

FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE

Programme REMOVE

Activités de manutention

Version juin 2024

Sommaire

Sommaire	3
Introduction aux fiches actions	4
Présentation synthétique des fiches actions	9
Axe 1 : Optimisation des engins de manutention	13
A1 FA 1 : Renouvellement et modernisation des engins de manutention	14
A1 FA 2 : Stop and start.....	20
A1 FA 3 : Freinage régénératif.....	23
A1 FA 4 : Ajout de capteurs d'état des pneus	29
Axe 2 : Mode de propulsion des engins de manutention	34
A2 FA 1 : 100 % électrique.....	35
A2 FA 2 : Hybride diesel batterie.....	46
A2 FA 3 : GNV	54
A2 FA 4 : Dual-fuel GNV-diesel.....	60
A2 FA 5 : Hydrogène	63
A2 FA 6 : Autres modes de propulsion	71
A2 FA 7 : Collecte des consommations	76
A2 FA 8 : Analyse des consommations.....	80
Axe 3 : Organisation des flux.....	82
A3 FA 1 : Optimisation des opérations.....	83
A3 FA 2 : Automatisation et digitalisation des engins.....	88
Axe 4 : Information / Sensibilisation	92
A4 FA 1 : Formation éco-conduite.....	93

Introduction aux fiches actions

Présentation du programme REMOVE

Le report modal des transports de marchandises vers les modes les plus économes en énergie et les moins émetteurs est ressorti comme levier d'action notamment dans la stratégie française de lutte contre le changement climatique.

C'est dans ce cadre que la convention de mise en œuvre du Programme REMOVE « Report modal et verdissement des flottes de transport massifié » a été élaborée, en tant qu'opération certificat d'économie d'énergie (CEE).

Le Programme global REMOVE s'articule ainsi autour de deux composantes :

- Accélération du report modal des marchandises de la route vers un mode de transport massifié tel que le fleuve, le maritime (cabotage) et le fer, et mutation des chaînes logistiques routières vers des chaînes massifiées et/ou multimodales ;
- Accompagnement des acteurs vers une amélioration des performances énergétiques et environnementales de leurs flottes de transport massifié (fluviale, ferroviaire, cabotage maritime et pêche professionnelle) ainsi que des moyens de manutention associés.

Le Programme s'appuie sur deux dispositifs pour concrétiser ces objectifs :

- REMO en faveur du REport MODal du transport routier de marchandises vers les modes massifiés ;
- LOG-te, pour la Transition Énergétique des flottes de transport massifié et alternatives à la route et des moyens de manutention associés.

Présentation du dispositif LOG-te

Au sein du Programme REMOVE, le dispositif LOG-te s'attache donc à :

- Sensibiliser les opérateurs du transport fluvial, ferroviaire et maritime (cabotage et pêche professionnelle) à la transition énergétique et environnementale de leurs flottes et engins de manutention associés ;
- Accompagner techniquement ces opérateurs en vue de l'obtention de chartes d'engagements volontaires.

Cette charte, basée sur le volontariat, engage chaque opérateur signataire dans un plan d'actions personnalisé, en vue de diminuer sa consommation d'énergie, et par voie de conséquence ses émissions de GES.

Chaque opérateur décidant de signer la charte d'engagements volontaires doit au préalable avoir réalisé un reporting énergétique et établi un plan d'actions pluriannuel.

Objectifs des fiches actions

Outils d'aide à la décision, les fiches actions sont destinées à informer de manière objective et indépendante les opérateurs de transport massifié sur les solutions ayant un impact positif en termes d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de GES.

Le dispositif LOG-te les intègre dans la partie réservée à l'évaluation des gains potentiels d'énergie et d'émissions de GES, afin de permettre aux opérateurs de simuler et de définir un plan d'actions spécifique à leurs propres activités.

Organisation des fiches actions

Les fiches actions sont organisées autour de **4 axes** :

- Axe 1 : Optimisation des engins de manutention
- Axe 2 : Mode de propulsion des engins de manutention
- Axe 3 : Organisation des flux
- Axe 4 : Information / sensibilisation

Les axes 1, 2 et 3 concernent les engins de manutention alors que l'axe 4 regroupe des actions sur le comportement des conducteurs.

L'axe 1 « Optimisation des engins de manutention » regroupe les actions impactant directement les engins, en travaillant sur l'existant, sans changer leur énergie de propulsion.

L'axe 2 « Mode de propulsion des engins de manutention » traite des autres modes de propulsion que le Diesel ainsi que du suivi des consommations.

L'axe 3 « Organisation des flux » concerne des actions en lien avec l'optimisation des opérations et l'automatisation des engins.

L'axe 4 « Information / sensibilisation », se concentre sur le comportement de conduite des conducteurs.

Grille de lecture des fiches actions

Il s'agira pour chaque opérateur de faire une lecture des fiches actions qui soit adaptée à sa situation, en ayant bien pris soin de réaliser son reporting énergétique au préalable.

En effet, les actions et solutions proposées sont des recommandations, qui méritent de faire l'objet d'une analyse de leur pertinence face aux spécificités de l'activité exercée, aux moyens utilisés, aux besoins d'exploitation, au contexte réglementaire et au niveau de performance de l'opérateur.

C'est pourquoi, afin d'en faciliter la lecture, chaque fiche action est structurée autour :

- d'une fiche de synthèse ;
- d'un point sur le contexte et la réglementation ;
- de fiches détaillées par solution (en effet, une action peut se décliner en plusieurs solutions opérationnelles).

On retrouve systématiquement les mêmes rubriques dans chaque fiche.

La fiche de synthèse

L'objectif de la fiche de synthèse est de résumer en une page chaque action et ses solutions associées. Il s'agit de permettre à chaque opérateur d'identifier immédiatement si les solutions proposées sont pertinentes ou non au regard de sa propre situation. Chaque fiche de synthèse est organisée de la manière suivante :

- Une description succincte de l'action ;
- Son domaine de pertinence ;
- Les solutions associées à l'action, listant les différentes solutions (en général entre manutention horizontale et manutention verticale).
- Des informations sur le contexte et la réglementation.

Référence de la fiche action

Thème de la fiche action → A1 FA 1 : Renouveau et modernisation des engins de manutention

Description → 1. Description de l'action
Anticiper le renouvellement des engins pour éviter économiquement grâce à un gain énergétique lié aux nouvelles technologies. En effet, des engins de manutention plus récents sont souvent moins énergivores grâce à de nouvelles technologies et optimisations.

Domaine de pertinence → 2. Domaine de pertinence
Cette action s'adapte à tous les engins de manutention. La plupart des fiches d'actions de l'axe 2 « Changement de mode de propulsion » sont à étudier en cohérence avec cette action d'ajustement du parc.

Présentation des solutions → 3. Solutions associées
Cette solution est déclinée en deux fiches :
- Pour les engins de manutention horizontaux ;
- Pour les engins de manutention verticaux.

Contexte et réglementation → 4. Contexte et réglementation
Le règlement EMR8 sur les engins mobiles non routiers définit des limites d'émissions polluantes pour les moteurs d'engins. Un plan de renouvellement du parc (objet de la présente fiche) permettra d'anticiper la réponse aux contraintes réglementaires.

Présentation d'une fiche de synthèse résumant les solutions proposées.

Les fiches solutions

Les pages qui suivent sont organisées par solution :

Référence de la fiche action

Nom de la solution → Solution 1 : Automatisation et digitalisation des engins de manutention

Explication de la solution → 1. Principes
L'automatisation et la digitalisation des engins consistent à automatiser les opérations des engins de manutention et ainsi faire fonctionner l'engin sans conducteur. Les engins sont automatisés individuellement et selon des degrés d'automatisation différents. Pour se diriger vers cette automatisation des engins une automatisation par étape est possible.

Impact sur les améliorations énergétiques → 2. Impact sur les améliorations énergétiques
Les fournisseurs de Systèmes d'Automatisation et de digitalisation des engins de terminaux offrent les gains de productivité et d'augmentation des performances pour les terminaux mais ne chiffrer pas directement les gains énergétiques. En effet, ils dépendent de nombreux facteurs propres aux engins et au fonctionnement du terminal. Pour obtenir les gains énergétiques attendus avec cette solution il est recommandé de se rapprocher des fournisseurs qui pourront estimer un gain en fonction du terminal.

Domaine de pertinence → 3. Domaine de pertinence
Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontaux.

Mise en œuvre → 4. Mise en œuvre
L'automatisation des terminaux peut avoir lieu quel que soit l'état du parc : de 100 % manuelle, à un mix d'équipements automatisés et d'autres non. Il est possible d'automatiser n'importe quel engin déjà existant du parc, de n'importe quelle marque, sans nécessité d'attendre l'achat d'un engin neuf.

Suivi de la solution → 5. Suivi de la solution
Indicateur de suivi de la solution :
- Pourcentage d'engins automatisés dans le parc.

Présentation de chaque solution

Chaque solution, dont la fiche se veut autoportante, est analysée au moyen des rubriques suivantes :

- **Principes** : cette rubrique vise à décrire la solution de manière pédagogique ;
- **Impact sur les améliorations énergétiques** : les gains de consommation d'énergie et d'émission de GES doivent être considérés comme des ordres de grandeur indicatifs. Ils sont issus, soit d'évaluations menées par l'ADEME, soit de retours d'expérience de professionnels représentatifs, soit d'études plus théoriques. Les sources sont systématiquement explicitées. Les gains réels pourront être différents de ces estimations moyennes et dépendront notamment du type d'engin, de ses caractéristiques de l'opérateur, de ses activités, et plus généralement de sa situation initiale au moment de son adhésion au dispositif.

Lorsqu'une fourchette de gain est identifiée (car dépendant de situations opérationnelles contrastées), la valeur moyenne de cette estimation est retenue pour alimenter le gain par défaut de l'outil Excel de création du plan d'actions.

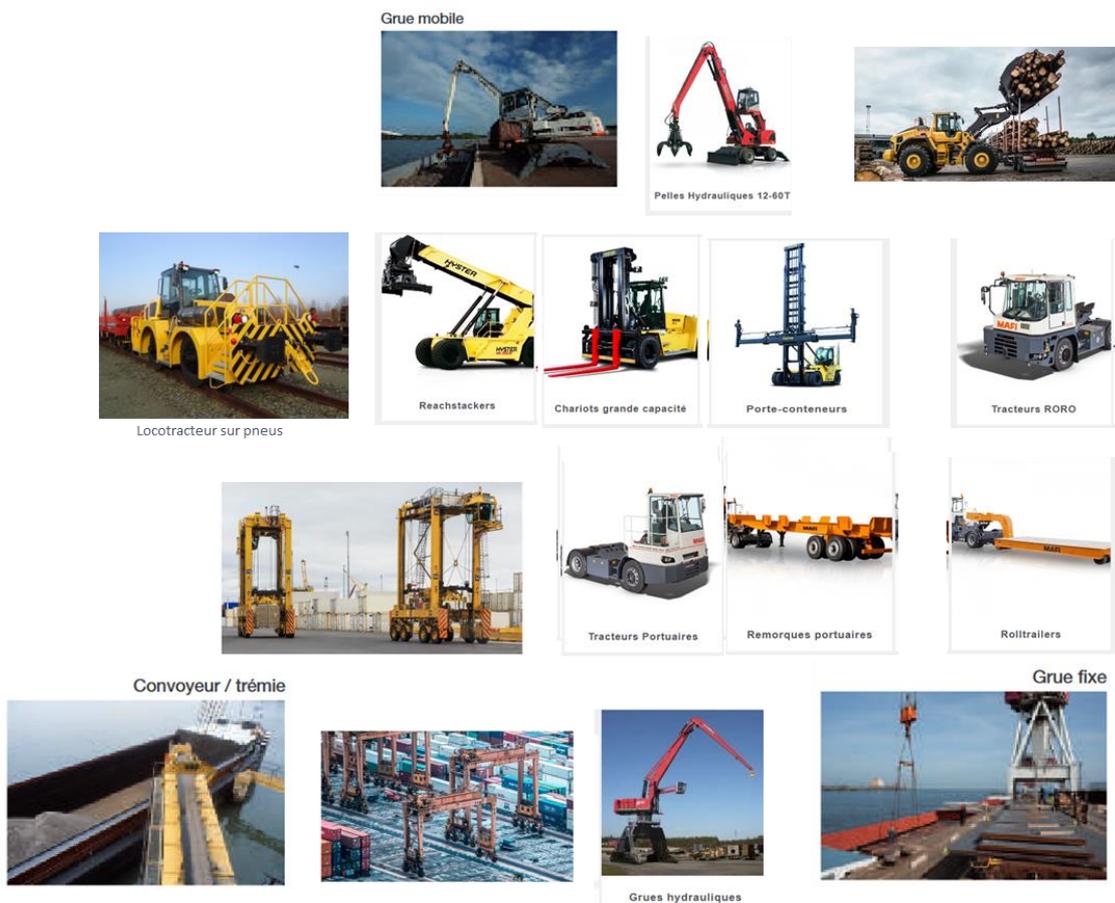
Les gains en termes de GES sont calculés du puits à la roue et non par une analyse en cycle de vie (ils n'intègrent donc pas les émissions liées à la fabrication des engins, dont les batteries). Les éventuelles mentions de réduction des émissions de polluants atmosphériques sont données à titre indicatif. Elles ne sont ni détaillées ni exhaustives, ce qui n'est pas l'objectif de ce guide et constituerait une étude en soi.

- **Domaine de pertinence** : il est spécifié dans quels cas (secteurs d'activités, catégories d'engins et d'usage...) il est pertinent de mettre en œuvre la solution considérée.
- **Mise en œuvre** : des conseils pratiques sont donnés sur la mise en œuvre de la solution. Lorsque l'information est accessible, une indication en termes de coûts ou surcoûts est fournie.
- **Suivi de la solution** : pour chaque solution, sont listés le ou les indicateurs de suivi qui doivent être utilisés, ainsi que les modalités pratiques de collecte des données nécessaires pour mettre en œuvre la solution de manière effective et assurer son suivi.

Les catégories d'engins

Les engins de manutention verticale et de manutention horizontale sont pris en compte.

Parmi chaque type de manutention, un détail systématique sur les grandes catégories que sont d'une part les portiques et les grues et d'autre part les reachstackers, les chariots élévateurs, les chariots cavaliers et les tracteurs de terminal, est apporté.



Exemple de la diversité des engins de manutention, verticale comme horizontale

A noter que les engins de manutention sont astreints par le code du travail à des vérifications périodiques sous la responsabilité de l'employeur.

Règles de cumul des gains

La plupart des solutions sont indépendantes les unes des autres, ce qui permet aux gains de se cumuler. En effet, l'objectif des actions du dispositif d'engagement est de minimiser les consommations énergétiques (et donc les quantités de GES émises) par tonne transportée.

Il est à noter que les gains relatifs à plusieurs solutions ne s'additionnent pas mais se multiplient.

Ex : 3 solutions cumulées permettant chacune d'améliorer de 10 % l'efficacité énergétique n'ont pas un gain cumulé de 30 % (10 % + 10 % + 10 %) mais de 27 % ($1 - (1-10\%) \times (1-10\%) \times (1-10\%)$).

Il faut néanmoins nuancer cette vision simplifiée : certaines solutions proposées ont le même objectif. Même si elles peuvent être choisies par l'opérateur comme complémentaires, cumuler les gains associés reviendrait à surévaluer les gains potentiels.

Au final, du fait que les valeurs de gains sont indicatives (reposant sur des valeurs moyennes) et que les périmètres de choix des actions sont parfois différents, il devient très compliqué de prévoir comment les actions interagissent entre elles a priori. Seule la réalité de la mise en œuvre des actions permettra d'identifier les gains globaux réels, mais la structure qui s'engage doit en amont se poser ces questions pour ajuster au mieux les gains proposés par défaut dans le plan d'actions qu'elle aura sélectionné.

Présentation synthétique des fiches actions

Les tableaux récapitulatifs ci-après présentent par axe l'ensemble des actions et solutions identifiées, en faisant un focus sur :

- Les **gains énergétiques** et les **gains en termes d'émissions de GES**,
- Le temps de **retour sur investissement** et le niveau de **faisabilité** de la solution considérée.

Les fourchettes de données correspondent aux dispersions observées entre les différents engins/activités.

Les gains sont exprimés en pourcentage de réduction, ainsi un gain positif correspond bien à une réduction des consommations énergétiques (ou des émissions de GES). Un gain négatif (surconsommation) est surligné en orange clair ().

L'échelle utilisée pour le temps de retour sur investissement est la suivante : court terme <1 an, moyen terme entre 1 et 3 ans, long terme > 3 ans.

L'échelle de faisabilité se lit comme suit : + = complexe, ++ = moyenne, +++ = facile.

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 1 - Optimisation des engins de manutention					
A1 FA 1 : Renouvellement des engins de manutention	Manutention horizontale	18-30%	18-30%	Long terme	+
	Manutention verticale	5-30%	5-30%	Long terme	+
A1 FA 2 : Stop and Start	Manutention horizontale	10%	10%	Court terme	+++
A1 FA 3 : Freinage régénératif	Manutention horizontale	20-40%	20-40%	Moyen terme	++
	Manutention verticale	15-40%	15-40%	Moyen terme	++
A1 FA 4 : Ajout de capteurs d'état des pneus	Manutention horizontale	10%	10%	Court terme	+++
	Manutention verticale	10%	10%	Court terme	+++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 2 - Mode de propulsion des engins de manutention					
A2 FA 1 : 100 % électrique	Manutention horizontale	68-73%	96-97%	Moyen terme	++
	Manutention verticale	86-88%	92-98%	Moyen terme	++
A2 FA 2 : Hybride diesel batterie	Manutention horizontale	15-70%	15-70%	-	++
	Manutention verticale	23-60%	23-60%	-	++
A2 FA 3 : GNV	Manutention horizontale	-11 à -21%	20% (GNV), 80% (bioGNV)	Long terme	+
	Manutention verticale	-22%	20% (GNV), 80% (bioGNV)	Long terme	+
A2 FA 4 : Dual-fuel GNV-diesel	Manutention horizontale	<-22%	<20-80%	-	++
A2 FA 5 : Hydrogène	Manutention horizontale			-	+
	Manutention verticale			-	+
A2 FA 6 : Autres modes de propulsion	Manutention horizontale	-5 à -10% (HVO), 0 à -5% - B100)	90% (HVO), 60% (B100)	-	+
	Manutention verticale	-5 à -10% (HVO), 0 à -5% - B100)	90% (HVO), 60% (B100)	-	+
A2 FA 7 : Collecte des consommations	Collecte des consommations	Indirect	Indirect	Court terme	+++
A2 FA 8 : Analyse des consommations	Analyse des consommations	Indirect	Indirect	Court terme	++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 3 - Organisation des flux					
A3 FA 1 : Optimisation des opérations	Planning manuel	Variable	Variable		++
	Terminal Operating System	Variable	Variable	Moyen terme	++
A3 FA 2 : Automatisation et digitalisation des engins	Automatisation et digitalisation des engins de manutention	Variable	Variable	Moyen terme	++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 4 - Information/sensibilisation					
A4 FA 1 : Formation éco-conduite	Manutention horizontale	5-25%	5-25%	Court terme	+++

Axe 1 : Optimisation des engins de manutention

A1 FA 1 : Renouvellement et modernisation des engins de manutention	14
Solution 1 : Manutention horizontale	15
Solution 2 : Manutention verticale	18
A1 FA 2 : Stop and start	20
Solution 1 : Manutention horizontale	21
A1 FA 3 : Freinage régénératif	23
Solution 1 : Manutention horizontale	24
Solution 2 : Manutention verticale	26
A1 FA 4 : Ajout de capteurs d'état des pneus	29
Solution 1 : Manutention horizontale	30
Solution 2 : Manutention verticale	32

A1 FA 1 : Renouvellement et modernisation des engins de manutention

Synthèse

1. Description de l'action

Anticiper le renouvellement des engins peut s'avérer économique grâce à un gain énergétique lié aux nouvelles technologies. En effet, des engins de manutention plus récents sont souvent moins énergivores grâce à de nouvelles technologies et optimisations.

En parallèle de ces adaptations spécifiques, une réflexion plus globale sur l'accélération du renouvellement de la flotte vers les dernières normes en vigueur peut être envisagée.

Cette action doit être mise en œuvre dès l'achat de l'engin, en forte interaction avec les constructeurs : elle est d'une importance capitale, car elle implique le parc de engins sur sa durée de vie. Dans certains cas, il est aussi possible de procéder à un retrofit ou à l'ajout de systèmes modernes permettant un gain de consommation énergétique.

Certains fournisseurs proposent de nouvelles gammes « Eco » permettant de réduire la consommation de carburant pour des performances similaires.

2. Domaine de pertinence

Cette action s'adapte à tous les engins de manutention. La plupart des fiches d'actions de l'axe 2 « Changement de mode de propulsion » sont à étudier en cohérence avec cette action d'ajustement du parc.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Le règlement EMNR sur les engins mobiles non routiers définit des limites d'émissions polluantes pour les moteurs d'engins.

Un plan de renouvellement du parc (objet de la présente fiche) permettra d'anticiper la réponse aux contraintes réglementaires.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

L'objectif de cette action est d'anticiper le renouvellement des engins. Les engins de manutention plus récents sont souvent moins énergivores grâce à de nouvelles technologies et optimisations.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Différents critères permettent d'obtenir des gains énergétiques : le poids de l'engin, l'optimisation des moteurs, un système de stockage permettant de réduire la puissance du moteur, différents systèmes réducteurs de consommations etc. Ces gains énergétiques dépendent des fabricants de matériel roulant et des types d'engins. Des machines de nouvelles générations permettent des économies de l'ordre de 25 à 30 % grâce un des systèmes hydrauliques désaccouplés de la motorisation principale¹.

