

Modélisation REM d'une hybridation de grues de vraquier

Jacob Belliveau, Marianne Côté, Guillaume Joannis, Jules Lamarre, Maxime Normandin, Justin Robitaille

Résumé – Cet article présente la modélisation d'un système de grues hybrides de vraquier, où les moteurs de hissage permettent de faire du freinage régénératif. Quatre principaux systèmes sont compris : les charges auxiliaires, les génératrices, l'accumulateur d'énergie et le système de gestion de l'énergie. La modélisation, réalisée dans le format de représentation énergétique macroscopique (REM), permettra ultérieurement d'évaluer les impacts économiques et environnementaux.

1. Introduction

Le transport naval constitue une solution plus économique et écologique comparativement aux solutions terrestres telles que le train ou le camion [1]. Parmi les différentes classes de navires, on retrouve les vraquiers, qui transportent du vrac. À quai, ils peuvent consommer de 1,5 à 2 tonnes de carburant par jour. Cette consommation élevée de diesel a un impact économique pour l'armateur dû à l'achat de cette quantité de carburant, en plus de l'impact environnemental relié aux émissions de CO₂, de NO_x et de SO_x [2]. Les nouvelles réglementations relatives aux émissions devenant beaucoup plus restrictives, elles engendrent des coûts supplémentaires pour l'adaptation [3]. Ces impacts encouragent les armateurs à chercher différentes solutions pour réduire leur empreinte écologique et leurs coûts opérationnels.

La consommation de carburant à quai est principalement causée par l'utilisation des grues de pont du navire pour le chargement ou le déchargement de la cargaison. L'opération de ces grues nécessite une quantité d'énergie importante : 50 à 80% de toute l'énergie consommée par le navire selon le nombre de grues en fonction. Cette énergie est entièrement fournie par des génératrices auxiliaires.

Une des possibilités pour réduire la consommation de carburant est l'hybridation des grues. Une hybridation de grues consiste à remplacer le moteur hydraulique de hissage par un moteur électrique pouvant faire du freinage régénératif. La majeure partie de l'énergie utilisée lors de la montée d'une charge pourrait être récupérée lors de la descente de cette même charge. Un tel système requiert une étude rigoureuse pour en déterminer la faisabilité. Afin de réaliser les études, il est nécessaire d'avoir un modèle équivalent sur lequel se baser. Le cadre de cet article se concentre sur cet aspect : établir un modèle équivalent du système de grues hybrides. À partir de ce système, il sera donc possible à l'aide d'une autre étude de quantifier la consommation de carburant des génératrices auxiliaires.

2. Études similaires

Dans le cadre du plan Proteus [4], le freinage régénératif lors des opérations à quai a été proposé comme moyen de réduire

les émissions des ports. Les auteurs avancent que la puissance régénérée pourrait être stockée au moyen de batteries ou retournée au réseau du port. Grâce à l'utilisation judicieuse d'un système de gestion de l'énergie, la consommation de puissance pourrait être abaissée de 30% par rapport à la consommation maximale. Il est à noter que les grues étudiées par les auteurs de cet article sont les grues du port. Les auteurs concluent qu'une telle solution pourrait être une partie importante d'un plan d'électrification de l'industrie maritime.

Une autre étude, sur la modélisation de grues hybrides pour vraquiers [5], concerne directement la problématique soulevée. Un système d'emménagement d'énergie (ESS), constituée d'une batterie au lithium-ion, est utilisé avec des grues de pont pouvant faire du freinage régénératif. L'ESS sert à appuyer les génératrices aux moments opportuns afin de diminuer la consommation de carburant. Un système de gestion de l'énergie gère les échanges d'énergie entre les charges, les génératrices et l'ESS. Cette étude conclut sur une économie de carburant de 30% et des économies de coûts annuels d'environ 110 000\$ USD et d'un retour sur l'investissement en moins d'un an. Ces données pourront servir à titre de comparaison avec la solution présentée ici.

Les recherches effectuées sur des projets similaires montrent qu'un système de freinage régénératif couplé à une grue est non seulement réalisable, mais aussi profitable.

3. Solution proposée

3.1 Objectifs, contraintes, livrables

Le projet consiste en une modélisation de l'hybridation de grues d'un vraquier. L'objectif principal est d'avoir un support pour pouvoir effectuer une analyse technico-environnementale de l'hybridation de grues de vraquier, telle que la réduction des GES annuels et la diminution des coûts d'opération. L'analyse ne fait cependant pas partie de ce projet, mais peut être effectuée à partir des conclusions qui en sont tirées.

