	1,0	2,0	3,0	870 \$	290 \$	580 \$
TOTAL :	23690,7			TOTAL :	6935,4	1733,8	3467,7	5201,5	1 486 156 \$	495 385 \$	990 771 \$

¹ Basé sur la génération de 0.7 kg de GES par kWh d'énergie électrique produite à quai par les génératrices auxiliaires

² Temps de branchement/débranchement : 1,5 h par escale

³ Dans l'hypothèse où tous les navires utiliseraient le service d'alimentation à quai

Sources : Innovation maritime, divers.

L'offre d'un service d'alimentation à quai à tous les terminaux et pour toutes les flottes est, bien sûr, irréaliste. Les résultats présentés dans les derniers tableaux permettent cependant d'apprécier les gains potentiels qui pourraient être faits pour certaines combinaisons de terminaux-navires. Dans certains cas, l'impact environnemental peut être significatif et les économies notables pour les armateurs. L'estimation du potentiel de revenus pour Hydro-Québec peut par ailleurs justifier l'implication de la société d'État dans des projets visant l'électrification des quais.

6 TENDANCES AU NIVEAU MONDIAL

Le World Ports Climate Action Program (WPCAP) [30] a mené en 2021 un sondage auprès de 16 ports d'importance répartis en Europe et en Amérique du Nord. Les résultats montrent que le taux de succès des branchements à quai (nombre de connexions réelles/nombre de demandes de connexion) est fort élevé (98 %), ce qui témoigne d'une bonne disponibilité du service dans les ports disposant de l'électrification à quai.

Si les technologies offertes sur le marché sont matures, il faut constater que la majorité des installations électriques sont dédiées aux terminaux de porte-conteneurs, navires de croisières ou de traversiers et sont alimentées en haute-tension. Dans les 16 ports¹⁴ suivis par le WPCAP, sur 6 627 demandes de connexion, 43 % ont été le fait de porte-conteneurs (Tableau 22). Beaucoup reste à faire pour les navires-cargo et les navires-citernes.

Tableau 22
Nombre de demandes de connexion par type de navire

Type de navire	Nombre de demande de connexion	%
Porte-conteneurs	2 856	43%
Navire de croisières	267	4%
Traversier (ROPAX)	3 504	53%
Total :	6 627	100%

Source : World Ports Climate Action Program.

Les configurations adoptées dans les différents ports montrent une bonne diversité. Le Tableau 23 détaille la tension, la fréquence et la capacité en puissance disponibles dans différents types de terminaux pour chacun des ports. On peut remarquer que pour des connexions à basse tension, la capacité n'excède pas 1,4 MW à 600 V pour notamment l'alimentation des traversiers au port de Kristiansand.

¹⁴ Ports de Rotterdam, Zeebrugge, d'Ystad, Vancouver, Seattle, New York et New Jersey, Long Beach, Los Angeles, HAROPA Le Havre, Kristiansand, Hambourg, Halifax, Göteborg, Stockholm, Barcelone, Kemi.

Tableau 23
Informations sur les connexions à quai par type de terminal

Type de terminal	Ports	Tension (Kv)	Fréquence (Hz)	Capacité (MW)
Conteneurs	LA, LB, Vancouver	6,6	60	7,5
Croisières	LA, Vancouver, Seattle, Kristiansand, Hambourg	6,6-11	50-60	12-20
RoPax	Rotterdam, Ystad, Göteborg, Stockholm	6,6-11	50-60	0,8-3
Traversier	Göteborg, Kristiansand	0,4-11	50-60	1-2,5
Général	Zeebrugge, Kemi	6,6	50	1,25
Au large	Kristiansand	0,4-0,6	50-60	1-1,4
Méga Yachts	Barcelone	6,6	50	3,4
Péniches fluviales	Haropa	0,4	50	0,025

Source : World Ports Climate Action Program.

Outre les différences au niveau des connexions, on note également des différences quant aux équipements d'alimentation.

Tableau 24
Équipements d'alimentation à quai actuellement mis en œuvre

	Transformateurs	Disjoncteurs	Points de connexion	Appareillage de distribution	Convertisseur de fréquence	Enrouleuse de câble mobile
Port de Rotterdam	2	0	2	0	2	0
Port de Zeebrugge	1	1	1	1	0	0
Port d'Ystad	2	20	1	3	1	0
Port de Vancouver	4	10	8	8	0	0
Port de Seattle	1	3	1	2	0	0
Port de New York et du New Jersey	1	0	1	0	0	0
Port de Long Beach	19	19	79	19	0	3
Port de Kristiansand	11	11	6	4	7	3
Port de Hambourg	5	11	1	2	1	1
Port de Göteborg	3	0	6	0	1	0
Ports de Stockholm	7	14	7	7	1	0
Port de Los Angeles	24	24	81	48	0	3

Source : World Ports Climate Action Program.

La grande majorité des ports ayant fait l'objet de l'étude de WCAP s'appuient sur le réseau national comme source d'électricité. L'énergie est, pour beaucoup, de source renouvelable (Tableau 25). Notons que le niveau de tension influence la sélection des composantes d'entrée des systèmes d'alimentation à quai.

Tableau 25
Source de l'électricité au port

Port	Source de l'électricité	Tension (kV)	Fréquence (Hz)
Rotterdam	Réseau national	25	50
Zeebrugge	Réseau national	11	50
Ystad	Renouvelable	11	50-60
Vancouver	BC Hydro	12,5-69	60
Seattle	Seattle City Light – 93 % sources propres	11	60
Long Beach	Southern California Edison (SCE)	12 ou 25	60
Los Angeles	Réseau local LA Dept. Of Water and Power	34,5	60
HAROPA Le Havre	Réseau national	20	50
Kristiansand	Réseau national	11	50
Hambourg	Réseau national et renouvelable	10	50
Göteborg	Réseau national	10	50
Stockholm	Réseau national, 100 % renouvelable	11	50
Barcelone	Réseau national	25	50
Kemi	Réseau national	6,6	50

Source : World Ports Climate Action Program.