- **Reachstackers**

Pour les reachstackers, à ce jour certains engins neufs consomment jusqu'à 29 %² moins de carburant qu'un engin âgé de 10 ans. Ce qui permet aussi de réduire de 29 % les émissions de GES.

Type de reachstacker	Litres de carburant (pour 2000 h d'opération par an)	Cout (€)	Emissions GES (tCO ₂ e)
Reachstackers neuf	33 270	41 587	89
Reachstacker 5 ans	41 068	52 334	110
Réduction reachstacker neuf par rapport à un âgé de 5 ans	19 %	21 %	19 %
Reachstacker 10 ans	47 145	58 932	126
Réduction reachstacker neuf par rapport à un âgé de 10 ans	29 %	30 %	29 %

En effet, des reachstackers actuels consomment entre 10 et 17 l/h face à des consommations de 14 à 24 l/h pour des reachstackers plus anciens. Les derniers modèles de certains fournisseurs annoncent une consommation de 11,6 l/h³. Un opérateur de terminal multimodal estime quant à lui des consommations de 11 l/h à 13 l/h pour des reachstackers nouvelle génération contre 16 l/h à 19 l/h pour des reachstackers ancienne génération.

D'autres options sont envisageables à l'achat et peuvent permettre de réduire la consommation de carburant : avec une nouvelle configuration de système hydraulique et une configuration de pompe, la transmission est optimisée et les économies de carburant atteignent 15 à 25 %⁴. Avec une transmission hydromécanique innovante, des gains de carburant de 25 % peuvent être atteints.⁵

- **Chariot élévateur**

¹ Entretien opérateur de terminal multimodal

² [216562_Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

³ [Liebherr fuel savings calculator - free online tool | Liebherr](#)

⁴ [Same performance, less fuel with Power Drive | Konecranes Lift trucks \(kclifttrucks.com\)](#)

⁵ [Improve your productivity with Flow Drive | Konecranes Lift trucks \(kclifttrucks.com\)](#)

La grande majorité des modèles ont différents modes de fonctionnement pour s'adapter aux besoins spécifiques d'un type de travail sur site ou encore d'un opérateur : mode haute performance et mode basse consommation énergétique avec des systèmes de coupure automatique du moteur partir d'une minute sans utilisation. Les moteurs dotés de turbocompresseurs de dernière génération permettent de diminuer la consommation de carburant de 18 % tout en conservant une puissance élevée du moteur.

D'autres options sont envisageables à l'achat et peuvent permettre de réduire la consommation de carburant : avec une nouvelle configuration de système hydraulique et une configuration de pompe, la transmission est optimisée et les économies de carburant atteignent 15 à 25 %⁶. Avec une transmission hydromécanique innovante, des gains de carburant de 25 % peuvent être atteint⁷.

Un rétrofit est aussi envisageable pour améliorer les performances et moderniser les équipements les plus anciens.

- **Chariot cavalier**

Peu d'informations sont disponibles pour les chariots cavaliers plus récents. Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs pour obtenir des données précises sur les gains envisageables. Un rétrofit est envisageable pour améliorer les performances et moderniser les équipements les plus anciens.

Les gains des autres engins de manutention horizontale variant de 18 % à 30 % on peut considérer que les gains attendus pour les chariots cavaliers seront similaires.

- **Tracteur de terminal**

En passant d'un engin de Stage IV à un engin de Stage V, la consommation de carburant est réduite de 5 % sur l'ensemble de la gamme⁸.

Certains engins, qui ont optimisé leur consommation de carburant, permettent des réductions de carburant de plus de 30 %, grâce à la combinaison d'un moteur Stage V et d'une transmission dotée d'un convertisseur de couple amélioré et de différents systèmes réducteurs de consommation. Ces engins ont des puissances de 168 kW et un couple de 1186 Nm.

Type d'engin de manutention horizontale	Consommation	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	10-16 l/h	29 %	29 %
Chariot élévateur	3-5 l/h ⁹	18-25 %	18-25 %
Chariot cavalier	13,5-31,9 l/h	18-30 %	18-30 %
Tracteur de terminal	-	30 %	30 %

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention, il est conseillé de se rapprocher d'eux pour obtenir des détails concernant la consommation de leurs engins et les performances associées. Ils seront aussi en mesure d'estimer les coûts et bénéfices de leurs engins,

⁶ [Same performance, less fuel with Power Drive | Konecranes Lift trucks \(kliftrucks.com\)](https://www.kliftrucks.com)

⁷ [Improve your productivity with Flow Drive | Konecranes Lift trucks \(kliftrucks.com\)](https://www.kliftrucks.com)

⁸ [Volvo Penta-powered electric terminal tractor at TOC Europe | Volvo Penta](https://www.volvoce.com)

⁹ [Des consommations trompeuses \(manutrucs.fr\)](https://www.manutrucs.fr)

ainsi que le retour sur investissement grâce à l'économie de carburant. Il est possible d'obtenir des gains énergétiques sur de nombreux de ces critères, les fournisseurs de matériels roulants pourront chiffrer le gain énergétique des différentes options.

Economiquement, un petit chariot cavalier coûte jusqu'à 280 000 €¹⁰.

Concernant les reachstackers, les coûts d'acquisition sont plus élevés pour un reachstacker électrique, allant presque du simple au double :

- Coût d'un reachstacker thermique = 650 k€;
- Coût d'un reachstacker électrique = 1,2 M€¹¹.

Pour les chariots élévateurs les prix varient entre 36 000 € et 100 000 € en fonction du mode de propulsion, des performances et des équipements¹².

De plus, les normes environnementales en vigueur doivent être prises en considération pour l'achat d'un nouvel engin.

Malgré un investissement plus élevé, cette solution peut apporter des gains économiques. En effet, la plupart des engins de manutention en service nécessitent une augmentation des dépenses d'entretien et de réparation par rapport aux modèles modernes. L'investissement dans un nouveau véhicule permet donc des réductions de coûts énergétiques et de coûts d'entretien durant toute la durée de vie des machines qui est d'environ 7 ans¹³.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre engins (en absolu et en relatif) renouvelés ou modernisés dans le parc ;
- Année d'acquisition de chaque engin.

¹⁰ [Straddle Carriers \[ULTIMATE GUIDE for 2023\] \(maritimemanual.com\), 300 000 USD](#)

¹¹ [Entretien opérateur de terminal multimodal](#)

¹² [Buy & Lease Forklifts | Jungheinrich Forklift Sales](#)

¹³ [Entretien opérateur de terminal multimodal](#)

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

L'objectif de cette action est d'anticiper le renouvellement des engins. Les engins de manutention plus récents, même pour un même type d'engins, sont souvent moins énergivores grâce à de nouvelles technologies et optimisations.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Différents critères permettent d'obtenir des gains énergétiques : le poids de l'engin, l'optimisation des moteurs, un système de stockage permettant de réduire la puissance du moteur, différents systèmes réducteurs de consommations etc. Ces gains énergétiques dépendent des fabricants de matériel et des types d'engins.

- **Portique sur pneus**

Un rétrofit est envisageable pour améliorer les performances et moderniser les équipements le plus anciens¹⁴. Certains fournisseurs proposent des rétrofits faisant gagner jusqu'à 30 % de consommation de carburant sans compromettre la performance ou le confort du conducteur¹⁵.

- **Portique sur rails**

Peu d'informations sont disponibles pour les portiques sur rails plus récents. Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs pour obtenir des données précises sur les gains envisageables. Un rétrofit est envisageable pour améliorer les performances et moderniser les équipements les plus anciens. Un retour d'expérience sur du rétrofit de portiques vieux de plusieurs dizaines d'années indique des gains énergétiques de quelques pourcents. En première approximation, un gain moyen de 5 % est retenu.

- **Grues mobiles portuaires**

Les derniers équipements de certains fournisseurs proposent des améliorations pouvant considérablement réduire la consommation énergétique : un fournisseur propose un « Green mode » qui permet de réduire de plus de 30 % la consommation de carburant et d'émissions de GES lorsque ce mode est activé. Le système est une technologie permettant au moteur diesel de tourner au ralenti si aucune condition d'opération n'a lieu ou si un temps prédéfini s'est écoulé sans que le moteur ne soit utilisé¹⁶.

- **Grues sur portiques et grues fixes**

Peu d'informations sont disponibles pour les grues sur portiques et fixes plus récentes. Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs pour obtenir des données précises sur les gains envisageables. Les gains des grues mobiles portuaires atteignant 30 % on peut considérer que les gains attendus pour les grues sur portiques et fixes seront similaires.

¹⁴ [Rubber-Tired Gantry Cranes | Konecranes USA](#)

¹⁵ [Fuel Saver 2020 1.pdf \(konecranes.com\)](#)

¹⁶ [Fuel Saver 2020 1.pdf \(konecranes.com\)](#)

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Portique de quais	30 %	30 %
Portique de stockage sur pneus	30 %	30 %
Portique de stockage sur rails	5 %	5 %
Grue mobile portuaire	30 %	30 %
Grue sur portique	30 %	30 %
Grue fixe	30 %	30 %

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention verticale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention, il est conseillé de se rapprocher d'eux pour obtenir de détails concernant la consommation de leurs engins et les performances associées. Ils seront aussi en mesure d'estimer les coûts et bénéfices de leurs engins, ainsi que le retour sur investissement grâce à l'économie de carburant. Il est possible d'obtenir des gains énergétiques sur de nombreux critères, les fournisseurs de matériels roulants pourront chiffrer le gain énergétique des différentes options.

De plus, les normes environnementales en vigueur doivent être prises en considération pour l'achat d'un nouveau véhicule.

Cette solution peut aussi apporter des gains économiques. En effet, la plupart des engins de manutention en service nécessitent une augmentation des dépenses d'entretien et de réparation par rapport aux modèles modernes. L'investissement dans un nouvel engin permet donc des réductions de coûts énergétiques et de coûts d'entretien.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre engins (en absolu et en relatif) renouvelés ou modernisés dans le parc ;
- Année d'acquisition de chaque engin.
-

A1 FA 2 : Stop and start

Synthèse

1. Description de l'action

Le système Stop and Start est un dispositif d'arrêt automatique du moteur : il coupe et redémarre automatiquement le moteur de l'engin dès lors qu'il fonctionne au ralenti ou qu'il se trouve à l'arrêt..

2. Domaine de pertinence

Cette action s'applique uniquement aux engins thermiques de manutention horizontale .

3. Solutions associées

Une seule solution associée : le stop and start pour les engins de manutention horizontale.

4. Contexte et réglementation

Aucune obligation réglementaire ne vient appuyer cette action mais elle contribue de façon « simple » à la réduction des consommations.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Les systèmes Stop and Start sont des systèmes d'arrêt automatique du moteur. Ils arrêtent les moteurs lorsque ceux-ci sont restés trop longtemps au ralenti ou si le moteur, la boîte de vitesse ou les freins ne fonctionnent pas de façon optimale. Cela permet de réduire le risque de pannes, les coûts de réparation et les coûts de carburant grâce à une économie énergétique. L'arrêt automatique peut être programmé à partir de temps différents en fonction des besoins. Cette solution permet de limiter la consommation de carburant et d'espacer les pas de maintenance.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Afin d'estimer l'impact de cette solution, il faut connaître le nombre d'heures annuelles pendant lequel l'engin est à l'arrêt au ralenti (via une estimation ou grâce à l'informatique embarquée). La consommation au ralenti aura aussi un impact sur le gain énergétique et GES. Les estimations sur les améliorations énergétiques dépendent aussi du système installé et de son fonctionnement.

L'ajout d'un système Stop and Start sur un reachstacker et sur un tracteur de terminal permet de réduire la consommation de carburant et des GES de 10 %¹⁷. Pour les chariots élévateurs, une étude montre aussi une réduction de 10 %¹⁸ de la consommation. Pour les chariots cavaliers la réduction de consommation est mise en avant par les fournisseurs mais non chiffrée, on peut faire l'hypothèse qu'elle sera équivalente à celle des autres engins de manutention horizontale.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	10 % ¹⁹	10 %
Chariot élévateur	10 %	10 %
Chariot cavalier	10 %	10 %
Tracteur de terminal	10 % ²⁰	10 %

Les systèmes Stop and Start permettent aussi une réduction des pollutions atmosphériques et des nuisances sonores.

Une réduction des coûts liés à la maintenance des moteurs et sur d'autres organes de la machines (transmission, boîtes, etc...) est également observée.

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins thermiques de manutention horizontale.

¹⁷ [216562 Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

¹⁸ [Development of World's First Engine/Battery Hybrid Forklift Truck, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.47 No.1\(2010\) \(mhi.co.jp\)](#)

¹⁹ [216562 Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

²⁰ [Automatic Engine Stop System | Kalmarglobal Automatic Engine Stop System | Kalmarglobal](#)

4. Mise en œuvre

La mise en place doit être réalisée par un professionnel (à mettre en lien avec les révisions périodiques obligatoires). Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs de système Stop and Start pour obtenir des données précises des gains énergétiques et économiques attendus.

De nombreux fabricants de matériels roulants proposent cette solution en option lors de l'achat. Il est aussi possible de l'installer sur du matériel déjà existant.

En effet, le système d'arrêt automatique des moteurs nécessite une mise à jour du logiciel de l'équipement. Cette mise à jour peut s'intégrer automatiquement au logiciel actuel et envoie une alerte sur l'écran de la cabine en cas de problème. L'intervalle de temps ralenti du moteur peut être réglé de 3 à 30 minutes selon les besoins²¹.

L'ajout d'un système Stop and Start permet aussi de prolonger la durée de vie des composants²².

Cette solution étant à un haut niveau de maturité de mise en œuvre et ayant un fort potentiel de reproductibilité, sa faisabilité est élevée.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) équipés de la technologie Stop & Start dans le parc.

²¹ Automatic Engine Stop System | Kalmarglobal

²² 216562_Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf (kalmarglobal.com)

A1 FA 3 : Freinage régénératif

Synthèse

1. Description de l'action

Le freinage régénératif est une technologie qui permet de récupérer et de réutiliser une partie de l'énergie cinétique d'un engin lors de différentes opérations (freinage de l'engin ou descente d'une charge pendant une opération).

2. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention possédant un système de traction électrique avec un moteur électrique.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Aucune obligation réglementaire ne vient appuyer cette action mais elle contribue à l'obtention de gains significatifs.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Le freinage régénératif est une technologie qui permet de récupérer et de réutiliser une partie de l'énergie cinétique lors du freinage d'un engin. Plutôt que de convertir toute l'énergie cinétique en chaleur dissipée par les freins, le freinage régénératif utilise les moteurs électriques des engins de manutention comme générateurs pour convertir l'énergie cinétique en énergie électrique, qui peut ensuite être stockée dans des batteries. De la même façon, ce système peut récupérer l'énergie de descente de charge.

L'énergie récupérée stockée dans des batteries est ensuite réinjectée pour la propulsion de l'engin. De plus, grâce à un système de stockage il est possible de sous-dimensionner la puissance du diesel.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les systèmes de freinage régénératif permettent d'économiser du carburant en récupérant de l'énergie de freinage et d'abaissement, en la stockant puis en la réutilisant lors d'opérations. L'impact sur les gains énergétiques dépend de plusieurs facteurs : la vitesse de l'engin, sa masse, le type d'opération, le profil de la voie et le niveau d'utilisation du freinage régénératif.

- **Reachstackers**

L'ajout d'un système de freinage régénératif sur les reachstackers, permettant de récupérer l'énergie de freinage et d'abaissement et de la stocker dans un supercondensateur, permet de réduire la consommation et les émissions jusqu'à 40 %²³.

- **Chariot élévateur**

Des études sur les chariots élévateurs ont montré que l'énergie potentiellement récupérable était de l'ordre de 32,2 %²⁴. Un fournisseur chiffre aussi ce pourcentage de récupération à 30 %.²⁵ En fonction de la performance du système de récupération cette énergie pourra plus ou moins être valorisée.

- **Chariot cavalier**

Pour un chariot cavalier, l'ajout d'un système de freinage régénératif permet d'économiser 20 % de consommation de carburant²⁶ et donc de réduire de 20 % les émissions GES.

- **Tracteur de terminal**

Une étude de conception de système hybride hydraulique avec freinage régénératif, équipé sur un tracteur de terminaux, a montré des économies de carburant de 38,1 à 61,6 % par rapport à un système conventionnel²⁷.

²³ [Focus on fuel - Cranes Today \(cranestodaymagazine.com\)](#)

²⁴ [Energy consumption of forklift versus standards, effects of their use and expectations - ScienceDirect](#)

²⁵ [Buy or lease electric forklift | Jungheinrich](#) [Buy or lease electric forklift | Jungheinrich](#)

²⁶ [kc-sc-en-01_0.pdf \(konecranes.com\)](#)

²⁷ [Experiment for a Parallel Hydraulic Hybrid Terminal Tractor \(researchgate.net\)](#)

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	40 %	40 %
Chariot élévateur	30-32 %	30-32 %
Chariot cavalier	20 %	20 %
Tracteur de terminal	38,1-61,6 %	38,1-61,6 %

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention horizontale possédant un système de traction électrique avec un moteur électrique et un système de stockage.

4. Mise en œuvre

La mise en place doit être réalisée par un installateur professionnel. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs pour obtenir des données précises d'installation, des gains énergétiques et économiques attendus. Dans la majorité des cas, le système de freinage régénératif est déjà inclus pour tout achat d'engin hybride ou électrique et rentre en considération pour les gains énergétiques attendus.

Le freinage régénératif permet un gain financier grâce à l'économie énergétique et la réduction des coûts d'entretien des freins mécaniques qui amène à réduire le temps d'immobilisation de l'engin. Cependant cela implique un investissement pour l'installation de système de stockage et une maintenance supplémentaire notamment pour les batteries.

Les coûts d'investissement sont assez élevés mais permettent, d'après les fournisseurs de reachstackers, un retour sur investissement au cours de la 3^{ème} année d'exploitation. Pour un cycle de 8 ans, l'engin permet ainsi d'obtenir des économies de 70 % par rapport aux engins conventionnels. Ces économies sont dues à la réduction de la consommation énergétique, des coûts d'entretien et de carburant²⁸.

Pour les chariots élévateurs, généralement cette solution fonctionne avec des supercondensateurs.

En plus d'obtenir des gains énergétiques, cette solution protège aussi les composants des pics de consommations, qui sont à présent assurés par les systèmes de stockage. Cette seconde source d'énergie demande peu de maintenance et possède un haut nombre de cycles.

Cette solution apporte d'autres avantages :

- Réduction des émissions sonores;
- Réduction des émissions de polluants atmosphériques.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) équipés de freinage régénératif dans le parc.

²⁸ Focus on fuel - Cranes Today (cranestodaymagazine.com)

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Le freinage régénératif est une technologie qui permet de récupérer et de réutiliser une partie de l'énergie cinétique lors du freinage ou de la descente de charge d'un engin. Plutôt que de convertir toute l'énergie cinétique en chaleur dissipée par les freins, le freinage régénératif utilise les moteurs électriques des engins de manutention comme générateurs pour convertir l'énergie cinétique en énergie électrique, qui peut ensuite être stockée dans des batteries.

L'énergie récupérée stockée dans des batteries est ensuite réinjectée pour la propulsion de l'engin. De plus, grâce à un système de stockage il est possible de sous-dimensionner la puissance du diesel.

Il permet une économie énergétique, d'émissions, de coûts de fonctionnement et de bruit. Grâce à ces économies, le retour sur investissement est de moins de 3 ans.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les systèmes de freinage régénératif permettent d'économiser du carburant en récupérant de l'énergie de freinage et d'abaissement, en la stockant puis en la réutilisant lors d'opérations. L'impact sur les gains énergétiques dépendent de plusieurs facteurs : la vitesse de l'engin, sa masse, le type d'opération et le niveau d'utilisation du freinage régénératif.

- **Portique sur pneus**

Une réduction 34,6 % du carburant pour un portique pneu de 345 kW est attendu en installant un système de stockage de 200 kW (permettant une réduction de 160 kW du générateur). Il y a aussi une réduction de 34,6 % des émissions GES. L'amortissement de l'investissement est atteint en 2,5 ans²⁹ pour une durée de vie de 10 ans environ.

D'autres recherches estiment les réductions de carburant de 8 à 15 % avec l'ajout d'un système de stockage de l'énergie³⁰ pour un portique de 410 kW. Si en plus de l'ajout de ce système, un nouveau moteur plus petit (322 kW ici) est mis en place, les gains montent entre 32 et 38 %.

- **Portique sur rails**

Peu d'informations sont disponibles pour les portiques de quais et sur rails utilisant un système de freinage régénératif. Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs pour obtenir des données précises sur les gains envisageables.

En première approximation, à typologie d'activité proche, on considère que les gains des portiques sur rails seront similaires aux gains des portiques sur pneus.

- **Grues mobiles portuaires**

Pour les grues mobiles portuaires, l'ajout d'un système de stockage permet d'atteindre jusqu'à 40 % de réduction de consommation de carburant. Les performances quant à elle sont mêmes améliorées puisqu'on constate une augmentation de 30 % de la vitesse. Un autre fournisseur chiffre à 15 % la réduction de carburant grâce à l'énergie de freinage récupérée. Cette réduction varie en fonction des conditions de fonctionnement et de la capacité de l'engin³¹.

²⁹ [Liduro Energy Storage | Liebherr](#)

³⁰ [Microsoft Word - REGEN White Paper 4 8 08.doc \(calnetix.com\)](#)

³¹ [kc-mhc-m7-en-01.pdf \(konecranes.com\)](#)

- **Grues sur portiques et grues fixes**

Peu d'informations sont disponibles pour les grues sur portiques et fixes utilisant un système de freinage régénératif. Il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs pour obtenir des données précises sur les gains envisageables.