Les livrables de ce projet sont le modèle équivalent et la quantité de réduction de carburant par jour lors des opérations de chargement à quai.

La conception du modèle devra tenir compte entre autres des normes maritimes ainsi que des contraintes physiques (espace disponible pour l'équipement), techniques (réseau du bateau, fonctionnement des génératrices) et environnementales (température, air salin, fortes vibrations).

3.2 Concept global

Le système de grues hybrides consiste en quatre sous-systèmes principaux : l'accumulateur d'énergie, le système de gestion de l'énergie, les génératrices et les charges.

Le système d'accumulation d'énergie est composé de batteries, de supercondensateurs et de convertisseurs. Sa fonction principale est l'accumulation de l'énergie produite par le freinage régénératif effectué par les grues et le retour d'énergie au réseau pour assister les génératrices.

Le système de gestion de l'énergie est un logiciel qui contrôle les échanges de puissance entre la charge, les génératrices et l'accumulateur d'énergie. Ce système s'assure du respect des limites fonctionnelles de toutes les composantes (ex. : état de charge minimal des batteries) tout en optimisant les échanges de puissance pour maximiser l'économie de carburant.

Le système de génératrices comporte trois génératrices auxiliaires fonctionnant au diesel et fournissant de la puissance aux systèmes auxiliaires du navire.

Le sous-système de charges englobe l'ensemble des charges auxiliaires du navire, c'est-à-dire celles qui ne relèvent pas de la propulsion du navire. Des exemples de charges auxiliaires sont les grues, les diverses pompes, la climatisation et les propulseurs d'étraves. Ce ne sont pas tous les vraquiers qui sont équipés de grues de pont. Pour ceux qui en ont, on en compte généralement quatre.

La figure 1 résume le concept global du projet. Les modifications ajoutées par rapport à un système conventionnel non hybride sont encadrées en pointillé. Le système de gestion de l'énergie est compris dans l'accumulateur.

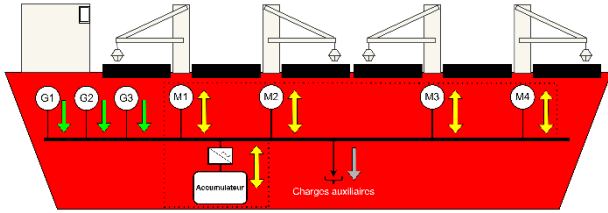


Figure 1 Concept global du projet. Échanges d'énergie : fournit (vert), consomme (gris), bidirectionnel (jaune)

3.3 Méthodologie

Pour la modélisation du navire, le *Federal Baltic* de Fednav servira comme point de référence. Il s'agit d'un vraquier de type *handysize lakier*, soit un navire agile se déplaçant généralement dans les Grands Lacs.

Les informations disponibles sur le *Federal Baltic*, celles obtenues du client, ayant des compétences dans le domaine maritime, ainsi que celles obtenues de recherches documentaires sur des systèmes similaires seront utilisées pour concevoir les modèles des sous-systèmes.

Un profil d'opération des grues sera élaboré à partir des manœuvres typiques et de leur durée dans l'industrie. Ce profil servira de point de départ en représentant une personne qui opère une grue.

Le système sera conçu et évalué au moyen d'une simulation se basant sur la représentation énergétique macroscopique (REM). Cette simulation sera effectuée à l'aide de Matlab et de Simulink. Les commandes seront effectuées par inversion du système.

Pour vérifier le modèle de simulation et le système de gestion de l'énergie, certains choix de composants devront être faits pour dimensionner la solution.

4. Modélisation

Cette section présente la démarche de modélisation de chacun des sous-systèmes.

4.1 Accumulateur d'énergie

L'accumulateur d'énergie est composé de trois principaux éléments : un banc de batteries, un banc de supercondensateurs et des convertisseurs pour interfacer ceux-ci avec le réseau électrique du navire. L'utilité des batteries est pour délivrer une puissance sur une longue durée, alors que les supercondensateurs servent à fournir la puissance pour les pics transitoires. Une topologie semi-active a été retenue, où le contrôle peut être effectué du côté du banc de batteries. Le banc de supercondensateurs est directement relié au bus DC.