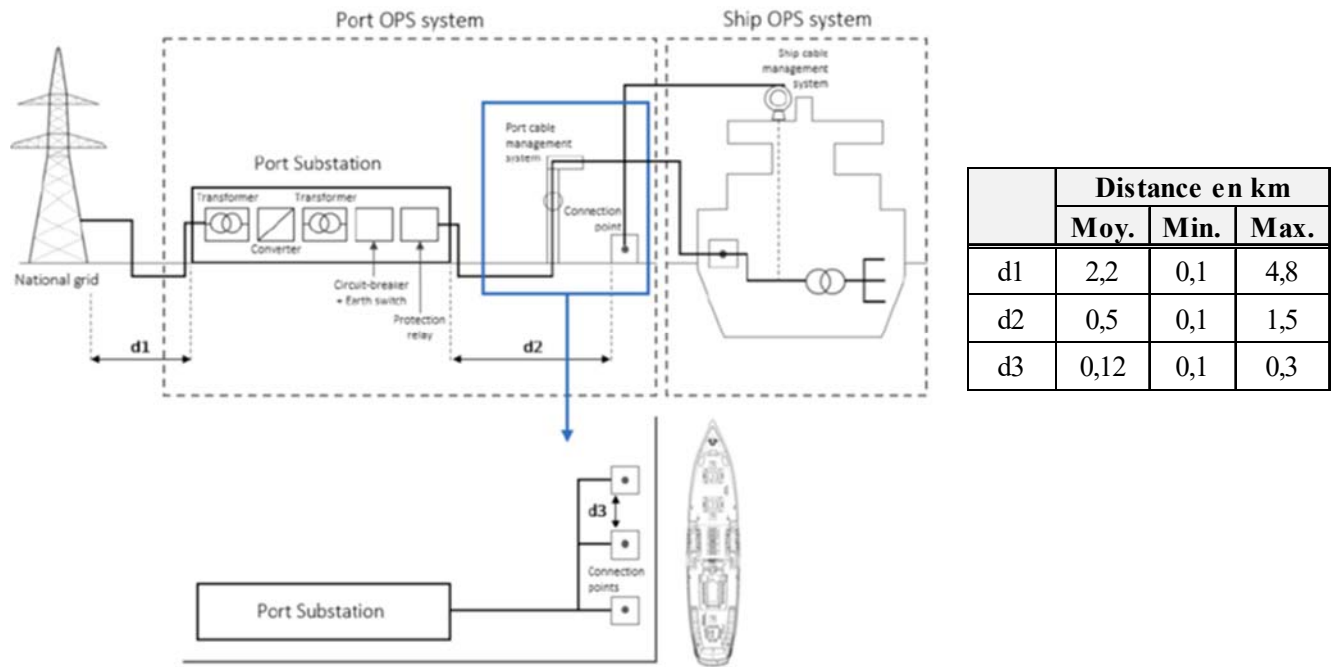
Les caractéristiques des réseaux de distribution qui alimentent les différents quais électrifiés peuvent être très variables, notamment eu égard aux distances à considérer entre les différents éléments du système.

La distance d1 de la Figure 32 illustre la distance parcourue par les câbles haute tension (de 11 kV à 69 kV) entre le poste de distribution et la sous-station portuaire. Par souci de sécurité et d'esthétique, ces câbles sont habituellement installés de manière sous-terrain entre le périmètre d'entrée du port et le bâtiment contenant la sous-station électrique dédiée à l'alimentation des quais.

La distance d2 représente la distance parcourue par les câbles basse tension (de 400 V à 690 V) ou haute tension (de 6,6 kV ou 11 kV) entre la sous-station et le premier point de connexion à quai. Selon le mode de connexion, les câbles peuvent être fixes souterrains ou mobiles en surface avec un système d'enroulement.

La distance d3 est celle entre les différents points de connexion sur un quai lorsque cela est requis. Au Tableau 26, on remarque qu'une distance de 100 m semble être la norme pour les installations à plusieurs points de connexion. Une plus petite distance (d3) avec un nombre plus élevé de points augmentera grandement le coût d'installation.

Figure 32
Configuration du réseau électrique et du système d'alimentation à quai



Source : World Ports Climate Action Program.

Tableau 26
Détails de la configuration du réseau électrique et du système d'alimentation à quai - distances de l'infrastructure (km)

	Rotterdam	Ystad	Vancouver	Seattle	Long Beach	Los Angeles	HAROPA	Kristiansand	Hambourg	Göteborg	Stockholm
Distance la plus longue de tout point de connexion fixe entre le réseau et la sous-station portuaire (d1)	3	3	0.1	4.8	1.8	3	2.5	0.8	1.2	0	1.5
Distance de la sous-station portuaire au point de connexion (d2)	1.5	1	0.1	<0.1	0.8	0.6	1	0.2	0.6	0.1	0.7
Distance entre les points de connexion au même quai (d3)	0.3	-	<0.1	-	0.1	<0.1	<0.1	0.1	-	0.1	-

Source : World Ports Climate Action Program.

Soulignons que 55 % des ports ont opté pour des conduits de protection des câbles souterrains entre la sous-station principale et les points de connexion à quai (distance d2). Les autres ports (45 %) ont choisi des conduits en partie souterrains et en partie en surface. Bien que plus économiques, les câbles en surface n’offrent pas la même protection mécanique qu’une installation souterraine. Cette dernière est préconisée pour les installations fixes.

Un élément important de l’électrification à quai est le temps requis pour compléter les opérations de connexion/déconnexion. Cela est plus important pour certains navires, comme pour les traversiers. Le Tableau 27 rapporte le temps moyen des opérations selon le type de navire. Le temps très court des RoPax (navires de passagers) s’explique par le fait que certains systèmes de connexion sont automatisés, comme la position des navires à quai est la même à chaque escale.

Tableau 27
Temps moyen pour connecter/déconnecter le système d’alimentation à quai du port au navire selon le type de navire

	Connexion (min.)	Déconnexion (min.)
Porte-conteneurs	48	33
Navires de croisières	39	33
RoPax	7	7
Au large (offshore)	45	22

Source : World Ports Climate Action Program.

Pour assurer des opérations sécuritaires, plusieurs mesures sont mises en place dans les ports, notamment :

- Formation adéquate du personnel sur les protocoles d’utilisation, les risques des systèmes, les moyens de protection et les systèmes de sécurité et les protocoles d’urgence à déployer en cas d’accident.
- Définition des protocoles de mise à la terre adéquate en cas de défauts.
- Ouverture des disjoncteurs sur le navire et sur le système terrestre lorsque des défauts se produisent.
- Système de déconnexion efficace des connecteurs en cas de mouvement excessif du navire ou d'une urgence.
- Mise en place d’un protocole de communication efficace entre le navire et le personnel à terre durant la durée de l’amarrage.
- Procédures de sécurité d’exploitation normalisées partagées par l’équipage du navire et les opérateurs à terre.

- Des voyants lumineux indiquent que la connexion peut être manipulée en toute sécurité par le personnel.

Au niveau de la gouvernance des systèmes, les modèles sont variés et prennent plusieurs formes, dont certaines formes de cogestion (Tableau 28). À travers les ports suivis par le WPCAP, il n’y a pas de modèle de gestion qui se démarque des autres.

Tableau 28
Proportion des gestionnaires des systèmes d’alimentation

Autorité portuaire	22%
Autorité portuaire et armateurs	14%
Autorité portuaire et opérateur externe	7%
Opérateur externe	14%
Armateurs	14%
Opérateur de terminal et armateurs	7%
Opérateur de terminal	22%

Source : World Ports Climate Action Program.

Fait intéressant, la majorité des ports ont adopté une approche de récompense plutôt que de pénalité pour inciter les armateurs à utiliser les systèmes d’électrification à quai. Tant les armateurs que les ports gagnent à ce que les systèmes soient utilisés de façon optimale à la fois pour des raisons économiques (rentabilité du projet pour le port, économie de carburant pour l’armateur) qu’environnementales. C’est ainsi que le port de Marseille réduit ses frais de service au port pour tout navire utilisant les installations de connexion à quai.