En première approximation, à typologie d'activité proche, on considère que les gains des grues sur portiques et fixes seront similaires aux gains des grues mobiles.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Portique de quais	32-38 %	32-38 %
Portique de stockage sur pneus	32-38 %	32-38 %
Portique de stockage sur rails	32-38 %	32-38 %
Grue mobile portuaire	15-40 %	15 -40 %
Grue sur portique	15-40 %	15-40 %
Grue fixe	15-40 %	15-40 %

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour les engins de manutention verticale.

4. Mise en œuvre

La mise en place doit être réalisée par un installateur professionnel. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs pour obtenir des données précises d'installation, des gains énergétiques et économiques attendus. Dans la majorité des cas, le système de freinage régénératif est déjà inclus pour tout achat d'engin hybride ou électrique et rentre en considération pour les gains énergétiques attendus. Pour les engins déjà existants, il est possible d'ajouter ce système sur des engins actuels grâce à l'ajout d'un système modulaire. Un stockage grâce à des supercondensateurs ou des batteries lithium-ion est possible et dépendra des types d'engins³². Par exemple, pour les chariots élévateurs cette solution fonctionne généralement avec des supercondensateurs.

Le freinage régénératif permet un gain économique grâce à l'économie énergétique et la réduction des coûts d'entretien des freins mécaniques qui amène à réduire le temps d'immobilisation de l'engin³³. Grâce à ces systèmes, les coûts d'opérations sont réduits de 20 à 40 %³⁴.

Cependant cela implique un investissement pour l'installation de système de stockage et une maintenance supplémentaire notamment pour les batteries.

Les coûts d'investissement sont assez élevés mais permettent, d'après les fournisseurs de portiques sur pneus, un retour sur investissement après 2,5 ans³⁵, pour une durée de vie de 10 ans environ.

³² L'impact environnemental des batteries sera alors à prendre en compte.

³³ Focus on fuel - Cranes Today (cranestodaymagazine.com)

³⁴ Liduro Energy Storage | Liebherr

³⁵ Liduro Energy Storage | Liebherr

En plus d'obtenir des gains énergétiques, cette solution protège aussi les composants des pics de consommation, qui sont à présent assurés par les systèmes de stockage. Cette seconde source d'énergie demande peu de maintenance et possède un haut nombre de cycles.

Cette solution apporte d'autres avantages :

- Réduction des émissions sonores ;
- Réduction des émissions de polluants atmosphériques.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) équipés de ce système de stockage dans le parc.

A1 FA 4 : Ajout de capteurs d'état des pneus

Synthèse

1. Description de l'action

Les capteurs d'état des pneus permettent d'analyser en temps réel la pression et l'état des pneus. Ils contribuent à réduire leur usure en informant le conducteur de l'état des pneumatiques. Ce système d'optimisation permet ainsi une réduction de la consommation de carburant. Des systèmes de capteurs d'usure des pneus peuvent être intégrés sur un engin déjà existant du parc.

2. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention à pneus.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Aucune obligation réglementaire ne vient appuyer cette action mais elle contribue de façon « simple » à la réduction des consommations.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Lorsque la pression des pneus de l'équipement est maintenue à un niveau correct, la traînée est également réduite. En effet, une réduction de 10 % de la pression des pneus augmente de 1 % la consommation de carburant³⁶ et réduit la durée de vie des pneus de 11 %. Tandis qu'un sous-gonflage de 30 % entraîne une baisse de 40 % de la durée de vie des pneus. Ces capteurs contribuent à réduire l'usure des pneus en informant le conducteur de l'état des pneumatiques. Par conséquent, ce système d'optimisation permet une réduction de la consommation de carburant, et donc une réduction des émissions de GES. Ils permettent aussi d'augmenter la durée de vie de l'engin³⁷ tout en réduisant la maintenance. Ces systèmes de capteurs d'usure des pneus peuvent être intégrés sur un engin déjà existant du parc.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'ajout de capteurs d'usure des pneus (TPMS : tyre pressure monitor system) permet de réduire jusqu'à 10 % la consommation de carburant sur des reachstackers et des tracteurs de terminaux, et ainsi réduire de 10 % les émissions de GES de l'engin³⁸. Pour les chariots élévateurs et cavaliers, les fournisseurs ne chiffrent pas ce gain mais on peut poser l'hypothèse, en première approximation, qu'ils seront similaires à ceux des autres engins, de par leur typologie d'usage proche.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	10 %	10 %
Chariot élévateur	10 %	10 %
Chariot cavalier	10 %	10 %
Tracteur de terminal	10 %	10 %

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins de manutention horizontale à pneus.

4. Mise en œuvre

L'ajout de ce système sur un engin déjà roulant est envisageable. Il est possible d'ajouter ces systèmes sans avoir besoin de retirer le pneu et de mettre la machine hors service pendant des heures. Moins d'une heure est nécessaire pour l'ajout de ce système. Il faut contacter le fournisseur pour vérifier de la compatibilité avec l'engin.

Pour le fonctionnement du système, les conducteurs reçoivent des alertes sur l'écran lorsque la pression des pneus est inférieure aux seuils de 12,5 % ou de 25 % du niveau recommandé. Ils sont

³⁶ Quels sont les avantages du TPMS ? - ATLAS - Télématique TPMS (atlas-tpms.com)

³⁷ [Port of Lyttelton Automates Straddle Carrier Tyre Monitoring With IDENTEC SOLUTIONS \(maritime-executive.com\)](http://Port.of.Lyttelton.Automates.Straddle.Carrier.Tyre.Monitoring.With.IDENTEC.SOLUTIONS.(maritime-executive.com))

³⁸ 216562_Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf (kalmarglobal.com)

également alertés si les pneus sont surgonflés ou s'ils deviennent trop chauds. Tous les relevés de pression peuvent être affichés en psi, kPa ou bar.

Financièrement, sur des véhicules routiers type voitures, il faut compter entre 75 € et 150 € pour un kit complet ainsi que la main d'œuvre pour l'installation³⁹.

Cette solution permet aussi un entretien actif des pneus ce qui permet d'augmenter la durée de vie des pneus de 10 à 40 %.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) équipés de ces capteurs dans le parc.

³⁹ TPMS (Tyre Pressure Monitoring System) : rôle, programmation, prix, Changement-amortisseur.fr

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Lorsque la pression des pneus de l'équipement est maintenue à un niveau correct, la traînée est également réduite. En effet, une réduction de 10 % de la pression des pneus augmente de 1 % la consommation de carburant⁴⁰ et réduit la durée de vie des pneus de 11 %. Tandis qu'un sous-gonflage de 30 % entraîne une baisse de 40 % de la durée de vie des pneus. Ces capteurs contribuent à réduire l'usure des pneus en informant le conducteur de l'état des pneumatiques. Par conséquent, ce système d'optimisation permet une réduction de la consommation de carburant, et donc une réduction des émissions de GES. Ils permettent aussi d'augmenter la durée de vie de l'engin⁴¹ tout en réduisant la maintenance. Ces systèmes de capteurs d'usure des pneus peuvent être intégrés sur un engin déjà existant du parc.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'ajout de capteurs d'usure des pneus (TPMS : tyre pressure monitor system) est particulièrement pertinent pour la manutention horizontale mais peut s'avérer possible pour certains engins de manutention verticale sur pneus tels que les portiques sur pneus⁴².

Pour des engins de manutention horizontale (reachstackers et tracteur de terminal) l'ajout de capteurs d'usure des pneus (TPMS : tyre pressure monitor system) permet de réduire jusqu'à 10 % la consommation de carburant et ainsi réduire de 10 % les émissions de GES de l'engin⁴³. Pour combler le manque de données d'impact pour la manutention verticale, en première approximation, l'hypothèse que les gains attendus seront du même ordre de grandeur que ceux de la manutention horizontale est posée.

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour les engins de manutention verticale sur pneus.

4. Mise en œuvre

L'ajout de ce système sur un engin déjà roulant est envisageable. Il est possible d'ajouter ces systèmes sans avoir besoin de retirer le pneu et de mettre la machine hors service pendant des heures. Moins d'une heure est nécessaire pour l'ajout de ce système. Il faut contacter le fournisseur pour vérifier la compatibilité avec l'engin. Il existe différentes options, allant d'une installation autonome avec un écran dans la cabine pour le conducteur ou l'opérateur à une solution connectée qui donne au gestionnaire de la flotte (ou du site) une vue sur les performances et sécurité des pneus de l'ensemble des engins.

Les conducteurs reçoivent des alertes sur l'écran lorsque la pression des pneus est inférieure aux seuils de 12,5 % ou de 25 % du niveau recommandé. Ils sont également alertés si les pneus sont surgonflés ou s'ils deviennent trop chauds. Tous les relevés de pression peuvent être affichés en psi, kPa ou bar.

⁴⁰ [Quels sont les avantages du TPMS ? - ATLAS - Télématique TPMS \(atlas-tpms.com\)](#)

⁴¹ [Port of Lyttelton Automates Straddle Carrier Tyre Monitoring With IDENTEC SOLUTIONS \(maritime-executive.com\)](#)

⁴² [TPMS sur une grue à portique sur pneus \(RTG\) \(atlas-tpms.com\)](#)

⁴³ [216562_Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

Financièrement, sur des véhicules routiers type voitures, il faut compter entre 75 € et 150 € pour un kit complet ainsi que la main d'œuvre pour l'installation⁴⁴. Pour connaître les tarifs sur les engins de manutention de sa flotte il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs.

Cette solution permet aussi un entretien actif des pneus ce qui permet d'augmenter la durée de vie des pneus de 10 à 40 %.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) équipés de ces capteurs dans le parc.

⁴⁴ TPMS (Tyre Pressure Monitoring System) : rôle, programmation, prix, Changement-amortisseur.fr

Axe 2 : Mode de propulsion des engins de manutention

A2 FA 1 : 100 % électrique.....	35
Solution 1 : Manutention horizontale	36
Solution 2 : Manutention verticale	41
A2 FA 2 : Hybride diesel-batterie	46
Solution 1 : Manutention horizontale	47
Solution 2 : Manutention verticale	51
A2 FA 3 : GNV	54
Solution 1 : Manutention horizontale	56
Solution 2 : Manutention verticale	59
A2 FA 4 : Dual-fuel GNV-diesel	60
Solution 1 : Manutention horizontale	61
A2 FA 5 : Hydrogène	63
Solution 1 : Manutention horizontale	65
Solution 2 : Manutention verticale	69
A2 FA 6 : Autres modes de propulsion	71
Solution 1 : Manutention horizontale	72
Solution 2 : Manutention verticale	74
A2 FA 7 : Collecte des consommations	76
Solution 1 : Collecte des consommations	77
A2 FA 8 : Analyse des consommations.....	80
Solution 1 : Analyse des consommations.....	81

A2 FA 1 : 100 % électrique

Synthèse

1. Description de l'action

Le mode de propulsion électrique permet un fonctionnement des engins de manutention moins consommateur et moins carboné⁴⁵ que le diesel. Le choix du mode de propulsion s'effectue au moment de l'achat du véhicule. Un rétrofit peut aussi être envisagé.

L'utilisation de l'engin représente la majeure partie de l'empreinte carbone du cycle de vie, environ 90 %. Opter pour un mode de propulsion moins émetteur permet donc une grande réduction des émissions du cycle de vie de l'engin.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des engins de manutention.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Plusieurs solutions alternatives aux moteurs diesel existent. Elles sont toutes basées sur la substitution de tout ou partie de la consommation de carburants fossiles par l'utilisation de l'électricité : motorisation bi-mode ou motorisation électrique (objet de la présente fiche).

Ces technologies présentent plusieurs points forts d'un point de vue environnemental, notamment par rapport aux émissions de GES et de polluants, mais aussi en termes de bruit. Le recours à des technologies basées sur l'utilisation de l'électricité en remplacement de carburants fossiles permet d'éliminer les émissions directes de polluants (pour la partie basée sur l'utilisation de l'électricité) et de GES.

⁴⁵ Zéro émission à l'échappement.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Un engin de manutention électrique est un engin mu par des moteurs électriques. Ses moteurs sont alimentés par des batteries qui sont rechargées au préalable ou qui se rechargent lors des phases de freinage ou d'abaissement. Il existe plusieurs types de batteries : batterie au plomb ou au lithium-ion.

Le choix du mode de propulsion s'effectue au moment de l'achat de l'engin de manutention ou dans le cas d'un retrofit d'un engin déjà existant. Deux alternatives aux moteurs diesel classiques sont actuellement disponibles : la motorisation hybride et la motorisation électrique.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Bien qu'elle n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation d'un véhicule électrique nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, compte tenu du « mix énergétique » de la production française d'électricité, ce mode de propulsion permet une réduction importante des émissions de GES. En effet, 1 kWh d'électricité du mix français émet 0,0386 kgCO₂e⁴⁶ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kgCO₂e, c'est-à-dire 0,316 kgCO₂e/kWh, soit 8 fois plus que le mix électrique français pour 1 kWh. Avec un gain énergétique supplémentaire, le gain GES total augmente encore.

- **Reachstackers**

La consommation énergétique est de 40 à 68 kWh en fonction des types de reachstackers électriques. Tandis que les reachstackers diesel actuels consomment entre 14 à 20 l/h. Soit l'équivalent de 140 à 200 kWh⁴⁷. En prenant les moyennes de consommations, on constate donc une réduction énergétique de l'ordre de 68 %.

A l'aide de la base Empreinte de l'ADEME, on obtient qu'1 kWh d'électricité du mix français (d'énergie finale) émet 0,0386 kgCO₂e⁴⁸ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kgCO₂e/litre, c'est-à-dire 0,316 kgCO₂/kWh. Les gains GES sont donc estimés à 96 % pour les reachstackers.

- **Chariot élévateur**

Les consommations de différents modèles de chariots élévateurs électriques sont les suivantes⁴⁹ :

Model	Battery Type	Voltage/Capacity (V/Ah)	Power Consumption (kWh/h)
J1.8UT	Lithium-Ion	48/420	5.0
J2.5UT	Lithium-Ion	48/600	6.2
J3.5UT	Lithium-Ion	80/500	8.0
J1.6UTT	Lead Acid	48/460	5.19
J1.8UTT	Lead Acid	48/460	5.3
J2.0UTT	Lead Acid	48/600	5.7

Pour exemple, le J1.8UT est un modèle possédant une force de traction maxi en charge de 10 800 N et consomme 5 kWh par heure en moyenne.

⁴⁶ Base Empreinte, ADEME. Données : 2018, usage : Transports/consommation.

⁴⁷ En considérant que 1L de diesel correspond à 10kWh

⁴⁸ Base Empreinte, ADEME

⁴⁹ How Much Electricity does a Forklift Use per Hour? (adaptalift.com.au)

Finalement, un chariot électrique en opération consomme en moyenne 5,9 kWh. On observe une différence de consommation entre les batteries lithium-ion et plomb avec une consommation légèrement plus faible pour les batteries au plomb. Cependant, certains fournisseurs présentent une réduction de 21 %⁵⁰ des émissions de GES avec les batteries lithium-ion. Il est donc pertinent de demander à son fournisseur la consommation moyenne mais aussi les émissions de GES moyennes. Quant à un chariot diesel, il consomme autour de 2,6 litres de diesel par heure⁵¹. Ce qui correspond à 26 kWh. La réduction énergétique avec un engin électrique est de l'ordre de 73 %. Les gains GES sont estimés à 97 % pour les chariots élévateurs (cf. méthode de calcul utilisées pour les reachstackers).

A titre de comparaison, un fournisseur estime à 70 % la réduction de la consommation énergétique en passant à un chariot élévateur électrique avec une batterie lithium-ion par rapport à un diesel.⁵² Cet engin est équipé d'un système de récupération de l'énergie de freinage. Pour le recharger complètement, il ne faut que 45 min et l'engin dure au moins 3000 cycles de charge complète.

- **Chariot cavalier**

Les gains énergétiques peuvent être obtenus auprès des fournisseurs en fonction des caractéristiques de l'engin. Il faudra choisir entre plusieurs types de batteries, détaillées dans la mise en œuvre de cette solution. Pour les chariots cavaliers on peut faire l'hypothèse que les gains seront similaires aux chariots élévateurs.

- **Tracteur de terminal**

Les gains énergétiques peuvent être obtenus auprès des fournisseurs en fonction des caractéristiques de l'engin. Il faudra choisir entre plusieurs types d'engins, détaillées dans la mise en œuvre de cette solution. Les gains énergétiques des autres engins de manutention horizontale variant de 68 à 73 %, on peut considérer qu'ils seront similaires pour un tracteur de terminal. De même pour les gains des émissions de GES, variant de 96 à 97 %.

Type d'engin de manutention horizontale	Consommation (kWh)	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	40-68	68 %	96 %
Chariot élévateur	5-8	70-73 %	97 %
Chariot cavalier	-	70-73 %	97 %
Tracteur de terminal	-	68-73 %	96-97 %

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention électriques. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se multiplier. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs matériels. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette

⁵⁰ [Lithium-ion technology from Jungheinrich](#)

⁵¹ [How Much Diesel Does A Forklift Use Per Hour? - UtilitySmarts](#)

⁵² [Konecranes, Konecranes forklifts go electric | Trade press releases | Konecranes](#)

solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins. Plusieurs puissances différentes existent, l'étude permettra de déterminer le type de batterie et la puissance de la batterie et du générateur les plus adaptés à l'utilisation du véhicule.

Si la filière du retrofit pour les engins routiers se structure, elle est encore peu développée pour les engins de manutention. Certains fournisseurs peuvent tout de même le réaliser, il est conseillé de se rapprocher d'eux pour des informations concernant la faisabilité.

A noter qu'il existe différents types de batteries^{53 54} :

- Les batteries au plomb, qui sont moins onéreuses puisque leur prix d'achat est d'environ 150 euros par kilowattheure. Cependant, plusieurs batteries peuvent être nécessaires pour une utilisation intensive ce qui augmente finalement les coûts d'achat. Pour les coûts d'exploitation, il y a des coûts de service pour l'entretien. Il est nécessaire de les réviser régulièrement pour optimiser la durée de vie, ce qui implique des temps d'immobilisation de l'engin lors des révisions ou du remplacement des batteries. En effet, les batteries plomb ne peuvent pas être chargées de façon intermédiaire, cela réduirait considérablement leur durée de vie. Une batterie de rechange permet à l'engin de rester opérationnel. Cependant, il faut compter jusqu'à 15 minutes pour changer la batterie (avec un transpalette manuel, électrique ou un palan). Il faut prévoir d'équiper son infrastructure de stations de charge dans des salles exclusivement réservées à cet effet.

Pour un chariot élévateur, environ 8 à 10 heures de charge permettent 6 h d'exploitation.

Leur utilisation est adaptée à quelques heures de travail seulement, à une petite flotte ou à une volonté d'investissement faible.

- Les batteries Lithium-ion sont nettement plus chères (environ deux à trois fois plus élevé que les batteries au plomb) mais disposent d'un nombre de cycles plus importants et qui ont donc, à capacité égale, une durée de vie deux fois plus longue. De plus, les prix évoluent et la tendance est à la baisse. Dans certains cas, leur prix se rapproche de celles au plomb. Les coûts d'exploitation sont quant à eux plus faible puisqu'aucun entretien n'est nécessaire et qu'il n'y a pas de coûts de maintenance. Elles sont aussi plus efficaces : les batteries Lithium-ion sont capables de réduire la consommation d'énergie de chariots jusqu'à 30 % par rapport aux batteries plomb. Le prix d'achat se retrouve donc compensé par la réduction des coûts d'exploitation.

L'engin peut se recharger durant chacune des pauses. 1h de charge permettant jusqu'à 3 h d'utilisation. Il faudra prévoir l'installation de chargeurs mais si la puissance courant continu ne dépasse pas 600 kW il n'y aura pas besoin de salle de charge.

Leur utilisation est adaptée dans le cas d'une utilisation intensive sans nécessité de changer de batterie.

- **Reachstacker**

Pour les reachstackers, c'est une solution avec des batteries lithium-ion qui est privilégiée (même si pour l'instant il existe encore très peu de modèles de reachstackers 100 % électrique en Europe).

Les engins disponibles sur le marché ont des capacités de levage de plus de 45 tonnes avec différentes options de batteries : de 245 kWh à 587 kWh⁵⁵. Les autonomies dépendent du choix de batterie, le temps opérationnel allant de 3 à 4 h pour une batterie de 245 kWh et de 7,5 à 10 h pour une batterie de 587 kWh⁵⁶. Les batteries sont régulièrement garanties, environ 5 ans, et ont une espérance de vie de 10 à 12 ans. Les reachstackers sont aujourd'hui équipés d'un système de gestion thermique

⁵³ [Vers quelle énergie se tourner pour ses chariots élévateurs ? | Blog de la manutention \(blog-manutention.fr\)](#)

⁵⁴ [L'impact environnemental des batteries sera alors à prendre en compte.](#)

⁵⁵ [Kalmar Electric Reach Stacker | Kalmarglobal](#)

⁵⁶ [268853 Electric-Reachstacker-Brochure_EN2-Ir-web.pdf.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

permettant à l'engin de fonctionner de façon optimale même lors de températures extrêmes. La batterie est maintenue à une température entre 25 et 30°C pour des performances idéales mêmes lorsque les températures descendent à -30°C ou atteignent 40°C.

Financièrement, les coûts d'acquisition sont plus élevés pour un reachstacker électrique, allant presque du simple au double : le coût d'un reachstacker thermique étant proche de 650 k€ alors que pour un reachstacker électrique le prix est d'environ 1,2 M€⁵⁷.

- **Chariot élévateur**

Pour les chariots élévateurs les solutions 100 % électriques sont basées majoritairement sur des batteries lithium-ion et le rétrofit est encore en cours de développement. Cependant, il est aussi possible de trouver des chariots élévateurs avec des batteries au plomb.