Afin de modéliser l'accumulateur d'énergie, les modèles des batteries, des supercondensateurs et des convertisseurs ont d'abord été développés. Les équations utilisées pour la modélisation de l'accumulateur sont tirées de [6]. Le schéma REM global de la solution proposée est montré à la figure 2.

Convertisseurs

Le sous-système de l'accumulateur d'énergie comporte deux convertisseurs : un DC/DC entre le bus DC et la batterie, ainsi qu'un DC/AC entre le bus DC et le réseau AC du navire. Le convertisseur DC/AC est modélisé par (1) et (2), tandis que le convertisseur DC/DC est modélisé par (3) et (4).

$$u_{AC} = m_{inv} u_{DC} \quad (1)$$

$$i_{DC} = m_{inv} i_{AC} \quad (2)$$

u_{AC} : Tension AC du réseau du navire (V)

m_{inv} : Facteur de correction

u_{DC} : Tension du bus DC (V)

i_{DC} : Courant DC du convertisseur (A)

i_{AC} : Courant AC du convertisseur (A)

$$u_{ch} = m_{ch} u_{DC} \quad (3)$$

$$i_{ch} = m_{ch} n_{ch_1}^k i_{bat} \quad (4)$$

u_{ch} : Tension vers les batteries (V)

m_{ch} : Facteur de correction

u_{DC} : Tension provenant du bus DC (V)

i_{ch} : Courant vers le bus DC (A)

$n_{ch_1}^k$: Efficacité du convertisseur

i_{bat} : Courant provenant des batteries (A)

L'évaluation préliminaire nécessite une puissance de conversion de 200 kW. Les deux convertisseurs choisis sont de la gamme RedPrime de Zekalabs et d'une puissance de 200 kW. Le tableau 1 présente les caractéristiques de ces appareils. À partir des plages d'opération, il a été déterminé que la tension désirée du banc de batteries est de 120 V, alors que la tension désirée du banc de supercondensateurs est de 750 V.

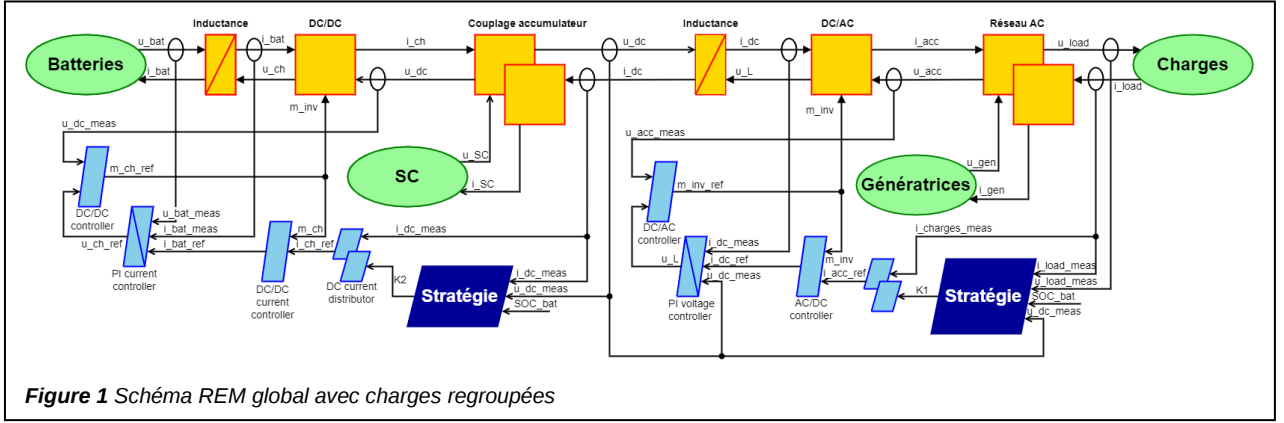


Figure 1 Schéma REM global avec charges regroupées

Caractéristique	DC/DC	DC/AC
Puissance nominale (kW)	200	400
Plage d'opération DC (V)	10-800/60-850	730-1200
Plage d'opération AC (V)	N/A	380-480
Courant maximal (A)	400	400
Efficacité (%)	98	97

Tableau 1 Caractéristiques des convertisseurs

Batteries

L'état des batteries est modélisé par la paire d'équations suivantes :

$$u_{bat} = U_{OC_{bat}}(SoC_{bat}) - r_{bat}i_{bat} \quad (5)$$

$$SoC_{bat} = SoC_{bat_{init}} - \frac{100}{3600C_{bat}} \int i_{bat} dt \quad (6)$$