Tableau 29
Proportion des incitatifs pour le branchement à quai

	Oui	Non
Rabais/remises aux navires pour l'utilisation des systèmes d'alimentation du port	60%	40%
Pénalité si le navire ne se connecte pas au système d'alimentation disponible à quai	27%	73%

Source : World Ports Climate Action Program.

Les impacts positifs de l’électrification à quai peuvent être considérables pour l’environnement. Le Tableau 30 présente les résultats des réductions approximatives d’émissions notées par quelques ports.

Tableau 30
Réductions approximatives des émissions des polluants (en tonnes/année)

	CO₂	SO_x	NO_x	PM_{2.5}
Port de Los Angeles	52 000	21	750	-
Port de Vancouver	2 500	2	60	1,4
Port de Seattle	2 500	2	60	1
Port de NY et du NJ	100	1	10	0,1
Port Le Havre	3 000	3	100	2,5
Port de Hambourg	100	1	10	0,4
Ports de Stockholm	9 000	5,5	50	2,5

Source : World Ports Climate Action Program.

7 CONSTATS ET PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

L'alimentation électrique à quai est reconnue par plusieurs organismes internationaux comme étant la méthode la plus efficace de réduction des émissions de gaz à effet de serre lorsque les navires sont à quai. En plus de cet avantage environnemental, la réduction des coûts du carburant et de maintenance des génératrices est un avantage économique intéressant pour les armateurs lorsque cette méthode est utilisée régulièrement.

Jusqu'à maintenant, plusieurs initiatives d'électrification à quai ont vu le jour dans les ports internationaux. Les principaux terminaux électrifiés sont ceux du secteur des croisières et des plus gros navires porte-conteneurs (> 140 m) qui représentent les navires ayant les plus fortes demandes énergétiques lorsqu'ils sont amarrés.

Dans le transport du vrac solide, du vrac liquide, du cargo général et pour les plus petits navires porte-conteneurs, beaucoup reste à faire. Encore trop peu de projets ont été déployés, considérant leur important bienfait potentiel pour l'environnement.

Au niveau de la technologie, les premiers systèmes d'électrification à quai ont été implantés il y a plus de 40 ans. Les technologies utilisées sont donc fiables et se retrouvent en différentes configurations adaptées aux besoins et aux réalités de chaque terminal. Il est à noter qu'au Québec et pour la majorité des pays en Amérique, la fréquence du réseau de distribution est fixée à 60 Hz comme celle que l'on retrouve à bord de la plupart des grands navires. Cette particularité peut diminuer de façon importante le coût des infrastructures nécessaires dans un projet d'électrification puisque l'ajout d'un convertisseur de fréquence de 50 Hz à 60 Hz peut être évité.

Les principaux enjeux qui se dressent devant une diffusion générale de cette technologie peuvent être résumés par les éléments suivants :

La capacité du réseau électrique

La capacité du réseau électrique local à supporter une électrification importante de plusieurs terminaux n'est pas toujours au rendez-vous. En effet, des demandes additionnelles de plusieurs MVA peuvent occasionner des baisses de tension importantes si le réseau n'est pas suffisamment dimensionné. Dans le cas où un poste de distribution à proximité du port doit être rehaussé pour soutenir l'électrification des terminaux, ces coûts s'ajoutent aux budgets totaux d'implantation.

Pour contrer cette problématique, certains ports ont déployé différents systèmes de production d'électricité alternative à proximité des terminaux. Ainsi des générateurs au GNL, des centrales thermiques en

cogénération et l'implantation d'énergies renouvelables (éolienne et panneaux solaires) font partie des pistes de solutions déployées pour contrer cet enjeu.

Recommandation

Le Québec, avec un réseau électrique national à 60 Hz alimenté à 99 % d'hydroélectricité, bénéficie d'un des plus bas tarifs d'électricité au monde. Il est donc important d'évaluer toutes les options de modernisation des postes de distribution à proximité du port avant d'envisager l'implantation d'équipements de production auxiliaire.

La rentabilité des infrastructures

La rentabilité des investissements d'une connexion à quai demeure un enjeu majeur pour un déploiement à grande échelle de ces technologies. Les coûts d'implantation à quai dépendent de plusieurs facteurs reliés aux distances à parcourir et au choix de la technologie sélectionnée. L'électricité disponible doit également être en mesure de concurrencer les coûts de production par les systèmes déjà en place sur les navires.

Pour ce qui est des navires, les coûts varient en fonction de l'adaptabilité du réseau en place au réseau terrestre et des puissances demandées. Malgré le fait que les études proposées dans ce rapport montrent qu'un retour sur les investissements peut être réalisé dans des délais de quelques années, les préoccupations budgétaires demeurent un enjeu fort chez les armateurs. La rentabilité pour les armateurs peut être pour beaucoup dépendante du coût du carburant mais aussi des pratiques tarifaires des ports pour encourager la connexion à quai.

Les acteurs cités dans cette étude sont unanimes : une implication des gouvernements est nécessaire afin d'atténuer cette problématique de rentabilité tant pour les ports que pour les armateurs. Plusieurs actions peuvent alors être entreprises :

- Un coût d'électricité subventionné pour améliorer sa compétitivité face au carburant fossile.
- Une tarification fixe et prévisible indépendante des surcharges occasionnées sur un réseau d'alimentation.
- Un investissement public dans les projets d'électrification portuaire.

Il est à noter que pour certains ports, les enjeux environnementaux et l'impact de leurs activités sur les communautés locales sont beaucoup plus importants que l'aspect financier.

Recommandation

La particularité au Québec pour les projets d'électrification des quais vient du fait que le distributeur d'électricité principale est une société d'État. Les principaux revenus engendrés par la vente d'électricité

provenant de navires à quai seraient donc perçus par le gouvernement. Cette situation devrait avantager le financement de projets pour le déploiement de cette technologie au Québec.

De plus, la Stratégie maritime du Québec - Avantage Saint-Laurent [31], met au cœur de ses préoccupations un développement durable et compétitif du Saint-Laurent. Le déploiement d'une stratégie d'électrification de terminaux à grande échelle s'inscrit parfaitement dans ces orientations.

Notons que l'ensemble des armateurs consultés lors de cette étude ont montré un intérêt face aux technologies d'électrification à quai. Cet élément est majeur et essentiel pour soutenir une stratégie nationale d'électrification des quais.

Absence de standards

Pendant que les ports accueillant les navires de croisières et les navires porte-conteneurs électrifient leurs quais sur une alimentation haute tension pour répondre à leur grande consommation énergétique et garantissant ainsi une compatibilité de connectivité dans plusieurs ports internationaux, la réalité du reste de la marine marchande avec des demandes énergétiques plus faibles et plus variées ouvre la porte à plusieurs options. En effet, comme présentée dans les sections antérieures, la demande énergétique peut varier d'environ 200 KVA à quelques MVA pour plusieurs navires du Saint-Laurent. Bien que cette étude suggère qu'un système haute tension serait profitable à un système basse tension pour des puissances supérieures à 1 MVA, plusieurs options demeurent possibles pour les plus faibles puissances.