Différentes solutions de charges sont disponibles allant de 175 à 350 kW. Après une utilisation de 3 heures, la batterie passe de 100 % à 40 % de capacité⁵⁸. Une charge de 15 minutes permet alors d'augmenter la capacité de la batterie de 40 % à 80 %. Avec une charge de 30 minutes, elle passe de 40 % à 100 %.

- **Chariot cavalier**

Pour les chariots cavaliers, une solution 100 % électrique est basée majoritairement sur des batteries lithium-ion et le rétrofit est encore en cours de développement.

Sur le marché, des engins de capacité de levage de 40 à 60 tonnes avec des batteries lithium-ion existent. Ils peuvent se recharger en 45 min avec des batteries à haute énergie pour une utilisation de 240 minutes ensuite ou via des charges de 5-6 minutes avec des batteries de haute puissance pour une utilisation de 45-50 minutes.

Le choix entre ces deux batteries dépend de différents facteurs :

- Batterie à haute énergie : Une solution de batterie à haute capacité énergétique qui peut fournir une autonomie d'un demi-poste entre les charges. Avec une batterie à haute énergie, vous pouvez programmer la charge de votre batterie pour l'aligner sur les pauses de l'opérateur par le biais d'un point de charge CCS standard, ce qui permet à votre équipement de continuer à fonctionner sans avoir besoin d'être rechargé entre les pauses programmées.
- Batterie haute puissance : Une solution de batterie optimisée pour la charge à haute puissance qui peut être chargée en quelques minutes avec une station de charge FastCharge, sans que l'opérateur ne quitte la cabine. Avec une batterie haute puissance, vous pouvez faire fonctionner votre équipement 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 en utilisant les temps d'attente opérationnels pour recharger votre batterie.

- **Tracteur de terminal**

Des tracteurs électriques se développent tout en conservant des performances similaires, mais avec un moteur électrique et accompagné de batteries d'environ 150 à 350 kWh. Les batteries de 222 kWh permettent par exemple d'opérer pendant plus de 10 heures et peuvent être rechargées complètement en 1 heure. Les batteries peuvent être utilisées à des températures allant de -30°C à +50°C. Les gains énergétiques de ces engins sont obtenables auprès des fournisseurs en fonction des caractéristiques de l'engin.

D'autres fournisseurs proposent différentes gammes, allant de gamme capable d'opérer 12 heures en continu jusqu'à des gammes capables d'opérer jusqu'à 22 heures en continu. Pour les solutions de charge, des capacités de charge de 24 à 180 kW sont disponibles

Un fournisseur annonce un rendement supérieur à 90 %. Du point de vue économique, il annonce 90 % d'économies de carburant, 100 % d'économie sur le moteur (pas de réparation ni de remplacement), 95 % d'économie sur l'entretien des freins (le freinage régénératif recharge la batterie et évite l'usure

⁵⁷ Entretien opérateur de terminal multimodal

⁵⁸ Sources constructeurs

des freins traditionnels), 100 % d'économies sur les contrôles d'émissions (pas de besoins d'équipement de contrôle des émissions). Pour une utilisation modérée, il est possible d'économiser entre 20 000 et 40 000 € par tracteur par an. Pour une utilisation plus intensive, les économies peuvent croître entre 40 000 et 90 000 € par tracteur par an.

Finalement, ils permettent de réduire de plus de 90 % les OPEX en réduisant les coûts de carburant pour alimenter l'engin en électricité et la maintenance. Le retour sur investissement moyen est de 2 ans.

De plus, certains fournisseurs proposent des garanties (en années ou en heures de fonctionnement). L'engin peut avoir une garantie d'environ 2 ans avec 6000 heures de fonctionnement, et 7 ans (1000 heures) pour le châssis. Les solutions de recharge sont aussi garanties, environ pendant 2 ans et les batteries pendant 5 ans⁵⁹. Ces garanties sont propres aux fournisseurs et peuvent être plus ou moins élevées.

Finalement, pour l'acquisition d'un engin électrique les coûts de l'ensemble du cycle de vie sont dominés par le coût initial des batteries. L'investissement initial est plus important que pour un engin diesel. Quant aux coûts d'exploitation des engins de manutention à batterie, ils sont très faibles et nécessitent peu d'entretien. De plus, il sera nécessaire d'implanter des bornes de recharges électriques (ou des batteries de rechange), ce qui représente un investissement supplémentaire.

Pour chaque engin, des garanties existent lors de l'achat, il faut vérifier ces garanties auprès des différents fournisseurs.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme moyenne du fait du manque de maturité de la solution, de la faible disponibilité de ces engins et de l'investissement.

Cette solution aura d'autres impacts positifs :

- Limitation des nuisances sonores liées au moteur de l'engin ;
- Réduction des émissions de polluants atmosphériques.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) fonctionnant grâce à l'électricité ;
- Kilomètres/heures (en absolu et en relatif) effectués par des engins électriques ;
- Nombre de kWh consommés ;
- Nombre de TEU transportés grâce à des engins électriques.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins électriques ;
- Suivi de la consommation en kWh.

⁵⁹ Kalmar Ottawa T2E Electric Terminal Tractor | Cal-Lift Inc. (callift.blog)

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Un engin de manutention électrique est un engin mu par des moteurs électriques. Ses moteurs sont alimentés par des batteries qui sont rechargées au préalable ou qui se rechargent lors des phases de freinage. Il existe plusieurs types de batteries : batterie au plomb ou au lithium-ion. Ses moteurs peuvent aussi être alimentés par une électrification des infrastructures.

Le choix du mode de propulsion s'effectue au moment de l'achat de l'engin de manutention ou dans le cas d'un retrofit d'un engin déjà existant. Deux alternatives aux moteurs diesel classiques sont actuellement disponibles : la motorisation hybride et la motorisation électrique.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Bien qu'elle n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation d'un véhicule électrique nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, compte tenu du « mix énergétique » de la production française d'électricité, la réduction des émissions de GES en France métropolitaine est importante avec ce mode de propulsion. En effet, 1 kWh d'électricité du mix français (d'énergie finale) émet 0,0386 kgCO_{2e}⁶⁰ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kgCO_{2e}, c'est-à-dire 0,316 kgCO_{2e}/kWh, soit 8 fois plus que le mix électrique français pour 1 kWh. Avec un gain énergétique supplémentaire, le gain GES augmente encore.

- **Portique sur pneus**

Dans les ports, environ 20 % des émissions de carburant diesel des équipements de manutention de marchandises est dû aux portiques sur pneus. En effet, un portique sur pneus diesel consomme environ 13⁶¹ à 14 l/h⁶², pour une puissance nominale de 410 kW. Ils consomment de 2 à 2,5 litres de diesel par conteneur déplacé, ce qui correspond à 20 à 25 kWh par conteneur déplacé. Les portiques électriques consomment entre 2,5 et 3,5 kWh⁶³. Par conteneur déplacé, le gain énergétique est de 86 à 88 % en passant du diesel à l'électrique. En effet, les portiques électriques peuvent récupérer l'énergie de descente, la stocker et la réutiliser ensuite, ce qui augmente les gains énergétiques pour cette solution.

Concernant les gains GES, pour un conteneur maritime de 20 pieds (TEU), un portique sur pneus demande 2 à 2,5 litres, soit en moyenne 7,11 kgCO_{2e}/TEU. Pour un portique électrique, pour une TEU, la consommation est de 2,5 à 3,5 kWh soit une émission de 115,8 gCO_{2e}/TEU. On constate donc une réduction de 98 % des émissions de GES avec un portique sur pneus électrique.

Une autre étude affirme que pour un engin au moteur diesel consommant 13 litres par heure avec 12 h de fonctionnement par jour, les émissions de GES atteignent presque 400 tCO_{2e}. Or, le même engin électrique n'émet que 250 tCO_{2e}, et si le mix énergétique est fait à partir d'énergies renouvelables éoliennes les émissions chutent à 50 tCO_{2e}⁶⁴. En utilisant le mix énergétique français,

⁶⁰ Base Empreinte, ADEME. Données : 2018, usage : Transports/consommation.

⁶¹ [electrification-RTG-en-2018.indd .pdf \(porttechnology.org\)](#)

⁶² (PDF) [A Review of Rubber Tyred Gantry Cranes Energy Efficiency Improvements Based on Energy Monitoring, Energy Storage Systems and Optimal Operation Control Strategies \(researchgate.net\)](#)

⁶³ [How to Reduce Opex Costs for RTG Terminals \(porttechnology.org\)](#)

⁶⁴ [electrification-RTG-en-2018.indd .pdf \(porttechnology.org\)](#)

qui est 88 % moins émetteur que le mix allemand⁶⁵, le gain, en passant d'un engin diesel émettant 400 tCO₂e à un engin électrique avec le mix français émettant 30 tCO₂e, est de 92 %.

La réduction des émissions de GES sera donc très importante, comprise entre 92 et 98 %.

- **Portique sur rails**

Les portiques de quais et sur rails sont tous électriques en France⁶⁶, grâce à un enrouleur à câble d'alimentation haute tension. Il n'y a donc pas de gain énergétique possible. Cependant, on peut estimer que continuer d'opter pour des portiques de quais et sur rails électriques représentent les mêmes gains qu'opter pour un portique sur pneus électriques.

- **Grues mobiles portuaires, sur portiques et fixes**

Les grues électriques se développent mais sont encore peu disponibles sur le marché. Pour obtenir les gains énergétiques et les émissions de GES liés à cette solution il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs proposant des solutions électriques.

Type d'engin de manutention horizontale	Consommation		Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
	Diesel	Electrique kWh		
Portique de quai	-	6 kWh/TEU ⁶⁷	86-88 %	92-98 %
Portique de stockage sur pneus	2-2,5 l/TEU, 13-14 l/h	2,5-3,5 kWh/TEU	86-88 %	92-98 %
Portique de stockage sur rails	-	-	86-88 %	92-98 %
Grue mobile portuaire	-	5,26 ⁶⁸ kWh/TEU	-	-
Grue sur portique	-	-	-	-
Grue fixe	-	-	-	-

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention verticale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention électriques. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se multiplier. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins. Plusieurs puissances

⁶⁵ Base Empreinte, ADEME. Données : mix moyen électrique allemand et français 2017

⁶⁶ Entretien ECO CO2 et Unim

⁶⁷ (PDF) [A carbon footprint assessment of multi-output biorefineries with international biomass supply: a case study for the Netherlands \(researchgate.net\)](#)

⁶⁸ (PDF) [A carbon footprint assessment of multi-output biorefineries with international biomass supply: a case study for the Netherlands \(researchgate.net\)](#)

différentes existent, l'étude permettra de déterminer le type de batterie et la puissance de la batterie et du générateur les plus adaptés à l'utilisation du véhicule.

Pour l'acquisition d'un engin électrique à batterie, les coûts de l'ensemble du cycle de vie sont dominés par le coût initial des batteries. Les coûts d'exploitation des engins de manutention à batterie sont très faibles et nécessitent peu d'entretien mais l'investissement initial est important.

Lorsque les terminaux sont déjà raccordés au réseau, les solutions d'engins alimentés par ce réseau représentent un plus faible investissement.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme moyenne du fait de la maturité intermédiaire de la solution, de la disponibilité restreinte de ces engins et de l'investissement.

- **Portique sur pneus**

Plusieurs possibilités existent pour un portique sur pneus électriques :

- Par busbars de 460-500 V, des barres électriques installées dans le parc distribuant le courant électrique.
- Par enrouleur de câble 3 phases de 50/60 Hz et 1-10 kV ;
- Par des batteries lithium ion.

Pour la mise en place d'un portique électrique par câble, il faut prévoir un ajustement de l'infrastructure du chantier, qui n'est pas réalisable par tous les exploitants de terminaux. Un portique à batterie permet une installation plus simple sans ajustement majeur de l'infrastructure.

Les portiques sur pneus électriques fonctionnant à l'aide d'une batterie lithium-ion sont stockées avec un système de chauffage ou de refroidissement (en fonction de la température extérieure), ce qui permet de maintenir la température pour une optimisation des performances de la batterie. Plusieurs packs de batteries différents existent, par exemple :

- Un pack de 222 kWh à refroidissement liquide pour une autonomie de 4 heures, se rechargeant en 1 heure ;
- Un pack de 370 kWh à refroidissement par air passif d'une autonomie de 8 heures, se rechargeant en 2 heures.

Les durées de vie théoriques sont de 8 ans mais dépendent de la charge de travail ainsi que des cycles de charge et décharge.

Concernant la recharge, deux possibilités existent :

- Avec une station de recharge, qui peut être positionnée sur un emplacement de conteneurs au niveau du sol afin de faciliter l'accès. Elle a la taille d'un conteneur et est reliée au réseau du terminal par des câbles souterrains. Les conteneurs classiques peuvent alors être empilés au-dessus de la station.
- Avec un branchement manuel sur le secteur.

L'opération de recharge peut se faire en mode automatisé ou manuel.

Certains constructeurs proposent de rétrofiter les portiques sur pneus de différentes marques sous certaines conditions⁶⁹ :

- Le générateur diesel se trouve sous la poutre du châssis ;
- L'espace entre les roues du bogie est assez grand pour accueillir la batterie ainsi que l'espace nécessaire à la recharge ;
- Le système d'entraînement et de contrôle existant est contrôlé par onduleur avec liaison CC commune.

Le processus de conversion consiste à arrêter le groupe électrogène diesel et à alimenter le portique avec de l'énergie électrique provenant directement du réseau électrique⁷⁰.

⁶⁹ Battery RTG Tech Spec EN.pdf (konecranes.com)

⁷⁰ How to Reduce Opex Costs for RTG Terminals (porttechnology.org)

Cette solution présente d'autres avantages. L'utilisation de portiques sur pneus électriques par rapport aux portiques sur pneus à moteur diesel, peut réduire les émissions polluantes de 60 à 80 %, les coûts d'exploitation de 50 % et les coûts de maintenance d'environ 30 %⁷¹. Un autre fournisseur chiffre les coûts opérationnels de la version diesel entre 120 000 et 160 000 \$ et de la version électrique entre 40 et 80 000 \$, soit 2 à 3 fois moins cher⁷².

- **Grues mobiles portuaires**

Les grues mobiles portuaires électriques sont disponibles sur le marché. Plusieurs possibilités existent pour une grue mobile portuaire :

- Avec une batterie lithium ion ;
- Avec une alimentation électrique externe⁷³.

Ces deux solutions sont envisageables en rétrofit.

Certains fournisseurs proposent des grues avec alimentation électrique externe en basse tension (440/690 V) ainsi qu'en moyenne tension jusqu'à 15 kV⁷⁴, ainsi qu'une batterie lithium-ion supplémentaire pour compléter l'alimentation électrique externe. Dans le cas d'un réseau haute tension, l'alimentation est convertie en basse tension grâce à un transformateur présent sur le train de roulement. D'autres fournisseurs proposent des grues électriques de 615 kW, 690 V et 50 Hz⁷⁵.

- **Grues sur portiques**

Les grues sur portiques 100 % électrique sont disponibles sur le marché, avec des puissances variables jusqu'à 500 kW⁷⁶. Elles sont disponibles pour tout type de marchandises, allant jusqu'à des charges de 124 tonnes. Cet engin est conçu pour les terminaux dotés d'une infrastructure électrique, particulièrement optimisé pour les alimentations électriques comprise entre 380 V et 460 V. Le rendement peut atteindre jusqu'à 1 200 tonnes par heure⁷⁷. Les unités de stockage peuvent permettre de récupérer l'énergie régénérative et d'accumuler et fournir une puissance de 200 kW en 15 secondes.

- **Grues fixes**

Les grues fixes électriques sont encore peu développées, il est conseillé de se rapprocher de différents fournisseurs afin de connaître la disponibilité d'engins électriques, leurs gains énergétiques et leurs gains GES.

Toutes ces solutions présentent d'autres avantages :

- Limitation des nuisances sonores liées au moteur de l'engin ;
- Suppression des émissions de polluants atmosphériques locaux.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) fonctionnant grâce à l'électricité ;
- Nombre de kWh consommés ;

⁷¹ (PDF) [A Review of Rubber Tyred Gantry Cranes Energy Efficiency Improvements Based on Energy Monitoring, Energy Storage Systems and Optimal Operation Control Strategies \(researchgate.net\)](#)

⁷² [electrification-RTG-en-2018.indd .pdf \(porttechnology.org\)](#) ; 120 à 160 k\$ pour la version diesel et 40 à 80 k\$ pour la version électrique (conversion \$/€ au taux de change 0,92, nov 2023)

⁷³ [Ecolifting™ | Konecranes France](#)

⁷⁴ [MHC Generation 6 | Konecranes](#)

⁷⁵ [9300 E - mobile port crane: port handling up to Panamax class | SENNEBOGEN](#)

⁷⁶ [9300 E - mobile port crane: port handling up to Panamax class | SENNEBOGEN](#)

⁷⁷ [LPS 420 E – Portal Slewing Electric | Liebherr](#)

- Nombre de TEU transportés grâce à des engins électrique.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins électriques ;
- Suivi de la consommation en kWh.

A2 FA 2 : Hybride diesel batterie

Synthèse

1. Description de l'action

Un engin de manutention hybride diesel-batterie est un engin possédant une double alimentation en électricité et en diesel. Les batteries sont rechargées au préalable et peuvent aussi se recharger lors des manœuvres notamment lors de phases de freinage. L'ajout d'un système de stockage permet de sous-dimensionner la puissance du moteur. Il existe aussi des systèmes avec des supercondensateurs qui remplacent les batteries.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des engins de manutention.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Plusieurs solutions alternatives aux moteurs diesel existent. Elles sont toutes basées sur la substitution de tout ou partie de la consommation de carburants fossiles par l'utilisation de l'électricité : motorisation bi-mode (objet de la présente fiche) ou motorisation électrique.

Ces technologies présentent plusieurs points forts d'un point de vue environnemental, notamment par rapport aux émissions de GES et de polluants, mais aussi en termes de bruit. Le recours à des technologies basées sur l'utilisation de l'électricité en remplacement de carburants fossiles permet d'éliminer les émissions directes de polluants (pour la partie basée sur l'utilisation de l'électricité) et de GES.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Un engin de manutention hybride diesel-batterie est un engin possédant une double alimentation en électricité et en diesel. Les batteries sont rechargées au préalable et peuvent aussi se recharger lors des manœuvres notamment lors de phases de freinage. L'ajout d'un système de stockage permet de sous-dimensionner la puissance du moteur. Il existe aussi des systèmes avec des supercondensateurs qui remplacent les batteries.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les solutions hybrides permettent de réduire la consommation de carburant, en utilisant de l'électricité, et ainsi décarboner une partie de l'utilisation.

Bien que l'utilisation électrique de l'engin n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation du véhicule nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, compte tenu du « mix énergétique » de la production française d'électricité, la réduction des émissions de GES en France métropolitaine est importante avec ce mode de propulsion. En effet, 1 kWh d'électricité du mix français (d'énergie finale) émet 0,0386 kgCO_{2e}⁷⁸ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kgCO_{2e}, c'est-à-dire 0,316 kgCO_{2e}/kWh, soit 8 fois plus que le mix électrique français pour 1 kWh. Avec un gain énergétique supplémentaire, le gain GES total augmente encore.

- **Reachstacker**

Pour les reachstackers une réduction de carburant de 30 % est attendue avec les reachstackers hybrides d'un fournisseur⁷⁹ possédant une capacité de levage de 45 tonnes, un système de stockage d'énergie par supercondensateur et système de préhension hydraulique électrifié. D'autres fournisseurs chiffrent un gain de carburant plus faible, allant de 15 à 25 %⁸⁰, estimant ainsi le retour sur investissement dès 6 mois ou moins. A l'inverse, des études sur des plus petits reachstackers montrent un gain allant jusqu'à 39 %⁸¹ sur la consommation de carburant. Ces reachstackers sont équipés de batteries lithium-ion de 90 V et de 45 Ah, avec deux moteurs électriques de 10 kW et un moteur diesel de 38 kW.

- **Chariot élévateur**

Pour les chariots élévateurs, un fournisseur annonce une réduction d'au moins 30 % de carburant grâce à son engin hybride, d'une capacité de levage de 45 tonnes et équipé d'une transmission hybride à la fois diesel et électrique, d'un système de préhension hydraulique électrifié.

- **Chariot cavalier**

Pour les chariots cavaliers, un fournisseur annonce une réduction de 40 % du carburant avec un mode de propulsion hybride. Cela équivaut à plus de 50 tCO_{2e} évitées par an par engin par rapport à un engin

⁷⁸ Base Empreinte, ADEME. Données : 2018, usage : Transports/consommation.

⁷⁹ Konecranes

⁸⁰ [konecranes_brochure_lifttrucks_power_drive_53837779_0.pdf](#)

⁸¹ [Development of World's First Engine/Battery Hybrid Forklift Truck, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol.47 No.1\(2010\) \(mhi.co.jp\)](#)

diesel.⁸² Ces chariots cavaliers intègrent un système de Start and Stop et de freinage régénératif pour atteindre ces réductions.

Un autre fournisseur chiffre à plus de 35 % les gains de carburant avec des consommations de 21,4 l/h pour un engin diesel-électrique Stage III, contre 20 l/h un diesel-électrique Stage IV et à 13,5 l/h pour les diesel-batterie Stage IV⁸³. A performance équivalente, cela équivaut à plus de 50 tCO₂e évitées par an pour un diesel-batterie-hybride comparé à un engin similaire diesel de Stage IV. Si l'on compare à un engin diesel de Stage III on atteint -127 tCO₂e par an pour une exploitation de 6 000 heures par an.