- u_{bat} : Tension des batteries (V)
- $U_{OC_{bat}}$: Tension en circuit ouvert des batteries (V)
- SoC_{bat} : État de charge des batteries
- r_{bat} : Résistance interne des batteries (Ω)
- i_{bat} : Courant des batteries (A)
- C_{bat} : Capacité de batteries (Ah)

Le modèle du banc de batteries est développé à partir de la cellule CB310 de technologie LiFePO4 de CATL. La courbe de tension en circuit ouvert en fonction du SOC est tirée du site du fabricant [7]. 37 cellules en série sont utilisées pour atteindre la tension désirée. Le nombre de branches en parallèle sera dimensionné en simulation. Les caractéristiques du banc de batteries initial sont présentées au tableau 2.

Caractéristique	1 cellule	1 branche
Tension nominale (V)	3,2	118,4
Plage d'opération (V)	2,5-3,65	92,5-135,05
Capacité (Ah)	280	280
Résistance (Ω)	0,004	0,148

Tableau 2 Caractéristiques du banc de batteries initial

Supercondensateurs

L'état des condensateurs est modélisé par la paire d'équations suivante :

$$u_{sc} = u_{sc_{init}} - \frac{1}{C_{sc}} \int i_{sc} dt - r_{sc}i_{sc} \quad (7)$$

$$SoC_{sc}(\%) = \frac{u_{sc}}{u_{sc_{nom}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

- u_{sc} : Tension des condensateurs (V)
- $u_{sc_{init}}$: Tension initiale des condensateurs (V)
- C_{sc} : Capacité des condensateurs (F)
- i_{sc} : Courant des condensateurs (A)
- r_{sc} : Résistance des condensateurs (Ω)
- SoC_{sc} : État de charge des condensateurs (%)
- $u_{sc_{nom}}$: Tension nominale (V)

À l'instar des batteries, le modèle Simulink du banc de supercondensateurs est une mise à l'échelle. Ici, le banc est dimensionné à partir de modules de supercondensateurs, dont le modèle choisi est le XLR-48R6167-R, un module de 48,6 V, 166 F, fabriqué par Eaton. 19 modules en série sont utilisés pour atteindre la tension désirée en laissant une marge de tension de 20%. Le nombre de branches en parallèle sera dimensionné en simulation. Les caractéristiques du banc de supercondensateurs initial sont présentées au tableau 3.

Caractéristique	1 module	1 branche
Tension nominale (V)	48,6	923,4
Capacité (F)	166	8,736
Résistance (Ω)	0,005	0,095

Tableau 3 Caractéristiques du banc de SC initial

Commande

Les équations de commande par inversion du système sont les suivantes :

$$i_{acc_{ref}} = K_1 \cdot i_{load_{meas}} \quad (9)$$

$$i_{dc_{ref}} = m_{inv_{ref}} \cdot i_{acc_{ref}} \quad (10)$$

$$u_{L_{ref}} = u_{dc_{meas}} - C_L(t)[i_{dc_{ref}} - i_{dc_{meas}}] \quad (11)$$

$$m_{inv_{ref}} = \frac{u_{acc_{meas}}}{u_{L_{ref}}} \quad (12)$$

$$i_{ch_{ref}} = K_2 \cdot i_{dc_{meas}} \quad (13)$$

$$i_{bat_{ref}} = \frac{i_{ch_{ref}}}{m_{ch_{ref}}} \quad (14)$$

$$u_{ch_{ref}} = u_{bat_{meas}} - C_{ch}(t)[i_{bat_{ref}} - i_{bat_{meas}}] \quad (15)$$