Cette absence de standard nuit un déploiement à grande échelle, car aucune compatibilité électrique n'est garantie d'un terminal à l'autre.

Dans ce contexte, et puisque la rentabilité de ce type de projets demeure un élément majeur pour sa faisabilité, la tendance actuelle est donc de sélectionner certains transits récurrents offrant un seuil minimal de connexions annuelles et de disponibiliser des installations électriques sur mesure à ce scénario d'avitaillement. Bien que cette méthode soit tout à fait à propos dans certains cas, elle limite une intégration plus large d'autres navires et freine ainsi un déploiement à plus grande échelle sur des terminaux partagés.

Recommandations

À la lumière de ces informations, il est certain qu'un type de connexion plus flexible et adaptable à la plus grande majorité des navires marchands devrait être envisagé pour l'électrification des quais, cela tant au Québec que dans les ports de l'axe Saint-Laurent/Grands Lacs où une compatibilité des systèmes devrait être visée. Une concertation avec les autres provinces (Ontario, Maritimes) s'impose pour mettre en place une standardisation du type de connexion pour un plus grand nombre d'utilisateurs. Pour l'instant, une solution à une connexion haute tension 6,6 kV permet de rejoindre la majorité des besoins.

Avec une telle configuration, il serait envisageable d'intégrer de futurs navires sur ce type de réseau et d'ainsi bénéficier d'une augmentation potentielle de connexions pour la rentabilité des projets.

De plus, les recherches réalisées tendent à démontrer que pour le navire, les frais de raccordement à un réseau haute tension différent de la tension du réseau d'alimentation à bord n'impliquent que peu de frais supplémentaires de mise à niveau.

Bien entendu, des raccordements basse tension peuvent demeurer pertinents dans la définition de projets plus spécifiques à un nombre restreint de navires qui sont en mesure d'assurer un nombre suffisant de connexions et une demande énergétique suffisante pour rentabiliser les projets d'investissement.

Le but de ce rapport était de dresser l'état de la situation au Québec quant à l'électrification à quai, d'identifier les technologies disponibles et de faire ressortir les enjeux associés à de tels projets. Les travaux démontrent que le Québec dispose d'atouts appréciables pour s'engager davantage dans la voie de l'électrification à quai pour le transport maritime. Les bénéfices potentiels sont multiples et touchent toutes les parties. Pour les armateurs, les réductions de GES à quai peuvent améliorer leur bilan d'émissions annuelles tout en réduisant leurs coûts d'opération. Pour les ports, les bilans environnementaux s'en trouveraient améliorés en plus d'offrir un service supplémentaire aux armateurs. Pour les communautés locales, la qualité de l'air des régions avoisinant les installations portuaires peut être grandement améliorée. Il apparaît cependant que plusieurs facteurs doivent être considérés avant d'aller de l'avant dans tous les projets. Les investissements requis sont, dans tous les cas, fort importants et des analyses « cas par cas » sont requises pour bien évaluer les gains réels pouvant résulter de telles initiatives, tant sur les plans économique, environnemental que social. Au niveau technologique, les différentes options offertes sur le marché sont matures. Il se dégage toutefois, outre certains cas spécifiques, qu'une orientation d'électrification à haute tension pour les terminaux présentant le maximum de retombées potentielles pourrait être envisagée dans une stratégie nationale. Cette stratégie positionnerait le Québec avec des infrastructures modernes et en phase avec un développement vert, durable et porteur pour les prochaines années. Une telle stratégie nécessiterait une implication de toutes les parties prenantes pour en faire une réussite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALASKA ELECTRIC LIGHT & POWER CO. *Shore Power Milestone Celebrated*, [Online], September 4, 2021. [<https://www.aelp.com/About-Us/Latest-News/shore-power-milestone-celebrated>].
- [2] ADMINISTRATION PORTUAIRE DE QUÉBEC. *Règlement NQ-1 Tarif des droits d'amarrage et de mouillage*, Port de Québec, 1er janvier 2019, 4 p.
- [3] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Initial IMO GHG Strategy* [Online], 2019. [<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>].
- [4] PORT OF VANCOUVER. *Shore power*. [Online], 2022. [<https://www.portvancouver.com/environmental-protection-at-the-port-of-vancouver/climate-action-at-the-port-of-vancouver/shore-power/>].
- [5] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Shore Power Technology Assessment at U.S. Ports*, EPA-420-R-17-004, March 2017, 57 p.
- [6] TRANAPOWICZ, D. and GERMAN-GALKIN, S. “Analysis of the Topology of ‘Shore to Ship’ Systems—Power Electronic Connection of Ships with Land”, 2018, Vol. 1, pp. 325–333.
- [7] SCHNEIDER ELECTRIC. *Connect to LV electrical network*, 2013.
- [8] GREATER VICTORIA HARBOUR AUTHORITY. *An Introduction to Shore Power*, [Online] 2021. [<https://gvha.ca/about-gvha/blog/an-introduction-to-shore-power/>].
- [9] BECKER MARINE SYSTEMS. *Emission Optimized Power Supply in Ports—Hamburg*, 2015, 26 p.
- [10] PORT DE TROIS-RIVIÈRES. *Carte des terminaux*, [En ligne], 2019. [<https://porttr.com/wp-content/uploads/2019/02/Carte-des-terminaux.pdf>].
- [11] SHIP TECHNOLOGY. *Shore-side power: a key role to play in greener shipping*, [Online], January 5, 2016. [<https://www.ship-technology.com>].
- [12] ERICSSON, P. and FAZLAGIC, I. *Shore-side power supply: a feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electric power while in port*, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2008, 180 p.