- **Tracteur de terminal**

Pour les tracteurs de terminaux, un exemple d'un tracteur hybride développé aux Etats-Unis a montré une réduction de consommation de carburant de 5,5-6,7 l/h pendant les opérations à 2,03 l/h, soit une réduction de 3,5-4,75 l/h avec cette solution hybride soit une réduction de carburant de 63 à 70 %⁸⁴. Les résultats ont aussi montré une diminution de 77 % des émissions d'hydrocarbures (HC) et de NOx et de 85 % les émissions de particules.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Reachstacker	15-30 %	15-30 %
Chariot élévateur	15-39 %	15-39 %
Chariot cavalier	32-40 %	32-40 %
Tracteur de terminal	63-70 %	63-70 %

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention électriques ou hybride. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se multiplier. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins. Plusieurs puissances différentes existent, l'étude permettra de déterminer les puissances de la batterie et du générateur les plus adaptées à l'utilisation de l'engin.

- **Reachstacker**

Les performances des reachstackers hybrides sont similaires aux reachstackers standards et les capacités de levage atteignent les 45 tonnes. Cependant il existe différents modèles aux performances différentes.

Un constructeur⁸⁵ de reachstacker hybride propose un engin avec une batterie (phosphate de fer lithium) de 268 kW, une capacité de 456 Ah et un moteur avec une puissance de sortie nominale de

⁸² [317751 Straddle-Carrier-Brochure---end-to-end-operations-lr-web-spreads.pdf.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

⁸³ [Konecranes_brochure_Noell_HYBRID_straddle_carrier_2020.pdf](#)

⁸⁴ [Capacity Trucks | Capacity Yard Trucks | Spotter Trucks & Yard Jockeys](#)

⁸⁵ [SANY_ReachStacker_Brochure-104556.pdf](#)

210 kW (400 puissance crête). Cet engin peut fonctionner jusqu'à 20 h sans recharge et est équipé d'un système de récupération de l'énergie grâce à une batterie.

D'autres engins de 422 kWh avec un temps d'opération continu de 6 à 9 h pour une durée de charge de 1 à 1,5 h grâce à des puissances de charges de 2x150 kW.

Certains reachstackers hybrides sont équipés de supercondensateurs pour stocker l'énergie récupérée.

- **Chariot élévateur**

Les performances des chariots élévateurs hybrides sont similaires aux chariots élévateurs standards. Cependant il existe différents modèles aux performances différentes, dont des chariots élévateurs de capacité de levage de 45 tonnes. Il faut se renseigner auprès des fournisseurs des différents engins disponibles et de leurs performances respectives.

Pour ces engins, la solution hybride est généralement basée sur des supercondensateurs.

- **Chariot cavalier**

Les engins disponibles possèdent des performances similaires aux engins diesel, avec des capacités de levage supérieures à 60 tonnes en déplaçant deux conteneurs à la fois. Cependant, il existe différents chariots aux performances différentes : de 40, 50 ou 60 tonnes de levage et un réservoir diesel de 4,4 litres. Pour les temps de recharges lors des opérations, il est possible de recharger l'engin avec un système de recharge rapide de 600 kW en 30 à 180 s. Entre des périodes de travail ou lors d'inutilisation, 45 min de recharge permettent jusqu'à 240 min de fonctionnement sur une borne de recharge standard⁸⁶.

Pour les chariots cavaliers, la solution hybride est basée sur un système de batterie lithium-ion. Les intervalles d'entretien vont jusqu'à 1 000 heures de fonctionnement.

- **Tracteur de terminal**

Les performances des tracteurs de terminaux hybrides sont similaires aux engins standards. Cependant il existe encore peu de modèles. Il faut se renseigner auprès des fournisseurs des différents engins disponibles et de leurs performances respectives.

Dans un contexte économiquement différent de la France, la construction du prototype de tracteur de terminal hybride rechargeable développé aux Etats-Unis a coûté 663 k€⁸⁷.

Economiquement, le CAPEX d'un engin hybride dépendra des caractéristiques souhaitées mais sera plus élevé que pour un engin diesel. Les OPEX seront considérablement réduits grâce à l'économie de carburant et la réduction de la maintenance sur les moteurs.

L'ajout d'un système de stockage d'énergie grâce aux batteries permet tout de même de sous-dimensionner la puissance du moteur, et donc de réaliser des gains économiques et d'espace plus élevés.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme moyenne du fait de la maturité intermédiaire de la solution, de la disponibilité restreinte de ces engins et de l'investissement.

Cette solution aura d'autres impacts positifs :

- Limitation des nuisances sonores liées au moteur de l'engin ;
- Réductions des émissions de polluants atmosphériques.

⁸⁶ [317751_Straddle-Carrier-Brochure---end-to-end-operations-lr-web-spreads.pdf.pdf \(kalmarglobal.com\)](#)

⁸⁷ [Pluggable Hybrid Electric Terminal Tractor \(PHETT\) - AMPS \(ampsonboard.com\)](#) ; 722 k\$ (conversion \$/€ au taux de change 0,92, nov 2023)

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins batterie-diesel (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Nombre d'heures maximales assurées grâce à la batterie seule ;
- Nombre de kWh consommés ;
- Nombre de TEU (en absolu et en relatif) transportés grâce à des engins hybride.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi du parc d'engins.

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Un engin de manutention hybride diesel-batterie est un engin possédant une double alimentation en électricité et en diesel. Les batteries sont rechargées au préalable et peuvent aussi se recharger lors des manœuvres notamment lors de phases de freinage. L'ajout d'un système de stockage permet de sous-dimensionner la puissance du moteur. Il existe aussi des systèmes avec des supercondensateurs qui remplacent les batteries.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les solutions hybrides permettent de réduire la consommation de carburant, en utilisant de l'électricité, et ainsi décarboner une partie de l'utilisation.

Bien que l'utilisation électrique de l'engin n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation d'engin nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, compte tenu du « mix énergétique » de la production française d'électricité, la réduction des émissions de GES en France métropolitaine est importante avec ce mode de propulsion. En effet, 1 kWh d'électricité du mix français (d'énergie finale) émet 0,0386 kgCO₂e⁸⁸ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kgCO₂e, c'est-à-dire 0,316 kgCO₂e/kWh, soit 8 fois plus que le mix électrique français pour 1 kWh. Avec un gain énergétique supplémentaire, le gain GES total augmente encore.

- **Portique sur pneus**

Les engins hybrides sont déjà disponibles sur le marché. Un fournisseur⁸⁹ de portiques sur pneus hybrides chiffre à plus de 60 % la réduction de consommation de carburant grâce aux technologies suivantes : la batterie lithium ion qui permet de réutiliser efficacement l'énergie de freinage stockée, permettant ainsi de réduire la taille du moteur et grâce à un système de contrôle de la vitesse variable du moteur permettant d'optimiser la vitesse en fonction de l'utilisation et ainsi d'économiser du carburant. Les gains GES sont aussi estimés à 60 %.

- **Portique sur rails**

Les portiques de quais et sur rails fonctionnent à l'électrique en France, il n'y a donc pas d'intérêt à passer à une hybridation.

- **Grues mobiles portuaires**

Des grues mobiles portuaires avec des supercondensateurs sont disponibles et permettent de récupérer l'énergie de descente et de freinage. Cette énergie est stockée dans les supercondensateurs puis réutilisée. Cela permet une réduction de consommation allant jusqu'à 23 % (en fonction des conditions d'utilisation et de la capacité de la grue) d'après le fournisseur⁹⁰.

Un autre fournisseur, utilisant un système de stockage comme source d'énergie secondaire grâce à un accumulateur, permet une réduction de consommation de carburant de 30 % et donc une réduction d'émissions de GES de 30 %⁹¹.

⁸⁸ Base Empreinte, ADEME. Données : 2018, usage : Transports/consommation.

⁸⁹ [2015_hybrid_RTG_single_page.pub \(pacecorp.com\)](https://www.pacecorp.com/2015_hybrid_RTG_single_page.pub)

⁹⁰ [kc-mhc-m7-en-01.pdf \(konecranes.com\)](https://www.konecranes.com/kc-mhc-m7-en-01.pdf)

⁹¹ [untitled \(liebherr.com\)](https://www.liebherr.com/untitled)

Ces systèmes actuels correspondent plutôt à des solutions hybrides non rechargeables, avec des systèmes de stockage pour récupérer de l'énergie, la stocker et la réinjecter qu'à des solutions hybrides rechargeables.

- **Grues sur portiques et fixes**

Les grues sur portiques et fixes hybrides étant encore peu développées les gains énergétiques sont peu estimés. Cependant, on peut considérer qu'ils seront similaires aux gains des grues mobiles portuaires hybrides.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)
Portique de stockage sur pneus	60 %	60 %
Grue mobile portuaire	23-30 %	23-30 %
Grue sur portique	23-30 %	23-30 %
Grue fixe	23-30 %	23-30 %

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention verticale.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des engins de manutention électriques ou hybride. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se multiplier. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins. Plusieurs puissances différentes existent, l'étude permettra de déterminer la puissance de la batterie et du générateur les plus adaptés à l'utilisation de l'engin.

Economiquement, le CAPEX d'un engin hybride dépendra des caractéristiques souhaitées mais sera plus élevé qu'un engin diesel. Les OPEX seront considérablement réduits grâce à l'économie de carburant et la réduction de la maintenance sur les moteurs.

L'ajout d'un système de stockage d'énergie grâce aux batteries permet tout de même de sous-dimensionner la puissance du moteur, et donc de réaliser des gains économiques et d'espace.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme moyenne du fait de la maturité intermédiaire de la solution, de la disponibilité restreinte de ces engins et de l'investissement.

- **Portique sur pneus**

Les portiques sur pneus hybrides sont associés à des batteries lithium-ion. Un retrofit est souvent envisageable pour cette solution.

Economiquement, un fournisseur chiffre à plus de 40 % la réduction annuelle des coûts grâce à la réduction des coûts de maintenance et de carburant⁹².

- **Grues**

⁹² 2015_hybrid_RTG_single_page.pub (pacecocorp.com)

Pour une grue mobile portuaire hybride il est possible d'utiliser des super condensateurs. Cette solution est envisageable par rétrofit. Des solutions avec des batteries lithium-ion sont en cours de développement.

Cette solution permet une réduction du coût total pour le propriétaire grâce à des coûts de carburant et de maintenance réduits de plus de 15 % avec un engin fonctionnant à 50 % grâce à l'électricité et 50 % au diesel face à un engin 100 % diesel. Plus l'électrification est importante, plus ces coûts sont réduits, atteignant jusqu'à 30 % de réduction pour un engin fonctionnant à 95 % à l'électricité et 5 % au diesel⁹³.

Cette solution aura d'autres impacts positifs :

- Limitation des nuisances sonores liées au moteur de l'engin ;
- Réduction des émissions de polluants atmosphériques.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins batterie-diesel (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Nombre d'heures maximales assurées grâce à la batterie seule ;
- Nombre de kWh consommés ;
- Nombre de TEU (en absolu et en relatif) transportés grâce à des engins hybride.

Modalités pratiques de collecte des données :

- - Exploitation du fichier de suivi du parc d'engins.

93

https://www.researchgate.net/publication/349528658_The_investigation_of_life_cycle_costs_of_Mobile_Harbour_Crane_a_case_study_in_Berlian_Terminal_at_Tanjung_Perak_Seaport_Surabaya/link/6080bd608ea909241e16c840/download

A2 FA 3 : GNV

Synthèse

1. Description de l'action

Le GNV (Gaz Naturel pour Véhicule) est composé de plus de 85 % de méthane, de 2 à 8 % d'éthane et d'une très faible quantité d'autres hydrocarbures comme le propane et le butane.

Le méthane est un gaz incolore et inodore. C'est le principal composant du gaz naturel, deux fois moins inflammable que les autres carburants hydrocarbures. Plus léger que l'air, le GNV se dissipe rapidement en cas de fuite, contrairement aux autres carburants. Il est stocké et utilisé sous forme gazeuse ou liquide et est distribué en station dédiée.

Le GNV regroupe trois gaz naturels carburants :

- Le **Gaz Naturel Comprimé ou Compressé (GNC)**, sous forme gazeuse ;
- Le **Gaz Naturel Liquéfié (GNL)**, sous forme liquide cryogénique, stocké dans des réservoirs isolés sous vide à des températures comprises entre -125 °C et -160 °C. Cette liquéfaction à température très basse et à pression atmosphérique est consommatrice d'énergie (environ 5 à 10 %) mais elle permet d'obtenir un produit 600 fois moins volumineux que sous sa forme gazeuse. Il est donc particulièrement adapté aux longues distances grâce à son autonomie lui permettant de parcourir des distances plus importantes (le carburant GNL dispose d'une plus grande quantité d'énergie par volume que le carburant GNC) ;
- Le **bioGNV** est obtenu grâce à la méthanisation de déchets organiques, qui peut ensuite être utilisé sous forme compressée (bioGNC) ou liquide (bioGNL).

Le développement d'une flotte fonctionnant au GNV (GNC ou GNL) requiert :

- D'une part des engins spécifiques adaptés et équipés d'un moteur à allumage commandé et d'un dispositif de stockage de carburant spécifique (différent entre les versions GNC et GNL mais pas entre le GNV et le bioGNV) ;
- D'autre part un système spécifique de recharge, qui peut être une infrastructure (station privative) ou bien une recharge par camion-citerne qui est économiquement plus intéressant dans le cas d'une petite flotte.

Le bioGNL étant une technologie en voie de développement, il n'est pas traité dans la suite de cette fiche.

Etant donné qu'entre les solutions gaz ou bio-gaz, les engins, les infrastructures et le carburant gazeux lui-même sont identiques, il n'a été retenu qu'une seule fiche commune. Seuls les impacts en termes d'émissions de GES vont être différents.

2. Domaine de pertinence

Seuls quelques engins de manutention horizontale au GNV existent.

A ce jour les engins de manutention verticale GNV ne sont pas encore développés (une fiche a néanmoins été préconfigurée).

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

La filière GNV est pleinement opérationnelle en France pour les véhicules lourds. Elle se développe progressivement pour les engins de manutention au (bio)GNV (objet de la présente fiche) et dans une moindre mesure pour les motorisations dual fuel.

Le bioGNV est issu de ressources renouvelables (contrairement au GNV issu de ressources fossiles) et à ce titre aucune émission de GES n'est attribuable à son utilisation. Il bénéficie ainsi d'un contexte réglementaire particulièrement favorable.

Le montage d'une station de recharge gaz est soumis à une déclaration ou autorisation ICPE en fonction du débit ou de la capacité de l'installation.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Les engins de manutention GNV (GNC, GNL ou bioGNV) fonctionnent avec un moteur à allumage (essence) et un stockage embarqué dans l'engin. Ils nécessitent la mise en place d'un système de recharge spécifique, soit par l'installation d'une station soit par distribution par camion-citerne.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

De façon générale, les moteurs à allumages ont un rendement inférieur aux moteurs diesel : le rendement est de l'ordre de 30 % à 35 % pour le moteur à allumage contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel⁹⁴. Cela est principalement dû à des taux de compression plus faible. Ce mauvais rendement fait qu'en moyenne, un véhicule GNV consomme 22 % plus d'énergie qu'un véhicule diesel⁹⁵.

Concernant l'impact sur les émissions de GES, selon les données de la Base Empreinte de l'ADEME, le GNV permet une réduction des émissions de GES de 20 % par rapport au gazole, et le bioGNV 80 % de moins⁹⁶.

Par rapport au diesel et à l'essence, le gaz naturel véhicule (GNV) permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 à 70 % et les particules fines de 90 %⁹⁷.

- **Reachstacker**

Des phases de tests et des prototypes ont vu le jour en 2013-2014 pour du dual-fuel. Cependant, actuellement il y a peu de R&D sur les reachstackers GNV tant pour le dual-fuel que pour le 100 % GNV.

- **Chariot élévateur**

Quelques modèles existent sur le marché, permettant des puissances de 30 à 60 kW pour des consommations de GNL de 2 à 4 kg/h⁹⁸ (en moyenne, on considèrera une consommation de 3,15 kg/h), avec des capacités selon les modèles de 2000 kg à 5000 kg et une vitesse maximale de 17 à 21 km/h. Un chariot élévateur diesel consomme autour de 2,6 litres de diesel par heure⁹⁹. Ce qui correspond à 26 kWh. Or un véhicule parcourt la même distance avec 1 kg de GNV qu'avec 1 litre de diesel¹⁰⁰. On constate donc une augmentation de la consommation énergétique de l'ordre de 21 % avec une solution GNV.

- **Chariot cavalier**

Les chariots cavaliers à propulsion GNV sont encore peu développés. Des phases de test pour des engins hybrides voient le jour dans le monde, estimant réduire les émissions de particules et de NOx d'environ 99 %. D'autres projets cherchent à adapter des chariots déjà existants en rétrofitant les moteurs pour proposer une solution 100 % GNV ou dual-fuel¹⁰¹.

⁹⁴ [Moteur à allumage commandé — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

⁹⁵ [Périmètre : fret routier. Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](#)

⁹⁷ ADEME

⁹⁸ [Gas/LPG forklift trucks | Jungheinrich](#)

⁹⁹ [How Much Diesel Does A Forklift Use Per Hour? - UtilitySmarts](#)

¹⁰⁰ [GNV gaz : définition, prix, station et voiture \(selectra.info\)](#)

¹⁰¹ [The adaptation of two straddle carriers to natural gas advances in the Port of Barcelona | Core LNGas hive](#)

- **Tracteur de terminal**

Quelques fournisseurs proposent déjà des tracteurs de terminaux au GNV¹⁰², particulièrement à l'étranger (Etats-Unis) où des engins sont opérationnels. Cette solution est encore peu développée en France. Une phase de test en Espagne a été faite sur un tracteur de terminal fonctionnant au GNL. Sa consommation diesel était équivalente à 82,7 kWh/h tandis que pour le tracteur au GNL la consommation était de 91,9 kWh/h, soit 11 % de plus. La réduction des émissions de GES était de 16 % et les émissions de PM et de NOx étaient proches de zéro. Des engins d'une durée de vie de 25 ans avec un réservoir de plus de 550 L pour un temps de recharge de 10 minutes sont envisageables.

Type d'engin de manutention horizontale	Gains énergétiques * (% de réduction de la consommation)	Gains GES (% de réduction des GES)	
		GNV	bioGNV
Reachstacker	-22 %	20 %	80 %
Chariot élévateur	-21 %	20 %	80 %
Chariot cavalier	-22 %	20 %	80 %
Tracteur de terminal	-11 %	20 %	80 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale. Cependant, à ce jour les engins de manutention horizontale GNV sont peu développés.

4. Mise en œuvre

Quelques constructeurs proposent des engins de manutention au GNV. Le nombre de modèles est encore peu développé. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins.

Le retrofit devrait aussi être possible puisque du point de vue motorisation, l'opération est peu complexe car elle est déjà existante et maîtrisée dans le secteur routier. Le point de complexité se situe au niveau de l'implémentation de nouveau stockage de gaz. En effet, à iso énergie-contenu égal, le gaz prend environ 5 fois plus de place que le stockage diesel, il faut donc trouver de la place pour les réservoirs.

Pour l'avitaillement, il existe deux options :

- Installer une station GNV, qui sera raccordée au réseau de gaz et contiendra un compresseur et un stockage tampon relié à la station ;
- Par camion-citerne avec des RAC de bonbonnes permettant de procéder au rechargement.

Economiquement, plusieurs aspects sont à prendre en compte :

- L'installation d'une station GNV est estimée à 480 k€ ;

¹⁰² Shacman LNG Terminal Tractor, SHACMAN (shacmanauto.com)

- Le rechargement par camion-citerne est estimé à 50 k€ ;
- Avant la flambée des prix de l'énergie (en particulier du gaz) en 2021, le coût du carburant était estimé de 30 à 50 % inférieur pour le GNV par rapport au diesel¹⁰³. Actuellement, le GNV reste plus cher que le gazole.

L'étude sur un terminal tracteur de 2019 confirme cette économie sur le coût des carburants puisqu'elle annonce les prix suivants : 0,0693 €/kWh pour le diesel et 0,0325 €/kWh, ce qui correspond à une économie de 48 % d'économie sur le coût de carburant pour 1 h d'opération¹⁰⁴. Dans cette étude le retour sur investissement a été chiffré à 9 ans.

A noter que cette solution a aussi d'autres impacts importants :

- Limitation des nuisances sonores ;
- Par rapport au diesel et à l'essence, le gaz naturel véhicule (GNV) permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote de 30 à 70 %, et les particules fines de 90 %¹⁰⁵.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution (à différencier entre GNC, GNL et bioGNV) :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) fonctionnant au GNV ;
- Pourcentage de kilomètres/heures effectués par des engins GNV ;
- Volume de GNV consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au GNV ;
- Suivi de la consommation de GNV.

¹⁰³ Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel (gaz-mobilite.fr)

¹⁰⁴ [Sustainability | Free Full-Text | Energy Efficiency in European Ports: State-Of-Practice and Insights on the Way Forward \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3441)

¹⁰⁵ ADEME

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Les engins de manutention GNV (GNC, GNL ou bioGNV) fonctionnent avec un moteur à allumage et un stockage embarqué dans l'engin. Ils nécessitent la mise en place d'un système de recharge spécifique, soit par l'installation d'une station soit par approvisionnement par camion-citerne.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

De façon générale, les moteurs à allumages ont un rendement inférieur aux moteurs diesel : de l'ordre de 30 à 35 % pour le moteur à allumage contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel¹⁰⁶. Cela est principalement dû à des taux de compression plus faible. Ce mauvais rendement fait qu'en moyenne, un véhicule GNV consomme 22 % plus d'énergie qu'un véhicule diesel¹⁰⁷.