$$m_{ch_{ref}} = \frac{u_{ch_{ref}}}{u_{dc_{meas}}} \quad (16)$$

$i_{load\ meas}$:	Courant total des charges mesuré (A)
$u_{load\ meas}$:	Tension d'alimentation du réseau AC (V)
K_1 :	Facteur de répartition entre les génératrices et l'accumulateur
$i_{acc\ ref}$:	Courant de référence de l'accumulateur (A)
$m_{inv\ ref}$:	Rapport de référence de conversion de tension du convertisseur DC/AC
$i_{dc\ ref}$:	Courant de référence du bus DC (A)
$i_{dc\ meas}$:	Courant mesuré du bus DC (A)
$C_L(t)$:	Fonction d'asservissement de l'inductance du bus DC
$u_{dc\ meas}$:	Tension mesurée du bus DC
$u_{L\ ref}$:	Tension de référence de l'inductance du bus DC (V)
$u_{acc\ meas}$:	Tension mesurée de l'accumulateur (V)
K_2 :	Facteur de répartition entre les batteries et les supercondensateurs
$i_{ch\ ref}$:	Courant de référence de l'inductance des batteries (A)
$i_{bat\ ref}$:	Courant de référence de la batterie (A)
$i_{bat\ meas}$:	Courant mesuré de la batterie (A)
$C_{ch}(t)$:	Fonction d'asservissement de l'inductance des batteries
$u_{bat\ meas}$:	Tension mesurée de la batterie (V)
$u_{ch\ ref}$:	Tension de référence de l'inductance des batteries (V)

4.2 Système de gestion de l'énergie

Le système de gestion de l'énergie composé de deux sous-systèmes qui appliquent des ensembles de règles visant à respecter les limites fonctionnelles des composants et à optimiser la consommation de carburant. Le premier de ces sous-systèmes est celui qui répartit la puissance entre l'accumulateur d'énergie et la génératrice, et le deuxième est celui qui répartit l'énergie entre les batteries et le supercondensateur au sein de l'accumulateur d'énergie.

Sous-système 1

Le système qui effectue la répartition de la puissance entre la génératrice et l'accumulateur d'énergie se base sur le principe de réduction des pointes de demandes (*peak shaving*). La puissance fournie par la génératrice est maintenue à une valeur choisie. Lorsque la demande du réseau est inférieure à cette valeur, l'accumulateur utilise la différence afin de recharger la batterie et le supercondensateur. Lorsque la demande est supérieure à cette valeur, l'accumulateur fournit la différence de puissance au réseau.

Sous-système 2

Le système qui effectue la répartition du courant entre les batteries et les supercondensateurs est basé sur un ensemble de règles visant à protéger les composants et à optimiser la consommation de carburant. Le système s'assure que l'état de charge des batteries ne dépasse pas 80% de la charge maximale ni ne tombe sous 20%. De façon analogue, le système s'assure que la tension des supercondensateurs ne dépasse pas 90% ni ne tombe sous 70% de la tension maximale. Lorsque ces limites de sécurité sont respectées, le système utilise un ensemble de fonctions qui prennent en compte l'état de charge des batteries et des condensateurs pour répartir de façon optimale le courant.

4.3 Génératrice

Le modèle du système générateur permet de modéliser des scénarios où 1, 2 ou 3 génératrices sont utilisées simultanément. Il comporte trois instances de génératrices. Chacune d'elle est

modélisée en se basant sur des données de consommation de carburant obtenues auprès du client ainsi que des données obtenues auprès du fabricant. La figure 3 illustre de façon simplifiée le fonctionnement du modèle.

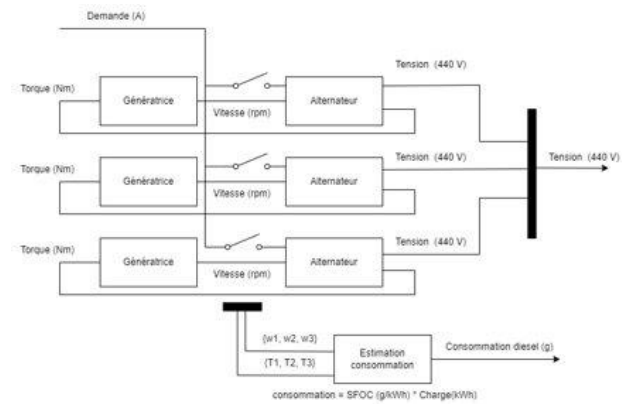


Figure 3 Modèle global des génératrices

La demande en courant du réseau est l'entrée. Le sous-module *Alternateur*, qui contient une table de référence (lookup table), permet de convertir cette entrée en couple mécanique que la génératrice doit développer. La vitesse de rotation est alors évaluée par le module *Génératrice*, encore au moyen d'une table de référence. À partir de la vitesse de rotation et du couple développé, il est possible d'estimer la demande de puissance. On peut alors calculer la quantité de carburant consommée à partir de la courbe de consommation standard de carburant fournie par le client. Il est à noter que ce modèle pose l'hypothèse que la tension de sortie est maintenue à 440 V. Cette hypothèse permet de diminuer la complexité du problème et consiste en une bonne approximation puisqu'en régime permanent les variations de tensions sont faibles et centrées autour de la tension nominale. Cependant, cette hypothèse ne permet pas de simuler certains événements, tels qu'un écoulement de tension, des transitoires de manœuvres et des défauts. Cette hypothèse est donc insuffisante pour évaluer la sécurité de la solution, mais ne constitue pas l'objectif de ce projet.