- [13] UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID. *On Shore Power Supply and LNG*, TrainMos II, 2015, 83 p.
- [14] RADU, D. and L. GRANDIDIER. *Shore Connection Technology: Environmental Benefits and Best Practices*, Schneider Electric, July 2012, 24 p.
- [15] GLOMEEP. *Shore Power*, [Online]. [<https://glomeep.imo.org/technology/shore-power/>].
- [16] PAUL, D., HADDADIAN, V., CHAVDARIAN, B and K. PETERSON. “Low-Voltage Shore Connection Power Systems—Optional designs and a safety loop circuit”, *IEEE Industry Applications Magazine*, Volume 24, Issue 5, Sept.-Oct. 2018, pp. 62–68.
- [17] COLAROSSO, Danielle and Paolo PRINCIPI. “Technical analysis and economic evaluation of a complex shore-to-ship power supply system”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 181, November 25, 2020, 6 p.
- [18] MJR POWER & AUTOMATION. *Marine Energy Storage Solutions—Principles, implementation, application and benefits*, April 2018.
- [19] FARRIER, L., WU, P. and R. BUCKNALL. *Opportunities and constraints of electrical energy storage systems in ships*, Naval Architecture and Marine Engineering, Department of Mechanical Engineering, University College London, 2017, 10 p.
- [20] CURRENT DIRECT. *Swappable Container Waterborne Transport Battery—Reducing the Cost of Large Batteries for Waterborne Transport*, June 3, 2021, 18 p.
- [21] NOUVELLON, M-C. “Électrification des quais, carburants alternatifs... Au Havre, le port joue la carte écolo », *76actu*, [En ligne], publié le 20 septembre 2020. [actu.fr/normandie/le-havre_76351/electrification-des-quais-carburants-alternatifs-au-havre-le-port-joue-la-carte-ecolo_36155603.html].
- [22] BRITISH PORTS ASSOCIATION. *Reducing Emissions from Shipping in Ports: Examining the Barriers to Shore Power*, London, May 2020, 86 p.
- [23] VALERO, Camille. *Quelle stratégie zéro carbone pour les acteurs du maritime ?* Note de Synthèse ISEMAR, no. 226, Décembre 2020, 4 p.
- [24] GREEN SHIP OF THE FUTURE. *The Retrofit Project—Retrofitting to reduce CO2 emission—a case study of three different vessels*, 2020, 132 P.

- [25] PARSONS, M. G., SINGER, D. J. and S. J. DENOMY. “Integrated Electrical Plants in Future Great Lakes Self-Unloaders”, *Journal of Ship Production and Design*, 27 (4), November 2011, pp. 169–185.
- [26] SAMOSIR, Devi Hotnauli, MARKERT, M. and Wolfgang BUSSE. “The Technical and Business Analysis of Using Shore Power Connection in the Port of Hamburg”, *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 5, No. 2, 2016.
- [27] NAVARI PTY. *Final report for Shore Power feasibility study for White Bay cruise terminal*, Surry Hills, 2016, 36 p.
- [28] VAN LIESHOUT, Anniek. *Viability Study of Sustainable Shore Side Electricity for Container Vessels in the Port of Rotterdam*, Technical University of Delft, March 1, 2019, 193 p.
- [29] SAENZ, Juan Gutiérrez. *Energy analysis and costs estimation of an On-shore Power Supply system in the Port of Gävle*, Student Thesis, Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gävle, June 2019, 53 p.
- [30] CENIT. *Power-to-Ship (P2P)/Onshore Power Supply (OPS) Questionnaire results*, World Ports Climate Action Program, Port de Barcelona, 27 p.
- [31] MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC. *Avantage Saint-Laurent — La nouvelle vision maritime du Québec*, Québec : Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2021. ISBN 978-2-550-89407-0, 44 p.
- [32] IEEE. *80005-1-2019—IEC/IEEE International Standard— Utility connections in port—Part 1: High voltage shore connection (HVSC) systems—General requirements*, March 2019, 78 p.
- [33] IEC. *IEC PAS 80005-3:2014—Utility connections in port—Part 3: Low Voltage Shore Connection (LVSC) Systems—General requirements*”, 2014, 51 p.
- [34] WATTS MARINE. *Halifax—Port Authority shore power system*, [Online], 2021.
[https://www.watts-marine.com/yacht_charters/halifax/].
- [35] PORT OF HALIFAX. *Alimentation à quai pour navires de croisière*, [En ligne], 2022.
[<https://www.portcityhfx.ca/fr/alimentation-a-quai-pour-navires-de-croisiere/>].
- [36] ADMINISTRATION PORTUAIRE DE QUÉBEC. *Construction d’un terminal de croisière au quai 30 – Réponses aux préoccupations citoyennes dans le cadre de la consultation publique*, Québec, octobre 2019, 22 p.

- [37] PORT DE MONTRÉAL ET SNC LAVALIN. *Agrandissement du terminal portuaire de Contrecoeur – Étude d’impact environnemental – Volume 1 – Rapport principal*, Montréal, septembre 2017, 889 p.
- [38] OLMER N., COMER B., ROY B., MAO X., and RUTHERFORD D. *Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015, Detailed methodology*, icct The International Council On Clean Transportation, Washington DC, 2017, 59 p.
- [39] Fathom Eco-Efficiency Consultant Ltd. *Shore Power for Ship Operator*, Windsor, England, November 2014, 4 p.
- [40] KANELLAKIS K. *Shore connection – Regulations, benefits, success stories*, Schneider Electric, International Conference “Ports, Maritime Transport & Insularity: Business, Innovation, Environment”, Piraeus, March 2016, 45 p.

“Utility connections in port—Part 1 : High voltage shore connection (HVSC) systems—General requirements”

Connexions au distributeur électrique dans le port — Partie 1 : Systèmes de connexion à quai haute tension (HVSC) — Exigences générales

RÉSUMÉ

La norme IEC/IEEE 80005-1 : 2019 décrit les systèmes de connexion à terre haute tension (HVSC), à bord du navire et à terre, pour alimenter le navire en électricité depuis la terre. Le document s'applique à la conception, à l'installation et aux essais des systèmes HVSC et concerne : – les systèmes de distribution à quai HT, - les équipements de connexion et d'interface quai-navire, - les transformateurs/réacteurs, - les convertisseurs de fréquence à semi-conducteurs/rotatifs, - les systèmes de distribution de navire, et - les systèmes de contrôle, de surveillance, d'enclenchement et de gestion de l'alimentation. Elle ne s'applique pas à l'alimentation électrique pendant les périodes d'accostage, par exemple en cale sèche et autres travaux d'entretien et de réparation hors service. Des exigences supplémentaires et/ou alternatives peuvent être imposées par les administrations nationales ou les autorités dans la juridiction desquelles le navire est destiné à opérer et/ou par les propriétaires ou les autorités responsables d'un système d'approvisionnement à terre ou de distribution. On s'attend à ce que les systèmes HVSC aient des applications pratiques pour les navires nécessitant 1 MVA ou plus ou les navires avec alimentation principale HV. Les systèmes de connexion à quai basse tension ne sont pas couverts par ce document. Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2012. Cette édition constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques importantes suivantes par rapport à l'édition précédente :

- a) Modification de 4,1, Figure 1 : le transformateur sur le navire est facultatif, les sectionneurs de terre sur le navire ont été supprimés.
- b) 4.2.2 et nouveau point 11.3 : procédure alternative d'essai périodique ajoutée.
- c) Modification de 4,9 : – la valeur minimale du courant dans les circuits de sécurité doit être de 50 mA; – l'ouverture de la boucle de sécurité doit provoquer l'ouverture automatique des disjoncteurs HVSC navire et quai dans un temps maximum de 200 ms.
- d) Modification de 5,2 : Figure ajoutée sur les contenus harmoniques.