Concernant l'impact sur les émissions de GES, selon les données de la Base Empreinte de l'ADEME, le GNV permet une réduction des émissions de GES de 20 % par rapport au gazole, et le bioGNV 80 % de moins¹⁰⁸.

Par rapport au diesel et à l'essence, le gaz naturel véhicule (GNV) permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 à 70 % et les particules fines de 90 %¹⁰⁹.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention verticale.

Attention, à ce jour les engins de manutention verticale GNV ne sont pas développés, il faudra attendre plusieurs années avant d'espérer voir ces technologies sur le marché.

4. Mise en œuvre

Les constructeurs ne proposent pas encore d'engins de manutention au GNV. Il est conseillé de se tenir au courant des avancées et des recherches pour cette technologie et de se rapprocher des constructeurs de engins pour échanger avec eux si ce mode de propulsion est en phase de recherche. En parallèle de la disponibilité des engins se posera la question de leur avitaillement (installation d'une station GNV interne ou livraison de bonbonnes par camion-citerne).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) fonctionnant au GNV ;
- Pourcentage de kilomètres/heures effectués par des engins GNV ;
- Volume de GNV consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au GNV et de leurs consommations.

¹⁰⁶ [Moteur à allumage commandé — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

¹⁰⁷ Périmètre : fret routier. [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](#)

¹⁰⁹ ADEME

A2 FA 4 : Dual-fuel GNV-diesel

Synthèse

1. Description de l'action

Les engins de manutention GNV hybride dual-fuel sont des technologies bi-carburant associant diesel et gaz naturel. Ils possèdent un système de motorisation compatible au dual-fuel. Le stockage des carburants est embarqué dans l'engin. Le mode de propulsion dual-fuel demande moins d'espace de stockage que le mode de propulsion 100 % GNV. Ces engins nécessitent la mise en place d'un système de recharge spécifique, soit par l'installation d'une station soit par approvisionnement par camion-citerne.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des engins de manutention horizontale.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : les engins de manutention GNV hybride dual-fuel pour les engins de manutention horizontale.

4. Contexte et réglementation

La filière GNV est pleinement opérationnelle en France pour les véhicules lourds. Elle se développe progressivement pour les engins de manutention au (bio)GNV et dans une moindre mesure pour les motorisations dual fuel (objet de la présente fiche).

Le bioGNV est issu de ressources renouvelables (contrairement au GNV issu de ressources fossiles) et à ce titre aucune émission de GES n'est attribuable à son utilisation. Il bénéficie ainsi d'un contexte réglementaire particulièrement favorable.

Le montage d'une station de recharge gaz est soumis à une déclaration ou autorisation ICPE en fonction du débit ou de la capacité de l'installation.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Les engins de manutention GNV hybride dual-fuel sont des technologies bi-carburant associant diesel et gaz naturel. Ils possèdent un système de motorisation compatible au dual-fuel. Le stockage des carburants est embarqué dans l'engin. Le mode de propulsion dual-fuel demande moins d'espace de stockage que le mode de propulsion 100 % GNV. Ils nécessitent la mise en place d'un système de recharge spécifique, soit par l'installation d'une station dédiée soit par livraison par camion-citerne.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique des engins dual-fuel GNV-diesel dépend de la part d'utilisation du GNV par rapport au diesel. En effet, les moteurs à allumages (pour le GNV) ont un rendement inférieur aux moteurs diesel : de l'ordre de 30 % à 35 % pour le moteur à allumage contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel¹¹⁰. Cela est principalement dû à des taux de compression plus faible. Ce mauvais rendement fait qu'en moyenne, un véhicule GNV consomme 22 % plus d'énergie qu'un véhicule diesel¹¹¹. La part d'utilisation du GNV par rapport au diesel déterminera ainsi la consommation énergétique.

Concernant l'impact sur les émissions de GES, selon les données de la Base Empreinte de l'ADEME, le GNV permet une réduction des émissions de GES de 20 % par rapport au gazole, et le bioGNV 80 % de moins¹¹². De même que pour la consommation énergétique, le taux d'utilisation de GNV par rapport au diesel déterminera les gains GES pour l'utilisation de l'engin.

A noter que par rapport au gazole et à l'essence, le GNV permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 à 70 %, les particules fines de 90 %¹¹³.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale. Cependant, à ce jour les engins de manutention horizontale dual fuel GNV-diesel sont peu développés.

4. Mise en œuvre

Le développement d'une flotte fonctionnant au dual-fuel GNV (GNC ou GNL) et diesel requiert :

- D'une part des engins spécifiques adaptés et équipés :
 - o D'un moteur à allumage commandé, dual-fuel. Ce moteur fonctionne grâce à un mélange de GNV et de gazole. Le gazole est injecté directement dans la chambre de combustion, et le GNV injecté dans le collecteur d'admission par une technologie de carburant ou par une technologie d'injection ;
 - o De dispositifs de stockages de carburants spécifiques GNV (différent entre les versions GNC et GNL mais pas entre le GNV et le bioGNV) et un système de stockage diesel ;
- D'autre part deux systèmes de recharge
 - o GNV : qui peut être une infrastructure (station privative ou une station mutualisée entre plusieurs transporteurs) ou bien une recharge par camion-citerne, avec des RAC

¹¹⁰ Moteur à allumage commandé — Wikipédia ([wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_allumage_command%C3%A9))

¹¹¹ Périmètre : fret routier. [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://www.theicct.org/)

¹¹³ ADEME

de bonbonnes intérieures, qui est économiquement plus intéressant dans le cas d'un petit parc d'engins. La station GNV sera raccordée au réseau de gaz et contiendra un compresseur et un stockage tampon relié à la station ;

- Diesel : le système de recharge diesel étant déjà existant.

L'offre commerciale d'engins de manutention dual-fuel GNV-diesel est peu développée pour le moment (en phases de tests) mais évolue d'année en année. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces engins. Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait du manque de maturité de la solution et de la faible disponibilité de ces engins (offre encore restreinte).

Pour cette solution il est techniquement possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant les moteurs thermiques par des moteurs à allumage. Plusieurs sociétés proposent déjà des solutions de rétrofit pour d'autres engins.

Du point de vue motorisation, l'opération est peu complexe car elle est déjà existante et maîtrisée dans le monde routier. Le point de complexité se situe au niveau de l'implémentation de nouveau stockage de gaz. En effet, à iso énergie-contenu égal, le gaz prend environ 5 fois plus de place que le stockage diesel, il faut donc trouver de la place pour les réservoirs.

Economiquement, plusieurs aspects sont à prendre en compte, notamment :

- L'avitaillement, avec l'installation d'une station GNV dédiée (plusieurs centaines de milliers d'euros) ou la livraison de bonbonnes par camion-citerne ;
- Le coût du carburant, estimé de 30 à 50 % inférieur pour le GNV par rapport au gazole, mais à reconsidérer avec la flambée du prix des énergies (en particulier le gaz) depuis 2021. Des phases de tests sur des reachstackers et des prototypes réalisés en 2013-2014 ont démontré une réduction des coûts de carburant de 20 % par heure¹¹⁴ sur un engin alimenté en GNL.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins (en absolu et en relatif) fonctionnant au dual-fuel GNV-diesel ;
- Kilomètres (en absolu et en relatif) effectués par des engins dual-fuel GNV-diesel ;
- Volume de GNV consommé ;
- Volume de gazole consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au dual-fuel GNV-diesel ;
- Suivi de la consommation de GNV et de gazole.

¹¹⁴ Kalmar Demonstrates LNG Powered Reachstacker - Offshore Energy (offshore-energy.biz)

A2 FA 5 : Hydrogène

Synthèse

1. Description de l'action

Les technologies hydrogène regroupent deux types de solutions :

- Les moteurs fonctionnant directement avec de l'hydrogène comme source d'énergie ;
- Les moteurs électriques alimentés par de l'électricité produite en direct par une pile à combustible (PAC) fonctionnant à l'hydrogène.

L'essentiel de la R&D porte sur cette 2^{ème} voie : la PAC est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse. Du dihydrogène, H₂ à l'état gazeux, est contenu dans des bouteilles, faisant office de réservoir, dans le véhicule. L'énergie produite est stockée dans une batterie qui alimente directement le moteur électrique du véhicule. C'est cette technologie qui est décrite dans cette fiche action.

Le développement d'un parc fonctionnant à l'hydrogène requiert :

- D'une part des engins spécifiques adaptés et un dispositif dédié de stockage d'hydrogène ;
- D'autre part un système spécifique de recharge, qui peut être une infrastructure (station privative) ou bien une recharge par camion-citerne qui est économiquement plus intéressante dans le cas d'une petite flotte.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des engins de manutention.

A noter que les engins sont actuellement en phases de tests et ne sont pas encore disponibles sur le marché.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

4. Contexte et réglementation

Il existe diverses lois et réglementations nationales et/ou régionales à prendre en compte pour l'exploitation, le ravitaillement et le stockage des piles à combustible ou d'engins équipés de piles à combustible dans le cadre d'une infrastructure hydrogène. En fonction du lieu, les autorités locales, la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), les pompiers et les compagnies d'assurance doivent être impliqués dans la planification et la mise en place de ce système. Vous pouvez également faire appel à des planificateurs spécialisés et des experts en construction qui pourront vous fournir des conseils.

En outre il existe des programmes de financements lancés par exemple par :

- Le Clean Hydrogen Partnership, <https://www.clean-hydrogen.europa.eu>

- L'ADEME (Agence de la Transition Écologique) www.ademe.fr

Ces programmes de financement sont limités dans le temps et mis en place avec un budget fixe. En règle générale, vous devez manifester votre intérêt en soumettant une demande de financement, ce qui vous met en concurrence avec d'autres candidats. L'accent est mis sur le volume de CO₂ économisé. Plus les économies potentielles sont élevées, plus la probabilité d'une réponse positive à ce type de financement est grande.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Les engins de manutention hydrogène sont des engins à propulsion électrique avec un moteur alimenté par une pile à combustible elle-même alimentée par l'hydrogène. L'essentiel de la R&D repose sur la PAC qui est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse. Du dihydrogène, H_2 à l'état gazeux, est contenu dans des bouteilles, faisant office de réservoir, dans le véhicule. L'énergie produite est stockée dans une batterie qui alimente directement le moteur électrique de l'engin.

Néanmoins, les technologies associées à l'hydrogène mobilité sont encore chères et les expérimentations et pré déploiements à venir nécessitent, comme toute technologie émergente, un soutien pour amorcer la demande en engins et accélérer l'industrialisation. Ce qui fait qu'économiquement, ces solutions ne présentent pas encore de retour sur investissement. Le surcoût à l'achat de l'engin est dû au coût élevé, à l'heure actuelle, des piles à combustibles, mais aussi des réservoirs permettant de stocker l'hydrogène à bord de l'engin.

De nouvelles technologies sont aussi en cours de développement, notamment des engins à double carburant hydrogène et diesel grâce à une technologie avancée de moteur à combustion à double carburant.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La production d'1 kg d'hydrogène (équivalent à la consommation d'une voiture neuve standard pour parcourir 100 km¹¹⁵), c'est-à-dire l'équivalent de 13,4 kWh, demande en réalité 58,7 kWh d'électricité initiale. Cela est dû aux nombreuses pertes présentes sur l'ensemble de la chaîne de production. Cependant, les nombreuses recherches autour de l'hydrogène font pressentir une grande marge d'amélioration sur ce rendement global.

Quant au bilan environnemental de la mobilité hydrogène, « du puits à la roue », il est complexe et va dépendre principalement de la nature de la source primaire (renouvelable versus fossile, pays de production) et de la distance d'acheminement entre la production de l'hydrogène et la station d'avitaillement. L'électrolyse à partir d'électricité bas-carbone permet d'obtenir une empreinte carbone allant de 0,5 à 3 kgCO₂e par kg d'hydrogène, tandis que les procédés issus d'énergie fossile peuvent monter jusqu'à environ 22 kgCO₂e par kg d'hydrogène dans le cas de la gazéification du charbon¹¹⁶.

Par ailleurs, des solutions pour limiter l'emploi de certains métaux précieux doivent être étudiées et mises en place (recyclage, amélioration des technologies actuelles).

¹¹⁵ Production d'hydrogène renouvelable : comment ça marche ? (engie.com)

¹¹⁶ Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? (carbone4.com)

- **Reachstackers**

Quelques projets sont en cours de développement et de tests pour des reachstackers utilisables sur des terminaux intermodaux. Ces engins possédant 4 réservoirs d'hydrogène pourraient tenir une journée entière d'opérations. Les temps de recharges sont estimés entre 10 et 15 minutes.

Durant l'été 2023, le port de Valence a reçu un reachstaker hydrogène¹¹⁷ (après un 1^{er} tracteur de terminal hydrogène reçu en avril 2023), développé dans le cadre du programme H2PORTS. L'engin peut supporter deux cycles d'opérations avant de se recharger.

- **Chariot élévateur**

Certaines flottes d'engins de manutention de logistique fonctionnent déjà à l'hydrogène (80 % des engins de manutention de LIDL dans son entrepôt à Carquefou fonctionnent à l'hydrogène vert, principalement des chariots élévateurs)¹¹⁸. Les avantages de l'hydrogène sont un temps de recharge rapide pour une autonomie importante (3 min de recharge pour 7 à 8 h d'autonomie pour chariots élévateurs LIDL). Cependant, à ce jour, les flottes de chariots élévateurs existantes sont plutôt dédiées à de la logistique d'entrepôt que de la logistique de terminal portuaire.

- **Chariot cavalier**

Récemment, le premier chariot cavalier à hydrogène à double carburant du monde a été inauguré. Cet engin fonctionne avec un mélange d'hydrogène et de diesel et utilise une technologie avancée de moteur à combustion à double carburant. L'hydrogène est injecté dans le moteur à combustion diesel. Cette technologie peut remplacer jusqu'à 70 % de la consommation de diesel par de l'hydrogène grâce à un stockage de 30 kg d'hydrogène. L'autonomie de l'engin est d'une journée d'opération. L'objectif étant d'atteindre un chariot 100 % hydrogène. Après la phase de conception et de développement, la phase de test est maintenant entamée¹¹⁹.

- **Tracteur de terminal**

Quelques fournisseurs proposent déjà des tracteurs de terminaux à pile à combustible hydrogène, associée à une batterie pour fournir une performance maximale lorsque cela est nécessaire. L'hydrogène est stocké dans un conteneur sous pression. Le temps de remplissage du réservoir est de l'ordre de 5 minutes¹²⁰. La capacité de traction de cet engin est supérieure à 75 tonnes. L'engin est équipé d'une pile à combustible de 30 kW, d'un réservoir d'hydrogène de 10 kg et de batteries de 35 kWh.

Une autre phase de test a démarré pour un véhicule équipé de 4 réservoirs d'hydrogène de 150 litres stockés sous 350 bars de pression pour un total de 14,4 kg. Cet engin fournit une capacité de traction équivalente au diesel¹²¹.

Cependant, la provenance de l'hydrogène est à vérifier, certains fournisseurs proposant de l'hydrogène « bleu » produit à partir de vaporeformage du méthane et associé à une capture de CO₂ produit lors de l'opération.

Des entreprises travaillent sur une solution permettant de convertir les engins de manutention dédiés à la manutention portuaire à conteneurs vers l'hydrogène¹²². Le rétrofit de matériel et le développement de sites de production d'hydrogène sont étudiés et des prototypes sont développés.

¹¹⁷ <https://www.seatrade-maritime.com/ports/port-valencia-receives-worlds-first-hydrogen-powered-reach-stacker>

¹¹⁸ Source fournisseur d'hydrogène

¹¹⁹ [20230330 Press release Dual Fuel Straddle Carrier launch ENG FINAL \(pioneers-ports.eu\)](https://www.pioneers-ports.eu/20230330-press-release-dual-fuel-straddle-carrier-launch-eng-final)

¹²⁰ [Technical and Economic Analysis of Fuel Cells for Forklift Applications \(acs.org\)](https://www.acs.org/technical-economic-analysis-fuel-cells-forklift-applications)

¹²¹ [Terberg teste un porte-conteneurs à hydrogène dans le Port de Rotterdam \(h2-mobile.fr\)](https://www.h2-mobile.fr/terberg-teste-un-porte-conteneurs-a-hydrogene-dans-le-port-de-rotterdam)

¹²² [Gaya : une offre globale d'hydrogène pour la manutention – France Hydrogène - France Hydrogène \(francehydrogene.org\)](https://francehydrogene.org/gaya-une-offre-globale-dhydrogene-pour-la-manutention)

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale d'engins de manutention hydrogène n'est pas encore très développée. Les phases de tests évoluent d'année en année. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de cette solution et de la possibilité de faire partie d'une phase de test. Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait du manque de maturité de la solution et de la faible disponibilité de ces engins.

Pour la mise en œuvre, les infrastructures devront être adaptées et varieront selon plusieurs critères. Les éléments éventuels à envisager sont :

- La remorque à hydrogène si l'on fait appel à un fournisseur externe pour l'H₂ ;
- L'électrolyseur d'hydrogène, si l'H₂ est produit en interne, par exemple en utilisant l'énergie éolienne ou photovoltaïque ;
- Le compresseur haute pression ;
- Le réservoir temporaire haute pression ;
- Le système de canalisation ;
- Le dispenser (pompe de remplissage pour le ravitaillement en H₂).

Economiquement, dans le cas de chariots élévateurs, les coûts estimés sont les suivants ¹²³ :

- L'infrastructure liée à l'hydrogène est estimée à plus de 920 k€ par site¹²⁴ ;
- Le coût annuel de l'infrastructure (capital, opération, maintenance) est estimé à 3 400 € par chariot ;
- Le coût de l'hydrogène est de 7,4 \$/kg. A noter que le prix décroît avec l'augmentation du volume. Le prix est aussi amené à être réduit grâce à la R&D.

D'autres études chiffrent le prix des stations à hydrogène à installer de l'ordre de 1 à 1,5 million d'euros (pour une capacité de ravitaillement d'environ 100 à 200 kg d'H₂ par jour)¹²⁵. En moyenne, le prix de vente de l'hydrogène en France varie entre 10 et 15 €/kg.

Cette solution n'est à ce jour pas rentable et ne peut pas espérer un retour sur investissement. En effet, le surcoût d'acquisition des engins, les coûts élevés des infrastructures à développer et le coût/rendement du combustible dépassent très largement les quelques économies liées à une maintenance moins coûteuse. Il faudra attendre plusieurs années et le développement de la filière pour espérer atteindre un retour sur investissement.

¹²³ [Technical and Economic Analysis of Fuel Cells for Forklift Applications | ACS Omega](#)

¹²⁴ Infrastructure : 1 M\$, coût annuel : 3 700 \$, coût H₂ : 8 \$/kg (conversion \$/€ au taux de change 0,92, nov 2023)

¹²⁵ [Vorstudie H2-Rangierlok Duisport_DLR final 20220323.pdf](#)

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins hydrogène (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Consommation d'hydrogène.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant à l'hydrogène ;
- Suivi de la consommation d'hydrogène.

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Les engins de manutention hydrogène sont des engins à propulsion électrique avec un moteur alimenté par une pile à combustible elle-même alimentée par l'hydrogène. L'essentiel de la R&D repose sur la PAC qui est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse. Du dihydrogène, H_2 à l'état gazeux, est contenu dans des bouteilles, faisant office de réservoir, dans le véhicule. L'énergie produite est stockée dans une batterie qui alimente directement le moteur électrique de l'engin.

Néanmoins, les technologies associées à l'hydrogène mobilité sont encore chères et les expérimentations et pré déploiements à venir nécessitent, comme toute technologie émergente, un soutien pour amorcer la demande en engins et accélérer l'industrialisation. Ce qui fait qu'économiquement, ces solutions ne présentent pas encore de retour sur investissement. Le surcoût à l'achat est dû au coût élevé, à l'heure actuelle, des piles à combustibles, mais aussi des réservoirs permettant de stocker l'hydrogène à bord de l'engin.

Actuellement, les engins de manutention verticale à hydrogène zéro émission pour assurer des opérations logistiques sur sites industriels ne sont pas disponibles. Cependant, quelques projets sont en cours pour concevoir et tester de tels engins, pour assurer des opérations logistiques sur sites industriels, tels que des portiques sur pneus par exemple¹²⁶.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La production d'1 kg d'hydrogène (équivalent à la consommation d'une voiture neuve standard pour parcourir 100 km¹²⁷), c'est-à-dire l'équivalent de 13,4 kWh, demande en réalité 58,7 kWh d'électricité initiale. Cela est dû aux nombreuses pertes présentes sur l'ensemble de la chaîne de production. Cependant, les nombreuses recherches autour de l'hydrogène font pressentir une grande marge d'amélioration sur ce rendement global.

Quant au bilan environnemental de la mobilité hydrogène, « du puits à la roue », il est complexe et va dépendre principalement de la nature de la source primaire (renouvelable versus fossile, pays de production) et de la distance d'acheminement entre la production de l'hydrogène et la station d'avitaillement. L'électrolyse à partir d'électricité bas-carbone permet d'obtenir une empreinte carbone allant de 0,5 à 3 kgCO₂e par kg d'hydrogène, tandis que les procédés issus d'énergie fossile peuvent monter jusqu'à environ 22 kgCO₂e par kg d'hydrogène dans le cas de la gazéification du charbon¹²⁸.

Par ailleurs, des solutions pour limiter l'emploi de certains métaux précieux doivent être étudiées et mises en place (recyclage, amélioration des technologies actuelles).

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention verticale.

¹²⁶ Développement de piles à combustible à hydrogène pour les RTG Transtainer® – PACECO CORP.

¹²⁷ Production d'hydrogène renouvelable : comment ça marche ? (engie.com)

¹²⁸ Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? (carbone4.com)

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale d'engins de manutention verticale hydrogène n'est pas encore développée. Il est conseillé de maintenir une veille technologique et de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur leurs développements en cours et futurs pour cette technologie hydrogène.