4.4 Charges

Comme mentionné précédemment, les charges du navire comprennent les grues, le CVC, les pompes et tout autre appareil électrique à bord. À des fins de simplification, les grues seront une charge à part entière, alors que toutes les autres charges seront regroupées ensemble. On leur accordera une puissance fixe de 200 kW. Cette valeur est déterminée à partir des données du *Federal Baltic*.

Les grues sont modélisées plus en détail, en incluant le moteur de hissage, la transmission et la force gravitationnelle agissant sur la masse suspendue. L'intérêt d'une modélisation complète est d'avoir une meilleure représentation de la puissance en temps réel pour ainsi mieux dimensionner l'accumulateur. Les manœuvres pour tourner et incliner la grue sont prises en compte séparément, puisqu'il n'y a pas de freinage régénératif sur ces moteurs. Le peu de gain d'énergie potentiel

sur ces moteurs serait trop faible. Le schéma REM équivalent d'une grue est présenté à la figure 4.

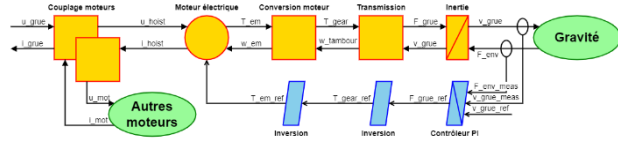


Figure 4 Schéma équivalent REM d'une grue

Le moteur de grue utilisé pour le hissage dans la *Federal Baltic* est un moteur de 250 HP. L'efficacité du moteur η_m est tirée d'une carte d'efficacité couple-vitesse d'un moteur générique [8]. Les éléments de la transmission, tels que le tambour et les ratios de poulies, sont tirés des plans des grues du *Federal Baltic* aussi fournis par le client. La capacité maximale de chaque grue est de 35 tonnes. Les équations de la machine tournante, comme celles de l'accumulateur, proviennent de .

$$i_{grue} = i_{hoist} + i_{mot} \quad (17)$$

$$u_{hoist} = u_{mot} = u_{grue} \quad (18)$$

$$i_{stator} = \frac{T_{em} \omega_{em}}{u_{stator} \eta_m} \quad (19)$$

$$T_{em} = T_{em ref} \quad (20)$$

$$T_{gear} = T_{em} \frac{N_2}{N_1} R_p \quad (21)$$

$$\omega_{em} = \omega_{tambour} \frac{N_2}{N_1} R_p \quad (22)$$

$$F_{grue} = \frac{T_{em}}{r_{tambour}} \quad (23)$$

$$\omega_{tambour} = \frac{v_{grue}}{r_{tambour}} \quad (24)$$

$$v_{grue} = \int_0^t \frac{F_{grue} - F_{res}}{m_{charge}} dt \quad (25)$$

$$F_{res} = g \cdot m_{charge} \quad (26)$$

i_{grue} :	Courant total consommé par la grue (A)
u_{grue} :	Tension d'alimentation de la grue (V)
i_{mot} :	Courant des moteurs secondaires (A)
u_{mot} :	Tension des moteurs secondaires (V)
i_{hoist} :	Courant du moteur de hissage (A)
u_{hoist} :	Tension du moteur de hissage (V)
T_{em} :	Couple du moteur de hissage (Nm)
ω_{em} :	Vitesse angulaire du moteur de hissage (rad/s)
T_{gear} :	Couple à la transmission (Nm)
N_1, N_2 :	Nombre de tours des poulies
R_p :	Ratio de largeur des poulies
$\omega_{tambour}$:	Vitesse angulaire du tambour (rad/s)
F_{grue} :	Force de montée de la grue (N)
$r_{tambour}$:	Rayon du tambour (m)
v_{grue} :	Vitesse de montée de la masse (m/s)
F_{env} :	Force de résistance de l'environnement (N)
m_{charge} :	Masse de la marchandise à soulever (kg)
g :	Accélération gravitationnelle (m/s ²)