- e) Modification de 6.2.3 : – un transformateur de mise à la terre avec résistance peut également être utilisé du côté secondaire; — le calibre de la résistance de terre neutre en ampères doit être au minimum de 25 A, 5 s.
- f) Modification de toutes les annexes : les circuits de sécurité seront obligatoires.
- g) Modification de A.2.1 : un blindage métallique doit être installé au moins sur les noyaux de puissance ou commun sur les fils pilotes.
- h) Modification de B.7.2.1 : nouveau circuit de sécurité introduit : schéma unifilaire et description.
- i) Modification de C.4.1 : le SLD pour les navires de croisières a été mis à jour, ainsi que les circuits de sécurité pour être cohérents avec le corps principal, les symboles IEC et a introduit plus de détails sur le type de fabricant des prises de courant et des fiches.
- j) Modification de C.7.3.1 : – l'affectation des broches du connecteur d'alimentation à quai est mise à jour; – tous les navires de croisières doivent utiliser 4 câbles dans tous les cas.
- k) Ajouté D.6.1 : le point de ravitaillement à terre peut être fixe ou mobile.
- l) Modification de D.7.3.2 : la tension utilisée dans le circuit pilote des porte-conteneurs doit être inférieure à 60 V DC ou 25 V AC.
- m) Ajouté D.8.6 et D.9.3.1 : alternatives de redémarrage et de synchronisation automatiques.
- n) L'Annexe E est définie sur informative; o) L'Annexe F est définie sur informative.

IEC/IEEE 80005-2 2016

“Utility connections in port—Part 2 : High and low voltage shore connection systems—Data communication for monitoring and control”

Alimentation des navires à quai — Partie 2 : Systèmes de connexion à quai à haute et basse tension — Description de l'interface de communication de données dédiées au suivi et contrôle (ébauche)

RÉSUMÉ

L'IEC/IEEE 80005-2 : 2016 définit les interfaces de données de quais et de navires. Elle spécifie également les procédures par étapes appliquées pour la communication de systèmes de connexion à quai à haute et basse tension lorsque cela est exigé pour les fonctions hors urgence. La présente norme décrit les interfaces, les adresses et les types de données. L'Annexe A de la présente norme spécifie également les exigences de communication applicables aux navires de croisières. L'application de la présente norme fait référence aux

annexes de l'IEC/ISO/IEEE 80005-1. La présente norme ne spécifie pas la communication pour les fonctions d'urgence décrite dans l'IEC/ISO/IEEE 80005-1.

IEC/IEEE 80005-3 2014 PAS

“Utility connections in port—Part 3 : Low Voltage Shore Connection (LVSC) Systems—General requirements”

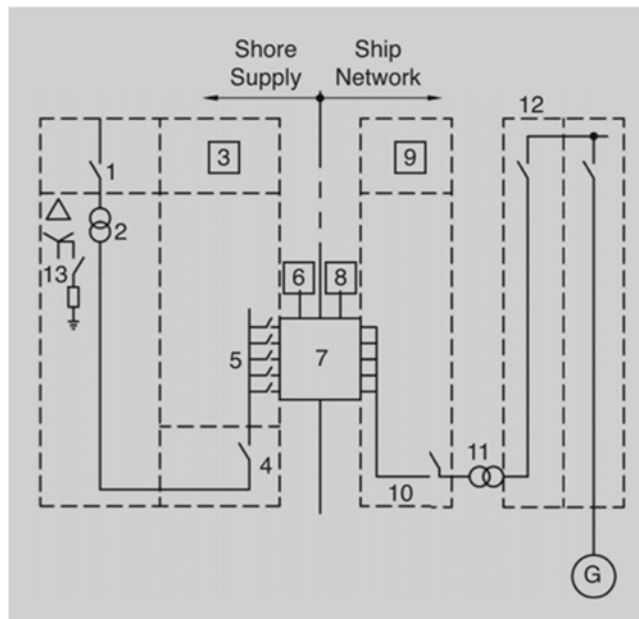
Connexions au distributeur électrique dans le port — Partie 3 : Systèmes de connexion à quai à basse tension (LVSC) — Exigences générales (Spécification disponible au public, en développement)

RÉSUMÉ

La CEI PAS 80005-3 : 2014 (E) décrit les systèmes de connexion à terre basse tension (LVSC), à bord et à terre du navire, pour alimenter le navire en électricité depuis la terre. Cette spécification disponible au public s'applique à la conception, à l'installation et aux tests des systèmes LVSC et des adresses :

- Systèmes de distribution à terre BT.
- Équipements de connexion et d'interface quai-navire.
- Transformateurs/réacteurs.
- Convertisseurs semi-conducteurs/rotatifs.
- Les systèmes de distribution des navires.
- Les systèmes de contrôle, de surveillance, d'enclenchement et de gestion de l'alimentation. Elle ne s'applique pas à l'alimentation électrique pendant les périodes d'accostage, par ex. cale sèche et autres travaux d'entretien et de réparation hors service. On s'attend à ce que les systèmes LVSC aient des applications pratiques pour les navires nécessitant jusqu'à 1 MVA. Les systèmes de raccordement à quai basse tension n'excédant pas 250 A, avec un maximum de 125 A par câble et n'excédant pas 300 V à la terre ne sont pas couverts par cette spécification. Les systèmes de connexion à quai haute tension sont couverts par la norme IEC/ISO/IEEE 80005-1.

Figure 33
Diagramme bloc d'une LVSC



1) Disjoncteur primaire, 2) Transformateur de la sous-station, 3) Appareillage basse tension, 4) Disjoncteur principal, 5) Disjoncteurs des branches d'alimentation, 6) Câble d'alimentation vers les réceptacles de puissance, 9) Panneau d'alimentation à quai à bord du navire, 10) Disjoncteur du côté du navire, 11) Transformateur à bord optionnel, 12) Disjoncteur de synchronisation, 13) Sectionneur de la résistance de neutre à la terre.

Source : IEEE Industry Applications Magazine.

IEC 62613-1 2019

“Plugs, socket outlets and ship couplers for high-voltage shore connection (HVSC) systems—Part 1 : General requirements”

Fiches, prises de courant et coupleurs de navires pour systèmes de connexion à terre haute tension (HVSC)
— Partie 1 : Exigences générales

RÉSUMÉ

La CEI 62613-1 : 2019 s'applique aux accessoires avec :

- Triphasé et terre avec contacts pilotes.
- Un pôle pour le neutre.

Ces accessoires ont des courants nominaux ne dépassant pas 500 A et des tensions nominales de fonctionnement ne dépassant pas 12 kV 50/60 Hz.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2011. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques importantes suivantes par rapport à l'édition précédente :

- a) Extension du champ d'application à un nombre illimité de contacts pilotes (auparavant limité à 3).
- b) Mise à jour des figures et suppression de leurs textes incorporés.
- c) Insertion de tables de clés chaque fois que les figures l'exigent.