La faisabilité de cette solution est ainsi considérée comme faible du fait du manque de maturité de la solution et de la non-disponibilité de ces engins.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins hydrogène (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Consommation d'hydrogène.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant à l'hydrogène ;
- Suivi de la consommation d'hydrogène.

A2 FA 6 : Autres modes de propulsion

Synthèse

1. Description de l'action

Cette fiche centralise d'autres solutions ayant un impact sur l'efficacité énergétique ou la réduction des émissions de GES, en lien avec l'axe carburant, présentant un aspect innovant ou de niche. Cette fiche sera complétée au fur et à mesure des mises à jour de ce guide.

Autres actions quantitatives identifiées (en lien avec l'utilisation de carburants alternatifs) :

- Utilisation de HVO : carburant à base d'huiles végétales hydrotraitées, utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole) mais réservé aux flottes captives disposant de leurs propres capacités de stockage ; réduction des émissions de GES d'au moins 50 % du puits à la roue.
- Utilisation de B100 : carburant composé à 100 % d'Ester Méthylique d'Acides Gras (EMAG). Les Esters Méthylés d'Huile Végétale (EMHV) sont la principale forme d'EMAG utilisée (~94 %). En France, le carburant type B100 est issu à 100 % d'huile de colza.

Le B100 et le HVO ne peuvent être utilisés que pour des flottes captives disposant d'une logistique d'approvisionnement spécifique et de leurs propres capacités de stockage et de distribution. Il nécessite de passer un contrat avec un distributeur de carburant pour l'approvisionnement.

2. Domaine de pertinence

Cette action concerne tous les engins de manutention.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- Pour les engins de manutention horizontale ;
- Pour les engins de manutention verticale.

Pour chacune de ces fiches deux focus distincts sur le HVO et le B100 sont établis.

4. Contexte et réglementation

À la différence des carburants fossiles, les émissions de CO₂ issues de la combustion d'un biocarburant sont compensées par le CO₂ capté durant la croissance de la plante lors de la photosynthèse. Pour répondre aux critères de durabilité fixés par l'Union Européenne (directive 2009/28/CE), les biocarburants doivent justifier une réduction d'au moins 50 % de CO₂ sur l'ensemble du cycle du puits à la roue.

A noter deux discours divergents entre les fournisseurs de biocarburants qui se disent prêts (même s'ils alertent sur la limitation des volumes disponibles) et les constructeurs motoristes qui sont plus réservés et ne poussent pas forcément à l'utilisation de ces carburants.

Solution 1 : Manutention horizontale

1. Principes

Focus sur les engins de manutention HVO

Le HVO est un carburant à base d'huiles végétales hydrotraitées, utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole) mais réservé aux flottes captives disposant de leurs propres capacités de stockage.

Un avantage majeur du HVO est qu'il n'impose aucune modification de la motorisation des engins roulant au gazole, tout en garantissant une réduction des GES.

Focus sur les engins de manutention B100

Le B100 est un carburant composé à 100 % d'Ester Méthylique d'Acides Gras (EMAG). Les Esters Méthylés d'Huile Végétale (EMHV) sont la principale forme d'EMAG utilisée (~94 %). En France, le carburant type B100 est issu à 100 % d'huile de colza. Un avantage majeur du B100 est qu'il n'impose aucune modification de la motorisation des engins roulant au gazole, tout en garantissant une réduction des GES, mais est également réservé aux flottes captives.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Focus sur les engins de manutention HVO

Concernant les impacts sur les GES, de nombreux fournisseurs chiffrent la réduction de GES à 90 % grâce au HVO. D'après la base Empreinte de l'ADEME, la réduction GES est de 82 % par litre consommé en comparaison au gazole non routier¹²⁹. Sachant que pour les engins routiers, la surconsommation des engins HVO est estimée entre 5 et 10 %¹³⁰ par rapport à un diesel traditionnel. Des surconsommations similaires seront attendues sur des engins de manutention.

Cette solution a aussi un impact sur les émissions de polluants, pour des engins routiers, des tests réalisés ont montré une réduction de 12 % pour les PM, 32 % pour les HC, 16 % pour les CO et 22 % pour les NOx.¹³¹

Des reachstackers au HVO sont disponibles et permettent de réduire les émissions de plus de 90 %. En combinant cette solution avec un véhicule neuf, les réductions attendues atteignent 94 % par rapport à un vieil engin¹³².

Concernant les chariots élévateurs, certains engins diesel sont compatibles au HVO et permettent une utilisation immédiate. Les réductions de GES sont supérieures à 90 %¹³³.

Les tracteurs de terminaux possèdent des moteurs certifiés pour utiliser du HVO. De nombreux engins neufs sont aussi compatibles au HVO¹³⁴.

Focus sur les engins de manutention B100

Pour les véhicules routiers, l'autonomie et la consommation d'un véhicule fonctionnant au B100 sont sensiblement équivalentes à celle d'un véhicule fonctionnant au gazole (de 0 à +5 % d'écart en fonction du type de voirie¹³⁵). En première approximation, on peut considérer que le différentiel de contenu énergétique sera identique pour les engins de manutention.

¹²⁹ Base Empreinte® (ademe.fr)

¹³⁰ Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? (autoplus.fr)

¹³¹ brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf (totalenergies.fr)

¹³² 216562_Kalmar-Eco-Reachstacker-brochure.pdf (kalmarglobal.com)

¹³³ Equipment | Konecranes Lift trucks (kcliftrucks.com)

¹³⁴ Kalmar Eco Heavy Terminal Tractor, RoRo Tractor, Shunt Truck or Yard Truck | Kalmarglobal

¹³⁵ Les énergies disponibles | Kit Environnement (terre-tlf.fr) . Périmètre : véhicules routiers

Concernant les impacts sur les GES, la réduction attendue est de 60 % en comparaison au gazole fossile¹³⁶. Cette solution a aussi un impact sur les émissions de polluants, cependant les résultats divergent et ne sont pas tous positifs. La réduction est de 85 % pour les PM, 54% pour les HC, 40 % pour les CO, cependant il y a une augmentation moyenne de 18 % pour les NOx¹³⁷. De plus, les coûts d'exploitation sont encore supérieurs à ceux d'un véhicule diesel.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

Focus sur les engins de manutention HVO

Pour les engins de manutention, plusieurs fournisseurs proposent déjà des engins compatibles au HVO. C'est le cas notamment pour les reachstackers, des chariots élévateurs et des tracteurs de terminaux. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de cette solution et de la possibilité d'utiliser ce carburant sur leur engin.

Un engin plus ancien peut aussi se faire certifier HVO pour une utilisation rapide de ce carburant. Il est conseillé de se rapprocher de votre fournisseur pour connaître la comptabilité de l'engin ou si une mise à niveau est nécessaire.

Cependant, le développement à grande échelle semble compliqué pour le moment compte tenu du coût actuel du carburant et de sa disponibilité. Le coût peut baisser à l'avenir mais sa fabrication semble tout de même compliquée¹³⁸. De plus, l'investissement nécessaire pour l'installation d'une station d'approvisionnement augmente considérablement le coût de cette solution.

Focus sur les engins de manutention B100

L'offre commerciale d'engins de manutention horizontale B100 n'est pas encore développée. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur le développement de leur offre.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins HVO/B100 (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Consommation HVO/B100.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au HVO/B100 ;
- Suivi de la consommation de HVO/B100.

¹³⁶ Base Empreinte® (ademe.fr)

¹³⁷ brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf (totalenergies.fr)

¹³⁸ Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? (autoplus.fr)

Solution 2 : Manutention verticale

1. Principes

Focus sur les engins de manutention HVO

Le HVO est un carburant à base d'huiles végétales hydrotraitées, utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole) mais réservé aux flottes captives disposant de leurs propres capacités de stockage.

Un avantage majeur du HVO est qu'il n'impose aucune modification de la motorisation des engins roulant au gazole, tout en garantissant une réduction des GES.

Focus sur les engins de manutention B100

Le B100 est un carburant composé à 100 % d'Ester Méthylique d'Acides Gras (EMAG). Les Esters Méthylés d'Huile Végétale (EMHV) sont la principale forme d'EMAG utilisée (~94 %). En France, le carburant type B100 est issu à 100 % d'huile de colza. Un avantage majeur du B100 est qu'il n'impose aucune modification de la motorisation des engins roulant au gazole, tout en garantissant une réduction des GES, mais est également réservé aux flottes captives.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Focus sur les engins de manutention HVO

Concernant les impacts sur les GES, de nombreux fournisseurs chiffrent la réduction de GES à 90 % grâce au HVO. D'après la base Empreinte de l'ADEME, la réduction GES est de 82 % par litre consommé en comparaison au gazole non routier¹³⁹. Sachant que pour les engins routiers, la surconsommation des engins HVO est estimée entre 5 et 10 %¹⁴⁰ par rapport à un diesel traditionnel. Des surconsommations similaires seront attendues sur des engins de manutention.

Cette solution a aussi un impact sur les émissions de polluants, pour des engins routiers, des tests réalisés ont montré une réduction de 12 % pour les PM, 32 % pour les HC, 16 % pour les CO et 22 % pour les NOx.¹⁴¹

Certains projets de développement voient le jour. Un constructeur¹⁴² propose déjà des engins de manutention au HVO mais particulièrement dans les domaines de la construction et des infrastructures portuaires (des grues mobiles et sur chenilles au HVO). Il annonce une réduction jusqu'à 90 % des GES.

Focus sur les engins de manutention B100

Concernant les impacts sur les GES, la réduction attendue est de 60 % en comparaison au gazole fossile¹⁴³. Cette solution a aussi un impact sur les émissions de polluants atmosphériques. Cependant les résultats divergent et ne sont pas tous positifs. La réduction est de 85 % pour les PM, 54 % pour les HC, 40 % pour les CO, cependant il y a une augmentation moyenne de 18 % pour les NOx.¹⁴⁴. De plus, les coûts d'exploitation sont encore supérieurs à ceux d'un véhicule diesel.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention verticale.

¹³⁹ Base Empreinte® (ademe.fr)

¹⁴⁰ Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? (autoplus.fr)

¹⁴¹ brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf (totalenergies.fr)

¹⁴² Liebherr

¹⁴³ Base Empreinte® (ademe.fr)

¹⁴⁴ brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf (totalenergies.fr)

4. Mise en œuvre

Focus sur les engins de manutention HVO

Les engins de manutention verticale au HVO sont très peu développés pour l'instant en France. Leur commercialisation à grande échelle n'est pas envisagée pour le moment compte tenu du coût actuel du carburant, de sa disponibilité et de l'absence de gains énergétiques. Le coût peut baisser à l'avenir mais sa fabrication semble tout de même compliquée¹⁴⁵.

Cependant, certains projets de développement voient le jour, c'est pourquoi il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de cette solution et de la possibilité d'utiliser ce carburant sur leurs engins.

Un engin plus ancien peut aussi se faire certifier HVO pour une utilisation rapide de ce carburant. Il est conseillé de se rapprocher de votre fournisseur pour connaître la comptabilité de l'engin ou si une mise à niveau mineure est nécessaire.

Focus sur les engins de manutention B100

L'offre commerciale d'engins de manutention horizontale B100 n'est pas encore développée. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur le développement futur de leur offre.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins HVO/B100 (en absolu et en relatif) dans le parc ;
- Consommation HVO/B100.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au HVO/B100 ;
- Suivi de la consommation de HVO/B100.

¹⁴⁵ Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? (autoplus.fr)

A2 FA 7 : Collecte des consommations

Synthèse

1. Description de l'action

La capacité de mesurer et de suivre de manière précise la consommation de carburant (par engin voire par conducteur) est un prérequis pour permettre ensuite à l'opérateur d'établir un point de départ (cf. A2 FA 8) et de se fixer un objectif de réduction concret et réalisable, ainsi que de mettre en place des actions ciblées (« ce qui peut être mesuré peut être amélioré »).

2. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les engins de manutention.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la collecte des consommations (les modalités de cette action sont identiques pour la manutention horizontale et la manutention verticale).

4. Contexte et réglementation

Le suivi des consommations est un prérequis à la fois pour le choix d'actions correctrices et pour le suivi de l'impact de toute action mise en place.

Le poste carburant demande une attention croissante du fait de la pression économique et de l'augmentation du prix des carburants, qui devrait malheureusement se poursuivre dans les années à venir.

Une bonne gestion des consommations de carburant, dans un premier temps à travers la collecte fiable de ces consommations, permet donc d'augmenter de manière significative la compétitivité.

Cette action est à relier à la plupart des autres actions de ce guide, en particulier la fiche A4 FA 1 « formation éco-conduite » où le suivi précis de la consommation des conducteurs permettra d'identifier ceux qui auront prioritairement besoin de suivre une formation.

Solution 1 : Collecte des consommations

1. Principes

Les différents processus de remontée d'information dépendent du mode de propulsion de l'engin.

Pour un mode de propulsion électrique, la collecte de l'information peut dépendre du propriétaire du parc (compteur sur l'engin) ou du fournisseur d'électricité (facture d'électricité). Pour les autres modes de propulsion, la collecte des données est liée soit à l'opérateur soit aux propriétaires d'installations de ravitaillement en carburant.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La collecte de l'information n'a pas d'impact direct en termes de gain de consommation de carburant. Il est néanmoins constaté chez la majorité des transporteurs que lorsque les conducteurs savent que la consommation est suivie engin par engin, cela suffit en général à faire baisser les consommations (au moins temporairement). La mise en place d'outils de gestion de la consommation est un premier pas vers la diminution de ces dernières, et donc vers un gain en émissions de GES.

En outre, pour l'opérateur, la connaissance fine des consommations par conducteur et/ou par engin constitue un préalable à la mise en place de toute mesure d'optimisation (éco-conduite, système de bonus/malus...).

3. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les engins de manutentions horizontale.

4. Mise en œuvre

Pour les engins au mode de propulsion non électrique (diesel, hydrogène, HVO, GNV, etc.), le ravitaillement en carburant se fait de deux façons :

- Par installation fixe, où le ravitaillement est réalisé depuis un réservoir fixe de stockage de carburant ;
- En bord à bord avec un camion-citerne ravitailleur.

Un système de collecte de données est alors envisageable. Les différents processus de remontée d'information pour les engins au mode de propulsion non électrique sont les suivants, du plus simple au plus sophistiqué :

	Méthode	Avantages	Inconvénients	Niveau d'incertitude
1	Communication des volumes par ceux qui remplissent les engins à chaque apport de carburant	Investissement quasi-nul	Peu fiable Nécessite la mise en place d'un système de vérification	20 %
2	Suivi informatique des consommations internes (cas de cuves de carburants internes à l'entreprise)	Automatisation du processus	Pertinent uniquement pour les pleins réalisés en interne	7 %
3	Télématique embarquée	Permet la transmission directe des consommations Peut intégrer des modules complémentaires : paramètres de conduite, positionnement de l'engin, ...	Coût Peut nécessiter une formation par les fournisseurs de solution pour accompagner les conducteurs dans l'utilisation	5 %

Chaque méthode requiert une mise en œuvre différente :

- **Méthode 1 « via remplisseurs »** : pour mettre en œuvre la méthode 1, il faut demander à toutes les personnes responsables de remplir les engins de noter à chaque plein effectué les données relatives aux volumes de carburant ;
- **Méthode 2 « via informatique cuves internes »** : les cuves de carburant doivent être équipées de capteurs permettant un relevé des volumes prélevés ;
- **Méthode 3 « via informatique embarquée »** : cette méthode nécessite un investissement plus important. Elle inclut parfois des fonctionnalités supplémentaires permettant une optimisation globale de la gestion du parc (exemple : géolocalisation, gestion des temps de conduite, etc.).

Les différents processus de remontée d'information pour les engins en mode de propulsion électrique sont les suivants, du plus simple au plus sophistiqué :

	Méthode	Acteurs engagé	Avantages	Inconvénients	Niveau d'incertitude
1	Récupération de la facture d'électricité du fournisseur et des €/kWh	Fournisseur d'électricité	Investissement quasi-nul	Peu utilisable Pas d'estimation par rapport à chaque conducteur	–
2	Communication des kWh par ceux qui rechargent les engins à chaque charge	Utilisateurs et chargeurs d'engins	Investissement quasi-nul	Peu fiable Nécessite la mise en place d'un système de vérification	20 %
3	Télématique embarquée	Propriétaire flotte	Automatisation du processus Permet la transmission directe des consommations	Coût	5 %

Chaque méthode requiert une mise en œuvre différente :

- **Méthode 1 « via les fournisseurs d'électricité »** : pour mettre en œuvre la méthode 1, il faut demander aux fournisseurs d'électricité de fournir la facture d'électricité, pour remonter, à travers des €/kWh, à la consommation énergétique du parc ;
- **Méthode 2 « via les rechargeurs »** : pour mettre en œuvre la méthode 2, il faut demander à toutes les personnes responsables de recharger les engins de noter à chaque plein effectué les données relatives aux kWh rechargés ;
- **Méthode 3 « via télématique embarquée »** : cette méthode nécessite un investissement plus important. Elle inclut parfois des fonctionnalités supplémentaires permettant une optimisation globale de la gestion de flotte (exemple : date et heure, gestion des temps de conduite, vitesse instantanée au moment de la mesure, les grandeurs d'énergie échangée pendant les cinq dernières minutes, etc.).

A ces fichiers doivent être ajoutées des données relatives à l'engin : caractéristiques techniques, types de marchandises déplacées, nombres de conteneurs déplacés (TEU), tonnage tracté, distance parcourue à vide/heures à vide, distance parcourue/heures de fonctionnement au cours de sa mission. Ces informations permettront d'obtenir les kWh/km(ou h) et l/km(ou h) en fonction des utilisations (et des engins, des conducteurs et des types d'opérations). Il sera ainsi possible de calculer des kWh/TEU et l/TEU.

Cette solution ne présente pas de gain de carburant direct et ne peut donc pas être associée à un temps de retour sur investissement. Quelle que soit la méthode de suivi choisie, un certain nombre de personnes devront être mobilisées, la faisabilité de cette solution est donc intermédiaire.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Recenser la (ou les) méthode(s) de suivi utilisée(s) (méthodes n°1 à 3 ci-avant) ainsi que le niveau de précision estimé (exprimé en pourcentage).

A2 FA 8 : Analyse des consommations

Synthèse

1. Description de l'action

Une fois la consommation de carburant ou d'électricité (par engin voire par conducteur) mesurée et suivie précisément (cf. A2 FA 7), l'opérateur peut alors définir un état de lieux initial et se fixer un objectif de réduction concret et réaliste, et mettre en place des actions ciblées (« ce qui peut être mesuré peut être amélioré »).

2. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les engins de manutention.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : l'analyse des consommations (les modalités de cette action sont identiques pour la manutention horizontale et la manutention verticale).

4. Contexte et réglementation

Le suivi des consommations est un prérequis à la fois pour le choix d'actions correctrices et pour le suivi de l'impact de toute action mise en place.

Le poste carburant demande une attention croissante du fait de la pression économique et de l'augmentation du prix des carburants, qui devrait malheureusement se poursuivre dans les années à venir.

Une bonne gestion des consommations de carburant, à travers leur analyse précise, permet donc d'augmenter de manière significative la compétitivité.

Cette action est à relier à la plupart des autres actions de ce guide, en particulier la fiche A4 FA 1 « formation éco-conduite » où le suivi précis de la consommation des conducteurs permettra d'identifier ceux qui auront prioritairement besoin de suivre une formation.

Solution 1 : Analyse des consommations

1. Principes

On distingue 3 niveaux de gestion qui permettront de comprendre plus ou moins finement les consommations de carburant ou d'électricité observées :

- **Niveau minimal** : analyser les données de consommation en l/h ou kWh et les comparer aux consommations standard ;
- **Niveau intermédiaire** : caractériser les déplacements (vitesse moyenne, type de déplacement, type de conteneurs déplacés, tonnage déplacé), détailler les données de consommation par principaux types d'engins puis les analyser ;
- **Niveau maximal** : prendre en compte tous les paramètres de conduite (vitesse, utilisation du régime et couple, utilisation du ralenti et des freins, etc.) mais aussi des paramètres exogènes qui relèvent de l'engin et/ou des conditions de son utilisation opérationnelles (poids à vide, type d'activité de transport, etc.).

Réaliser une estimation des données de consommation en l/h, kWh, l/TEU, kWh/TEU, l/t ou kWh/t.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

De même que pour la solution collecte de l'information, il n'y a pas d'impact direct, mais l'analyse détaillée des consommations permettra d'identifier des gains potentiels et de sélectionner les actions les plus pertinentes.

Les analyses de consommation peuvent également permettre l'établissement de programmes de formations personnalisés adaptés à chaque conducteur en fonction de ses performances.

3. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous types d'engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

La mise en place d'un système de reporting et d'analyse des consommations nécessite un investissement significatif en temps et éventuellement l'intervention de ressources dédiées. L'opérateur peut faire progresser son analyse en suivant les trois niveaux décrits dans la rubrique 1 « Principes ».

Cette gradation permettra de comprendre dans le détail les paramètres influençant la consommation et leur poids relatif. L'investissement en temps est étroitement lié à la taille du parc et à la diversité des activités de l'opérateur. A titre indicatif, pour le fret routier, un équivalent temps plein peut se justifier à partir d'une flotte de 100 véhicules lorsque l'on souhaite un niveau de gestion maximal.

Cette solution ne présente pas de gain énergétique direct et ne peut donc pas être associée à un temps de retour sur investissement. Elle nécessite des changements organisationnels puisque des ressources doivent consacrer du temps au traitement des informations : sa faisabilité peut être considérée comme intermédiaire.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Indiquer le niveau de gestion de l'information (niveau 1, 2 ou 3).