Les équations de commande par inversion du système sont les suivantes :

$$F_{grue ref} = C_v(t) [v_{grue ref} - v_{grue}] + F_{env} \quad (27)$$

$$T_{gear ref} = F_{grue ref} \cdot r_{tambour} \quad (28)$$

$$T_{em ref} = \frac{T_{gear ref}}{\frac{N_2}{N_1} R_p} \quad (29)$$

$F_{grue ref}$:	Force de référence de montée (N)
$C_v(t)$:	Fonction d'asservissement de la vitesse
$v_{grue ref}$:	Vitesse de référence de montée (m/s)
$T_{gear ref}$:	Couple de référence à la transmission (Nm)
$T_{em ref}$:	Couple de référence du moteur de hissage (Nm)

La commande principale de ce système est la vitesse de référence de la montée ou descente de la masse. Elle est déterminée à partir d'un profil d'opération typique d'une grue. La puissance résultante en fonction du temps pour un cycle de chargement, pour tous les moteurs, est présentée à la figure 5.

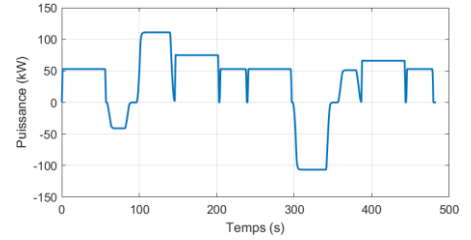


Figure 5 Puissance d'une grue en fonction du temps (1 cycle)

Une journée complète d'opération comporte une grande quantité de ces cycles. De plus, les quatre grues ne fonctionnent pas toujours; la vitesse de chargement et déchargement étant influencée par la valeur des contrats à terme de marchandise. Le profil pour une journée complète est élaboré en tenant compte des pauses des travailleurs, de leurs horaires de travail et du nombre de grues en fonction.

5. Analyse des résultats

Pour déterminer l'efficacité du système, le cas typique est étudié : deux grues sont en fonction avec une masse de 35 tonnes. Aussi, la simulation est configurée avec deux génératrices en fonction, ce qui est le cas habituel.

Après plusieurs itérations d'ajustements sur les règles du système de gestion de l'énergie et sur le dimensionnement des batteries et des supercondensateurs, il est possible d'obtenir en simulation une réduction de carburant de 367 000 g de diesel après une journée, ce qui correspond à une économie de 24 % comparativement à la solution traditionnelle sans freinage régénératif. Pour y arriver, le banc de batteries contient 50 branches (pour un total de 1657,5 kWh) et le banc de supercondensateur contient 2 branches (pour un total de 2070 kWh). Pour maximiser l'efficacité des génératrices, leur puissance combinée est maintenue à environ 220 kW, tandis que l'accumulateur fournit ou absorbe la différence par rapport à la puissance des charges. La répartition de la puissance entre les génératrices et le système d'accumulation pour un cycle est montrée à la figure 6, où deux grues sont utilisées.

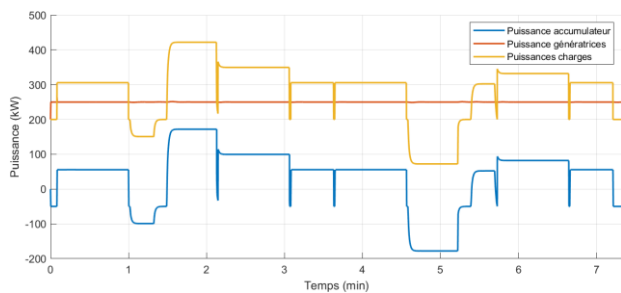


Figure 6 Répartition de la puissance des charges

Pour une simulation sur une journée complète, l'accumulateur est capable d'assister les génératrices sur toute la durée. En se rechargeant à la fin de l'horaire de travail, il est prêt pour une deuxième journée d'opération consécutive. La figure 7 montre les résultats obtenus sur une journée de simulation avec deux grues en fonction, trois quarts de travail (un quart dure 4 heures avec 15 minutes de pause) et deux pauses pour manger d'une heure chacune.