IEC 62613-2 2016

“Plugs, socket outlets and ship couplers for high-voltage shore connection systems (HVSC-systems)—
Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for accessories to be used by various
types of ships”

Fiches, prises de courant et coupleurs de navires pour les systèmes de connexion à terre à haute tension
(systèmes HVSC) — Partie 2 : Exigences de compatibilité dimensionnelle et d'interchangeabilité pour les
accessoires à utiliser par divers types de navires

RÉSUMÉ

La CEI 62613-2 : 2016 contient des fiches standards pour différentes configurations de socles (de quai), de
fiches (de quai), de connecteurs de navire et d'entrées de navire, ci-après dénommés accessoires, jusqu'à
12 kV, 500 A, 50/60 Hz et avec jusqu'à sept contacts pilotes/auxiliaires. Les exigences générales sont
données dans la CEI 62613-1. Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2011.
Cette édition constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques importantes
suivantes par rapport à l'édition précédente :

- a) Ajout de la configuration I : 7,2 kV 350 A accessoires triphasés avec trois contacts pilotes IP0.
- b) Ajout de la configuration J : accessoires triphasés 12 kV 500 A avec sept contacts pilotes.
- c) Amélioration des dessins dans les feuilles standards et ajout des cotes manquantes.

IEC 60309-1 2012

“Plugs, socket outlets and couplers for industrial purposes—Part 1: General requirements”

Fiches, socles et coupleurs à usage industriel — Partie 1 : Exigences générales

RÉSUMÉ

La présente norme s'applique aux fiches et socles, aux coupleurs de câbles et aux coupleurs d'appareils,
avec une tension assignée de fonctionnement ne dépassant pas 690 V c.c. ou c.a. et 500 Hz a. c., et un

courant nominal ne dépassant pas 250 A, principalement destiné à un usage industriel, à l'intérieur ou à l'extérieur.

Cette publication est d'une grande importance pour le « Smart Grid ».

IEC 60309-5 2017

“Plugs, socket outlets and couplers for industrial purposes—Part 5: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for plugs, socket outlets, ship connectors and ship inlets for low-voltage shore connection systems (LVSC)”

Fiches, socles et coupleurs à usage industriel - Partie 5 : Exigences de compatibilité dimensionnelle et d'interchangeabilité pour les fiches, socles, connecteurs de navire et prises de navire pour les systèmes de connexion à terre basse tension (LVSC)

RÉSUMÉ

La CEI 60309-5 : 2017 s'applique à un seul type de fiche, de socle de prise de courant, de connecteur de navire et d'entrée de navire, ci-après dénommés accessoires, destiné à connecter les navires aux systèmes d'alimentation à quai dédiés décrits dans la CEI/IEEE 80005-3.

La présente partie de la CEI 60309 s'applique aux accessoires triphasés avec un contact de terre et avec quatre contacts pilotes.

Cette publication doit être lue conjointement avec la CEI 60309-1 : 2012.

ANNEXE B : EXEMPLE DE CONVERTISSEURS DE FRÉQUENCE STATIQUES
 BASSE TENSION POUR APPLICATION D'ALIMENTATION QUAI-NAVIRE

Tableau 31
ABB PCS100 SFC spécifications techniques

Entrée	
Tension	380-480 V \pm 10 % (ou toute tension avec transformateur d'entrée)
Système	3 phases TN
Fréquence	50 Hz ou 60 Hz
Variation de fréquence	\pm 5 Hz
Tension maximum continue	100 %
Capacité de surcharge	150 % pour 30 secondes
Catégorie de surtension	III
Efficacité	95 % typique
Harmoniques de courant	< 3 % DHTi (à la charge nominale)
Facteur de puissance	Unitaire (ajustable)
Sortie	
Capacité	125 kVA à 2000 kVA 0,9 fp (puissance plus élevée avec la mise en parallèle d'unités)
Tension	380-480 V
Fréquence	50 Hz ou 60 Hz
Variation de fréquence	\pm 0.1 %
Harmonique de tension	< 2,5 % DHTv (charge linéaire)
Capacité de surcharge	120 % pour 10 minutes (à 75 % de précharge) 150 % pour 30 secondes
Limite de court-circuit	200 % pour 2 secondes

Précision de tension	± 1 %
----------------------	-------

Interface utilisateur

Type	Écran tactile 10.1 »
------	----------------------

Interface de contrôle

Entrées numériques	Démarrage/Arrêt/Mise à zéro
Sortie numérique (relais)	Marche (NO), Avertissement (NO), Faute (NF)
Spécifications des relais de sortie	230 Vca 1 A

Général

Spécification IP du boîtier	IP20 (IP42 option de l'armoire – armoire seulement)
Spécification IP du panneau frontal d'opération	IP54
Spécification du degré de pollution	2
Température d'opération	0 °C à 40 °C
Refroidissement	Air forcé
Déclassement en température	> 40 °C, déclassement de 2 % de charge par °C jusqu'à un maximum de 50 °C
Déclassement de capacité avec l'élévation	-1,2 %/100 m pour des applications au-dessus de 1000 m et un maximum de 3000 m
Humidité	< 95 % sans condensation
Bruit	75-85 dBA typique

Capacité électromagnétique

Environnement	CISPR 11 classe A
---------------	-------------------

Boîtier	
Matériel	Acier électro-galvanisé
Couleur	RAL 7035
Épaisseur des panneaux	Panneaux latéraux 1.5 mm
	Panneau arrière 2 mm
Accès au boîtier	Portes sur pentures avec serrure à clé - armoire seulement
Standards	
ISO 9001 Système d'assurance qualité	
IEC62103/EN 50 178	
Marquage CE	
Classifications marines sur demande DV, DNV, GL, ABS, CCS	

Source : ABB.

ANNEXE C : EXEMPLE DE CONVERTISSEURS DE FRÉQUENCE STATIQUES
HAUTE TENSION POUR APPLICATION D'ALIMENTATION QUAI-NAVIRE

Tableau 32
ABB ACS6080 SFC spécifications techniques

Entrée	
Tension	6.132 kV ± 10 % (ou toute tension avec transformateur d'entrée)
Système	3 phases TN
Fréquence	50 Hz ou 60 Hz
Variation de fréquence	± 5 Hz
Section d'entrée	Pont de diodes à 12/24 impulsions / redresseur actif
Total de la distorsion harmonique	Conforme à la norme CEI 61000-2-4
Sortie	
Capacité	5-27 MVA
Tension	6,6 kV / 11 kV
Fréquence	50 Hz ou 60 Hz
Total de la distorsion harmonique	Conforme à la norme IEC/ISO/IEEE 80005-1
Rendement	>98%
Limite de court-circuit	Selon puissance nominale et modèle
Interface	
Interface de contrôle	Câblé, Modbus-TCP, Anybus S, Interface homme-machine

Interface de contrôle

Entrées numériques	Démarrage/Arrêt/Mise à zéro
Sortie numérique (relais)	Marche (NO), Avertissement (NO), Faute (NF)
Spécifications des relais de sortie	230 Vca 1 A

Général

Spécification IP du boîtier	Coffret intérieur ou conteneur extérieur IP 32/42/54
Couleur standard	RAL 7035
Spécification du degré de pollution	2
Température d'opération	+ 5°C ... 32°C standard/pas de déclassement
Refroidissement	Refroidissement liquide en boucle fermée
Déclassement en température	-40°C ... 50°C avec déclassement
Humidité	< 95 % sans condensation

Capacité électromagnétique

Environnement	IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-4, IEC 61000-6-2
---------------	---

Standards et conformité aux normes

ISO/IEEE 80005-1 & 80005-3, IEC 62103/ENSO178, IEC 60146-2, IEC 61800-3, IEC 60721-1, IEC 61071, IEC 60871-1, IEC 61439, IEC 62271-1, IEC 60071-1, IEC 60664, IEC 60529, IEEE 519, IEC 61000-2-4

Marquage CE

Classifications marines sur demande DV, DNV, GL, ABS, CCS

Source : ABB.