Axe 3 : Organisation des flux

A3 FA 1 : Optimisation des opérations.....	83
Solution 1 : Planning manuel.....	85
Solution 2 : Terminal Operating System.....	86
A3 FA 2 : Automatisation et digitalisation des engins.....	88
Solution 1 : Automatisation et digitalisation des engins de manutention.....	90

A3 FA 1 : Optimisation des opérations

Synthèse

1. Description de l'action

L'optimisation des opérations d'un terminal passe par la mise en place d'un système d'exploitation des terminaux. Ces derniers peuvent être de deux niveaux, soit un véritable TOS (Terminal Operating System), principalement utilisé pour les terminaux à conteneurs, soit une version moins intégrée, à l'aide d'un planning « manuel » par exemple, pour les terminaux conventionnels.

L'objectif principal de l'utilisation de ces systèmes est de réduire les coûts tout en augmentant la productivité, donc en réduisant les consommations énergétiques.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à tous les types de terminaux : portuaires, intermodaux, ferroviaires et fluviaux.

3. Solutions associées

Cette solution est déployée en deux fiches :

- La version planning manuel ;
- La version TOS.

Les engins de manutention horizontale et/ou verticale ne sont pas dissociés car cette action doit s'envisager dans la globalité du terminal pour être pertinente.

4. Contexte et réglementation

Les systèmes d'exploitation des terminaux (ou TOS, Terminal Operating System) sont des programmes spécialisés utilisés pour gérer et contrôler le flux de marchandises dans les terminaux portuaires, les parcs intermodaux, les terminaux ferroviaires et les stations de fret de conteneurs. Ils sont conçus pour automatiser le processus de chargement et de déchargement des navires, des conteneurs, des camions, des trains, des barges et d'autres méthodes de transport.

Ces systèmes d'exploitation des terminaux offrent une gamme complète de fonctions, notamment la planification de l'accostage des navires, la gestion et l'exploitation des parcs, ainsi que les opérations d'entrée et de sortie des camions et des conteneurs. Ils offrent des analyses avancées qui permettent aux opérateurs de mieux comprendre leurs opérations afin d'en optimiser l'efficacité. Il n'est pas nécessaire que les engins soient totalement automatisés et digitalisés, c'est-à-dire sans conducteur, pour mettre en place un TOS sur le terminal.

L'objectif principal de l'utilisation d'un TOS est de réduire les coûts tout en augmentant la productivité grâce à l'amélioration de la précision des informations, de la visibilité et du contrôle de tous les aspects de la gestion du terminal. En plus de la réduction des coûts, une optimisation de la gestion d'un terminal permet de réduire les consommations énergétiques à productivité équivalente. Les engins de

manutention horizontale parcourent moins de distance à vide ou à charge moyenne et les engins de manutention verticale minimisent aussi leur consommation grâce à un flux optimisé.

Cette solution améliore aussi la satisfaction des clients grâce à des temps de traitement plus rapides et à une réduction des retards dus à des erreurs humaines ou à une mauvaise gestion.

Solution 1 : Planning manuel

1. Principes

L'optimisation des opérations d'un terminal passe par la mise en place d'un système d'exploitation des mouvements des engins. Un premier niveau d'optimisation consiste en un planning manuel afin de positionner au mieux les engins pour minimiser leur distance à parcourir entre deux zones de travail (entre le matin et l'après-midi par exemple) en évitant ainsi des déplacements « à vide » sur le site et donc en réduisant leur consommation.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les gains énergétiques, et donc de réduction des émissions de GES, ne sont pas quantifiables a priori. Ils dépendront des possibilités d'optimisation des trajets des engins : en fonction du type de marchandises manutentionnées, de la distance entre les zones de chargement/déchargement et du positionnement initial des engins.

3. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à tous les types de terminaux : portuaires, intermodaux, ferroviaires et fluviaux mais reste plus adaptée pour les terminaux conventionnels que pour les terminaux à conteneurs pour lesquels une optimisation plus poussée semble importante vu les quantités en jeu.

4. Mise en œuvre

L'optimisation se fera au cas par cas, en essayant de rapprocher les déploiements de chaque engin avec une route optimale pour le repositionner sur chaque opération de chargement/déchargement.

Une réflexion sur le transfert des manutentionnaires avec des véhicules de service (motorisés ou non) plutôt que le déplacement des engins de manutention est également à mener.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Présence d'un planning d'optimisation ;
- Nombre d'opérations optimisées.

Solution 2 : Terminal Operating System

1. Principes

Les systèmes d'exploitation des terminaux (TOS) sont essentiels pour gérer efficacement les opérations des grands terminaux. Ils sont conçus pour déployer une plateforme uniforme pour l'ensemble du personnel impliqué dans la gestion des opérations quotidiennes, ce qui leur permet de visualiser, d'analyser et de répondre rapidement à leurs tâches respectives. Cela améliore la communication entre les parties prenantes tout en réduisant considérablement les coûts d'exploitation grâce à la rationalisation des processus et à l'automatisation accrue. Des gains énergétiques sont aussi attendus grâce aux systèmes d'exploitation des terminaux. En effet, l'optimisation des opérations permet par exemple de réduire les kilomètres effectués par les engins en localisant ceux les plus proches du chargement à faire et donc de réduire leur consommation en évitant des déplacements « à vide » sur le site.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les fournisseurs de systèmes d'exploitation de terminaux chiffrent les gains de productivité et d'augmentation des performances pour les terminaux mais ne chiffrent pas directement les gains énergétiques. En effet, ils dépendent de nombreux facteurs propres au terminal. Pour obtenir les gains énergétiques attendus avec cette solution il est recommandé de se rapprocher des fournisseurs qui pourront estimer ces gains en fonction du terminal.

3. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à tous les types de terminaux : portuaires, intermodaux, ferroviaires et fluviaux, mais est particulièrement pertinente dès lors que les flux à traiter sont importants (en particulier pour les conteneurs).

4. Mise en œuvre

Une vingtaine de fournisseurs de systèmes d'exploitation de terminaux existent sur le marché¹⁴⁶. Il est conseillé de se rapprocher de ces fournisseurs qui proposent des systèmes différents.

En fonction des fournisseurs, les prix diffèrent. Certains facturent le service par tonne, d'autres par mois. De façon générale les prix varieront en fonction de la taille du terminal et de son parc, de la complexité du projet mais aussi d'autres facteurs : les exigences d'intégration du système, les composants matériels, les services requis. Au total les prix vont de quelques dizaines de milliers à des centaines de milliers d'euros. Il existe aussi des abonnements au mois. Des coûts de mise en œuvre et de formation des employés pour favoriser l'utilisation efficace du système sont aussi à prévoir. De plus, des frais de maintenance doivent également être pris en compte dans l'estimation du coût total.

L'investissement est important mais la réduction des coûts qui en découle permet d'obtenir un retour sur investissement. En effet, les terminaux maritimes peuvent réduire leurs coûts d'exploitation de 20 % grâce aux outils de gestion de terminaux¹⁴⁷. D'autres études et estimations sont encore plus optimistes quant à la réduction des coûts, une étude annonce que l'automatisation devrait permettre

¹⁴⁶ [Système d'exploitation des terminaux — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_d%27exploitation_des_terminaux)

¹⁴⁷ Tideworks Technology | Terminal Operating Systems

de réduire les dépenses d'exploitation de 25 à 55 % et d'augmenter la productivité de 10 à 35 %, ce qui correspond aux estimations d'un fournisseur de TOS¹⁴⁸.

Certains exemples, comme un terminal de vrac au Chili, ont démontré un potentiel d'augmentation des performances de plus de 40 %¹⁴⁹.

La mise en place dépendra du système choisi. En général il est possible de demander une version gratuite de démonstration de plusieurs jours.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Présence d'un système d'exploitation des terminaux.
- Nombre d'opérations optimisées

¹⁴⁸ [How Terminals Can Stay Competitive in 2023 \(tideworks.com\)](https://www.tideworks.com), Enquête McKinsey

¹⁴⁹ [Terminal Graneles del Norte S.A., Port Angamos, Chile | TBA Group](https://www.tba-group.com)

A3 FA 2 : Automatisation et digitalisation des engins

Synthèse

1. Description de l'action

L'automatisation et la digitalisation des engins consistent à permettre aux engins de fonctionner sans personnel. Les engins sont automatisables individuellement et à l'avenir des objectifs de terminaux 100 % automatisés sont envisageables. Cependant, l'automatisation complète n'est pas nécessaire pour commencer à améliorer la productivité du terminal. Une automatisation par étape est possible pour aller vers l'automatisation des engins voire du terminal.

Les terminaux digitalisés pourront être équipés d'un système d'exploitation du terminal (A3 FA1) afin d'optimiser leur productivité et les opérations des engins.

2. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les engins de manutention.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : l'automatisation et la digitalisation des engins, quel que soit le type de manutention.

4. Contexte et réglementation

Initié dans les ports dès 1993, la mise en œuvre de systèmes automatisés pour déplacer les conteneurs des grues de quai à la pile de conteneurs gagne du terrain. Le rapport 2021 de l'ITF¹⁵⁰ précise néanmoins que les terminaux entièrement automatisés n'existent pas encore : « 53 terminaux sont automatisés à différents degrés », ce qui correspond à 4 % de l'ensemble des terminaux conteneurisés dans le monde et quelques terminaux semblent très proches de l'automatisation totale, (~90 % d'automatisation). Cependant, il est beaucoup plus courant de trouver une automatisation partielle ou semi-automatique des ports dans toute l'Asie et l'Europe, les opérateurs cherchant à trouver un compromis entre l'augmentation de la rentabilité, l'augmentation de la productivité et la réduction des temps d'arrêt avec le coût global de la mise en œuvre.

Au cours de la dernière décennie, les opérateurs portuaires ont compris que l'automatisation des processus présentait de nombreux avantages et la majorité d'entre eux adoptent l'automatisation lorsqu'ils le peuvent.

Les avantages vont de la réduction des coûts d'exploitation à long terme à l'amélioration de la productivité, en passant par la réduction de la consommation de carburant et donc des émissions de GES.

¹⁵⁰ L'automatisation des terminaux à conteneurs a des effets limités (portsetcorridors.com)

L'installation rapide de l'automatisation est très attrayante, surtout avec les améliorations de la sécurité collatérale qu'elle apporte, et incite les exploitants de terminaux à moderniser leurs installations.

La question clé que doivent se poser les exploitants de terminaux portuaires est de savoir à quel niveau le retour sur investissement se justifie pour leurs opérations. Cette question est directement liée à l'amélioration de l'exploitation durable¹⁵¹.

¹⁵¹ Port automation: The route to the future - Port Technology International

Solution 1 : Automatisation et digitalisation des engins de manutention

1. Principes

L'automatisation et la digitalisation des engins consistent à faire fonctionner l'engin de manutention sans personnel. Les engins sont automatisables individuellement et selon des degrés d'automatisation différents. Pour se diriger vers cette automatisation des engins, une automatisation par étape est possible.

Quant à l'automatisation dans les terminaux portuaires, elle reste aujourd'hui dans des proportions faibles comparativement aux nombres de terminaux qui existent en Europe. L'automatisation presque totale, à savoir 90 % des opérations portuaires, n'existe aujourd'hui que sur des terminaux comme celui d'Altenwerder à Hambourg ou de APM Terminals à Rotterdam (même si plusieurs autres terminaux sont partiellement automatisés¹⁵²).

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les fournisseurs de Systèmes d'automatisation et de digitalisation des engins de terminaux chiffrent les gains de productivité et d'augmentation des performances pour les terminaux mais ne chiffrent pas directement les gains énergétiques. En effet, ils dépendent de nombreux facteurs propres aux engins et au fonctionnement du terminal. Pour obtenir les gains énergétiques attendus avec cette solution il est recommandé de se rapprocher des fournisseurs qui pourront estimer ces gains en fonction du terminal.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

L'automatisation des terminaux peut avoir lieu quel que soit l'état du parc : de 100 % manuelle, à un mix d'équipements automatisés et d'autres non. Il est possible d'automatiser n'importe quel engin déjà existant du parc, de n'importe quelle marque, sans nécessité d'attendre l'achat d'un engin neuf.

Les différentes étapes pour l'automatisation, avec des différents degrés d'automatisation sont les suivantes :

- La première étape vers l'automatisation passe par une mise à niveau du système d'entraînement et de contrôle qui est essentielle pour préparer les anciens engins à l'automatisation.
- La deuxième étape consiste à l'ajout de fonctionnalités intelligentes, par exemple des capteurs, laser, DGPS¹⁵³ ou une combinaison de plusieurs technologies afin de créer un environnement d'assistance performant à l'opérateur.

Il existe de nombreuses mises à niveau à faire pour permettre l'automatisation. Par exemple pour un portique sur pneus : la mise à niveau de la direction automatique, mise à niveau TOS permettant les comptages des mouvements, le guidage automatique des camions pour une

¹⁵² SITL 2021: digitalisation et automatisation portuaire (portsetcorridors.com)

¹⁵³ GPS Différentiel

manutention plus rapide et une plus grande sécurité, la mise à niveau du calcul de trajectoire optimale, positionnement automatique.

- La troisième étape est le début des opérations supervisées. L'engin devient semi-automatisée grâce aux étapes précédentes. L'opérateur, qui peut être encore en cabine ou dans une station proche, est désormais assisté par l'ensemble des fonctionnalités intelligentes. Les engins sont exploités à l'aide d'un concept de station de commande à distance, ce qui entraîne des gains de productivité significatifs et une augmentation de la sécurité.
- La quatrième et dernière étape est l'automatisation complète. Avec l'ajout d'une technologie d'automatisation.

Concernant la productivité, les retours d'expérience varient. Les premières estimations s'attendent à ce que l'automatisation permette de réduire les dépenses d'exploitation de 25 à 50 % et d'augmenter la productivité de 30 %. Cependant, une étude de McKinsey réalisée en 2017 indique que la productivité des ports automatisés est inférieure de 7 à 15 % par rapport à celle des ports non automatisés. Selon la même étude, pour justifier les investissements élevés liés à l'automatisation des ports, les dépenses d'exploitation d'un terminal automatisé devraient être inférieures de 25 % à celles d'un terminal conventionnel, où la productivité devrait augmenter de 30 % si les dépenses d'exploitation ne baissent que de 10 %¹⁵⁴.

Économiquement, l'automatisation des engins de manutention et des terminaux à conteneurs se traduit généralement par une baisse des coûts de main-d'œuvre qualifiée (amis une hausse des coûts de main d'œuvre d'ingénierie) et une hausse des coûts d'investissement. En effet, les équipements automatisés sont plus coûteux que les équipements manuels. La baisse générale des coûts de manutention dépend en grande partie des coûts locaux de main-d'œuvre et de la réduction des temps de main d'œuvre. Plus les coûts locaux de main-d'œuvre sont élevés, plus les économies potentielles liées à l'automatisation sont importantes, à condition que l'automatisation remplace effectivement les travailleurs (indépendamment de l'aspect social).

Bien que les opérateurs de terminaux puissent réaliser des réductions des coûts de manutention, les chiffres prévus par les fournisseurs correspondent rarement à la réalité des cas pratiques. Un fabricant a annoncé une réduction de 45 à 55 % du temps de travail par grue grâce à l'automatisation, alors qu'une étude a montré que les économies de coûts de main-d'œuvre sont en réalité de 33 %.

De plus, l'investissement initial est important. Pour le terminal à conteneurs de Dunkerque, une estimation de l'automatisation partielle a montré un investissement de 30 M€ et 40 M€ pour un terminal qui réalise environ 500 000 à 700 000 TEU/an.

En général, pour les systèmes automatisés, les périodes d'amortissement sont de quatre à cinq ans¹⁵⁵.

A noter cependant la problématique de l'acceptabilité sociale de ce genre de solutions, qui peuvent être le sujet de vives tensions syndicales.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre d'engins automatisés (en absolu et en relatif) dans le parc.

¹⁵⁴ Container Port Automation: Impacts and Implications (itf-oecd.org)

¹⁵⁵ eureka magazine: Automatisation des entrepôts – étude des choix | Cat® Lift Trucks EAME (catliftruck.com)

Axe 4 : Information / Sensibilisation

A4 FA 1 : Formation éco-conduite.....	93
Solution 1 : Formation éco-conduite.....	94

A4 FA 1 : Formation éco-conduite

Synthèse

1. Description de l'action

L'objectif principal d'un programme d'éco-conduite est de modifier les comportements des conducteurs afin qu'ils adoptent de manière pérenne une conduite économe en carburant.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des conducteurs d'engins de manutention.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la formation à l'éco-conduite (les modalités de cette action sont identiques pour la manutention horizontale et la manutention verticale).

4. Contexte et réglementation

Si la réglementation française n'impose pas, à proprement parler, de formations à l'éco-conduite, ces notions sont en partie incluses au sein des formations initiales au métier, mais dans un format non adapté aux spécificités de chaque entreprise, d'où l'importance de ces formations spécifiques.

Solution 1 : Formation éco-conduite

1. Principes

L'objectif d'un programme d'éco-conduite est de modifier les comportements des conducteurs afin qu'ils adoptent de manière pérenne une conduite économe en énergie.

Les formateurs internes ou externes à l'entreprise accompagnent, conseillent les conducteurs et analysent leur façon de conduire afin de les accompagner à adopter une conduite raisonnée.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Selon les équipements et les façons de conduire, des surconsommations importantes peuvent apparaître. Par exemple dans le cas des chariots, ces surconsommations peuvent atteindre jusqu'à 35 %¹⁵⁶. Former les conducteurs aux gestes d'éco-conduite peut ainsi générer des gains de consommations.

De façon générale pour les camions poids-lourds, des études ont démontré qu'une formation à l'éco-conduite permettrait de réduire de 5 à 25 % la consommation de carburant¹⁵⁷. Cependant, les gains s'estompent quasi complètement (jusqu'à 80 %) dans l'année qui suit la formation si aucune autre mesure complémentaire n'est prise (formation de rappel ou mise en place de management interne spécifique à l'éco-conduite). C'est pourquoi il est important de déterminer un plan d'action sur le long terme en choisissant un niveau de formation à l'éco-conduite.

Trois niveaux de formation à l'éco-conduite peuvent être isolés, avec chacun un impact différent sur la réduction pérenne des consommations énergétiques :

- Première formation à l'éco-conduite : impact faible (30 % de l'impact fort)
- Formations régulières à l'éco-conduite : impact moyen (60 % de l'impact fort)
- Système de management de la performance éco-conduite : impact fort (100 % de la réduction)

Ainsi un gain moyen de l'ordre de 10 % (= 35 % * 30 %) peut être retenu en première hypothèse de gain.

3. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des conducteurs d'engins de manutention horizontale.

4. Mise en œuvre

Des formations existent pour le secteur du transport routier qui sont aussi compatibles avec les conducteurs d'engins de manutention (mais pas forcément adaptées aux spécificités et contraintes des secteurs ferroviaire et portuaire). Les premières formations durent en général 7 à 14 heures par conducteurs, réparties en 3 séquences, entre enseignement théorique et enseignements pratiques (et adaptables en fonction des contraintes d'exploitation de l'entreprise).

L'objectif de ces formations est d'adopter une conduite rationnelle et économique et d'adapter ce comportement à un contexte exigeant pour une sécurité optimale.

¹⁵⁶ Économie d'énergie : comment réduire la consommation de ses chariots élévateurs ? | Blog de la manutention (blog-manutention.fr)

¹⁵⁷ Formation Eco-conduite poids lourd | ECF PRO

Avant une première formation, il est recommandé d'établir au préalable un état des consommations. Cet état initial permettra de définir un objectif de consommation avec le conducteur.

Différentes thématiques sont abordées au cours de ces formations¹⁵⁸ :

- Travail en salle avec présentation de l'action de formation et du travail pédagogique sur le principe de la conduite économique. Dans cette partie, il peut notamment y avoir la diffusion d'un film pédagogique, un travail sur un simulateur de conduite et des informations sur les techniques de conduite ;
- Sensibilisation aux enjeux et découverte des techniques : Par le biais d'un accompagnement individuel de chaque conducteur en cabine pour un apprentissage idéal, avec mise en situation de travail avec son véhicule. Cette partie peut durer de 2 à 8 heures en fonction de l'organisation retenue ;
- Coaching personnalisé : adaptation de la conduite aux particularités du véhicule et de l'environnement ;
- Mesure de performance : établir une consommation repère ;
- Calcul des impacts des améliorations sur une année : en termes de consommation et de diminution des émissions de GES ;
- Etablissement d'une fiche de mesure de performance du conducteur qui peut aboutir à une notation ;
- Détermination d'un objectif individuel d'évolution au cours du temps ;
- Travail en groupe : analyse des résultats obtenus.

Des formations similaires pour engins de travaux publics sont dispensées pour un coût horaire d'environ 20 € HT¹⁵⁹. Il est tout de même recommandé de se renseigner auprès des organismes de formations concernant leur tarif et leurs options de formations.

La pratique de l'éco-conduite permet aussi de limiter la pollution sonore des engins en limitant le régime moteur et donc le bruit occasionné par les hauts régimes moteurs.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre de conducteurs ayant reçu une formation à l'éco-conduite ;
- Description du management éco-conduite mis en place dans l'entreprise.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploiter le fichier de suivi des formations des conducteurs.

¹⁵⁸ [Fuel Cost Control - conduite économique PL - écoconduite PI - formation transport - formation logistique \(fuel-cost-control.fr\)](http://fuel-cost-control.fr)

¹⁵⁹ [4. ECO CONDUITE DES ENGINES DE TP \(doczz.fr\)](http://doczz.fr)

GUIDE DES FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE DU PROGRAMME REMOVE POUR L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES ÉNERGETIQUES DES FLOTTES DE TRANSPORT MASSIF