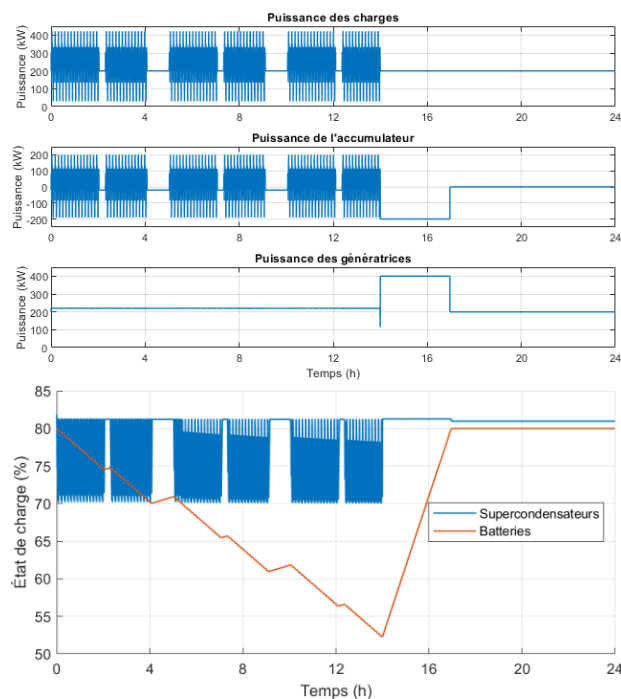


Figure 7 Résultats sur une journée complète

La modélisation des sous-systèmes de la solution permet de simuler son opération lorsque le freinage régénératif est employé et lorsqu'il ne l'est pas. À partir de ces résultats, le modèle des génératrices permet d'évaluer la réduction de la consommation de carburant à 24% sur une base de 24 heures sous les conditions détaillées précédemment.

6. Conclusion

La différence de consommation de carburant avec et sans l'accumulateur évaluée avec la simulation permet de quantifier la réduction des coûts de carburant et des émissions de CO₂. Lors

des opérations à quai de chargement et de déchargement, les économies de carburant sur une période de 24 heures sont de 686 \$ avec le coût actuel du carburant. On évite ainsi de relâcher environ 0,987 kg de CO₂ dans l'atmosphère [9].

Cependant, une analyse économique détaillée serait requise pour déterminer la rentabilité d'un tel projet et une analyse environnementale détaillée serait requise pour évaluer correctement l'impact environnemental de cette solution, notamment en considérant l'empreinte du matériel requis pour la réaliser.

Références

- [1] R. Bourdillon, «Un point cinq,» 6 Septembre 2018. [En ligne]. Available: <https://unpointcinq.ca/dossier-special/marine-marchande-empreinte-carbone/>. [Accès le 12 Avril 2023].
- [2] Rentar, «Diesel Emissions: Types and Effects of Diesel Engine Emissions,» 9 Août 2018. [En ligne]. Available: <https://rentar.com/diesel-emissions-types-effects-diesel-engine-emissions/>. [Accès le 14 Janvier 2022].
- [3] United Nations Conference on Trade and Development, «Review of Maritime Transport,» 2022.
- [4] D. V. Lyridis, J. M. Prousalidis, A.-M. Lekka, V. Georgiou et L. Nakos, «Holistic Energy Transformation of Ports,» *IEEE Electrification Magazine*, vol. 11, n° %11, pp. 8-17, Mars 2023.
- [5] E. Ovrum et T. F. Bergh, «Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation,» *Applied Energy*, pp. 162-172, 15 Août 2015.
- [6] N. Bao-Huy, G. Ronan, T. João Pedro F. et B. Alain, «Real-Time Energy Management of Battery/Supercapacitor Electric Vehicles Based on an Adaptation of Pontryagin's Minimum Principle,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 68, pp. 203-212, Janvier 2019.
- [7] CATL, «Storing Infinite Energy,» Février 2023. [En ligne]. Available: https://www.catl.com/en/uploads/1/file/public/202303/20230315092000_ahw9vpn63j.pdf. [Accès le 8 Mars 2023].
- [8] Ritari, Antti, J. Vepsäläinen, K. Kivekäs, K. Tammi et H. Laitinen, «Energy Consumption and Lifecycle Cost Analysis of Electric City Buses with Multispeed Gearboxes,» *Energies*, vol. 13, n° %18, 24 Avril 2020.
- [9] United States Environmental Protection Agency, «Greenhouse Gases Equivalencies Calculator,» 4 Avril 2023. [En ligne]. Available: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>. [Accès le 13 Avril 2023].