ANNEXE D : MARCHÉ DE L'ALIMENTATION À QUAI — PRINCIPAUX FOURNISSEURS DE SERVICES¹⁵

Siemens (Allemagne) : Siemens est une grande entreprise d'ingénierie et de fabrication, spécialisée dans les domaines de l'électrification, de l'automatisation et de la numérisation. La société fournit des produits et des solutions de numérisation innovants pour des opérations optimisées dans de nombreux secteurs. Il répond aux besoins de diverses industries, telles que les infrastructures, l'énergie, le médical et la finance. Siemens exerce ses activités à travers 7 divisions commerciales, à savoir Gaz et électricité, Infrastructure intelligente, Industries numériques, Siemens Healthineers, Mobilité, Siemens Gamesa Renewable Energy et Financial Services. La société propose des systèmes d'alimentation à quai dans le cadre de son segment Smart Infrastructure Business.

Schneider Electric (France) : Schneider Electric conçoit, développe, fabrique et fournit des équipements électriques pour plusieurs industries. La société se concentre sur l'accès à l'énergie et à la numérisation en fournissant des solutions numériques d'énergie et d'automatisation pour l'efficacité et la durabilité. Schneider Electric dispose d'un vaste portefeuille de produits comprenant des produits tels que des relais, des appareillages de commutation, des transformateurs, des commandes de moteurs, des équipements électriques marins, des logiciels associés, etc. Il répond aux besoins de nombreuses industries, notamment la marine, l'automobile, la santé, le pétrole et le gaz, l'information, etc. Schneider Electric propose également des services de conseil pour toutes les industries. La société exerce ses activités dans 2 segments, à savoir la gestion de l'énergie et l'automatisation industrielle. Les systèmes d'alimentation à quai sont proposés par la société dans le cadre de son secteur d'activité Gestion de l'énergie.

Cavotec (Suisse) : Cavotec est l'une des principales sociétés d'ingénierie qui met l'accent sur la conception et la fabrication de systèmes automatisés de connexion et d'électrification pour les ports, les aéroports, la recharge des véhicules et les applications industrielles. La société propose divers systèmes, notamment l'alimentation à quai, l'amarrage automatisé, les systèmes de branchement automatisés et l'électrification des grues pour répondre aux besoins du secteur industriel, tels que les ports et la mer, les aéroports, les mines, le pétrole et le gaz. La société propose des solutions d'alimentation à quai, telles que des enrouleurs motorisés, des télécommandes radio et des câbles. La société opère à travers 2 secteurs d'activité, à savoir

¹⁵ Source, traduction de : Shore Power Market by Installation (Shoreside, Shipside), by Connection (New Installation, Retrofit), Component (Transformers, Frequency Converters, and More), Power Output (Up to 30 MVA, 30 to 60 MVA, Above 60 MVA), and Region—Global Forecast to 2025.

Aéroports & Industrie et Ports & Maritime. Cavotec propose des systèmes d'alimentation à quai et à quai via son segment Ports et Maritime.

Wärtsilä (Finlande) : Wärtsilä fait partie des leaders mondiaux qui se concentrent sur la fourniture de produits et de solutions à cycle de vie complet pour les marchés de la marine et de l'énergie. La société propose divers produits pour les applications marines à la marine marchande, aux croisières, aux ferries, à la pêche, à l'offshore, aux navires spéciaux, aux remorqueurs et aux yachts. Wärtsilä exerce ses activités dans 2 segments, à savoir Energy Solutions et Marine Solutions. La société fournit des solutions d'alimentation à quai par le biais de son secteur d'activité Marine Solutions. Dans ce segment d'activité, la société dessert également les industries maritimes et pétrolières et gazières, couvrant les navires marchands traditionnels : transporteurs de gaz, croisières et traversiers; marine; navires spéciaux; installations et navires offshore; et les installations de gaz terrestres.

Danfoss (Danemark) : Danfoss est l'une des principales sociétés de conception et de fabrication qui se concentrent sur la fourniture de produits et de solutions écoénergétiques pour diverses industries, telles que l'automobile, la marine, les infrastructures, l'énergie, l'eau et les eaux usées. La société opère à travers 4 segments d'activité, à savoir Danfoss Power, Danfoss Heating, Danfoss Cooling et Danfoss Drives. La société propose des composants d'alimentation à quai dans le cadre de ses segments d'activité Danfoss Power Solutions et Danfoss Drives.

ABB (Hitachi) (Suisse) : ABB est l'une des principales sociétés proposant des produits et services innovants orientés vers la technologie à diverses industries. Ses produits et services sont utilisés pour soutenir les opérations électrifiées et les améliorer numériquement. ABB propose ses produits à des secteurs tels que les ports, la distribution d'électricité, la production d'électricité, l'automatisation industrielle, les sciences de la vie, la marine, le pétrole et le gaz et la transmission d'électricité. La société exerce ses activités dans 4 segments, à savoir l'électrification, l'automatisation industrielle, la robotique et l'automatisation discrète et le mouvement. Elle avait également un segment d'activité distinct, à savoir « Power Grids », qui a été vendu à Hitachi en 2018. L'acquisition par Hitachi devrait être finalisée d'ici le premier semestre 2020. La société proposait des solutions intelligentes d'électricité du quai aux navires et aux ports via son secteur d'activité « Power Grids ».

Cochran Marine maintenant **Watts Marine Shore Power Solutions** (États-Unis): Cochran Marine, le principal fournisseur de systèmes de connexion d'alimentation à quai maritime en Amérique du Nord. Cette société a converti la fréquence de son système 60 Hertz (Hz) existant pour prendre en charge le marché mondial 50 Hz afin d'apporter une alimentation à quai aux ports en Europe et dans le monde.

IGUS (Allemagne) : Igus fabrique et distribue des composants de machines et des produits d'ingénierie personnalisés. La société propose divers produits, tels que des systèmes et des câbles d'alimentation en énergie, des systèmes d'alimentation à quai, des paliers lisses, des axes linéaires électriques et des couronnes d'orientation en polymère. Les produits, solutions et services de la société répondent principalement aux besoins de la fabrication automobile, de l'emballage des aliments et boissons, des équipements de laboratoire aérospatial et des industries des équipements offshore et marins.