

FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE

Programme REMOVE

Secteur FERROVIAIRE

Traction et manœuvre

Version juin 2024



Sommaire

Sommaire	4
Introduction aux fiches actions	5
Présentation synthétique des fiches actions	9
Axe 1 : Optimisation du plan de transport	12
A1 FA 1 : Optimisation du taux de chargement	13
A1 FA 2 : Optimisation du trajet	18
A1 FA 3 : Collecte et analyse des consommations	21
Axe 2 : Information / sensibilisation	28
A2 FA 1 : Formation à une conduite économique	29
A2 FA 2 : Participation à des sessions d'information	32
A2 FA 3 : Gestion des stationnements	34
Axe 3 : Optimisation du système	36
A3 FA 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel roulant	37
A3 FA 2 : Stop & Start	40
A3 FA 3 : Eco-stationnement	44
Axe 4 : Mode de propulsion des engins	46
A4 FA 1 : Locomotives et locotracteurs électriques	47
A4 FA 2 : Locomotives et locotracteurs hydrogène	59
A4 FA 3 : Locomotives et locotracteurs GNV	66
A4 FA 4 : Locomotives et locotracteurs biocarburants	77

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.

Présentation du dispositif LOG-te

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

- Sensibiliser les entreprises 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 entreprises en vue de l'obtention de chartes d'engagements volontaires.

Cette charte, basée sur le volontariat, engage chaque entreprise 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 entreprise 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 entreprises 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 entreprises 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 du plan de transport
- Axe 2 : Information et sensibilisation
- Axe 3 : Optimisation du système
- Axe 4 : Mode de propulsion des engins

L'axe 1 travaille sur l'organisation des flux, l'axe 2 regroupe des actions sur les conducteurs et les axes 3 et 4 concernent directement les locomotives et les locotracteurs.

L'axe 1 « Optimisation du plan de transport » concerne des actions en lien avec l'optimisation du taux de chargement, du trajet mais aussi la collecte et l'analyse des consommations.

L'axe 2 « Information et sensibilisation », se concentre sur le comportement de conduite des conducteurs.

L'axe 3 « Optimisation du système » regroupe les actions impactant directement les locomotives et locotracteurs, en travaillant sur l'existant, sans changer leur énergie de propulsion.

L'axe 4 « Mode de propulsion des engins » traite des autres modes de propulsion que le Diesel.

Grille de lecture des fiches actions

Il s'agira pour chaque entreprise 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'entreprise.

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

- d'une fiche de synthèse ;
- 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 entreprise 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 ;
- Des informations sur le contexte et la réglementation.

Référence de la fiche action

LOG-te A4 FA 2

Thème de la fiche action → **A4 FA 2 : Locomotives et locotracteurs hydrogène**

Description → **Synthèse**

Domaine de pertinence → **1. Description de l'action**

Présentation des solutions → **2. Domaine de pertinence**

Contexte et réglementation → **3. Solutions associées**

Bandeau partenaires Page 09

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

Les fiches solutions

Les pages qui suivent sont organisées par solution :

Nom de la solution → **Solution 1 : Locomotive 100 % hydrogène**

Explication de la solution → **1. Principes**

Impact sur les améliorations énergétiques → **3. Impact sur les améliorations énergétiques**

LOG-te A2 FA 2

Domaine de pertinence → **3. Domaine de pertinence**

Mise en œuvre → **4. Mise en œuvre**

Suivi de la solution → **5. Suivi de la solution**

Bandeau partenaires Page 09

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, des caractéristiques de l'entreprise, de ses activités, de son implantation géographique 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

L'ensemble des locomotives de traction et de manœuvre sont prises en compte.

Règles de cumul des gains

La plupart des solutions sont indépendantes les unes des autres, ce qui rend favorable le cumul des gains par l'entreprise engagée. 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'entreprise 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. Ces temps de retour sur investissement n'ont pas pu être calculés pour plusieurs solutions du fait du manque de données disponibles, en lien avec le caractère variable des gains associés à chaque solution (i.e. dépendant des spécificités de l'implémentation opérationnelle de la solution par l'entreprise).

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 du plan de transport					
A1 FA 1 : Optimisation du taux de chargement	Utilisation de wagons avec un meilleur taux de chargement	Variable	Variable		++
	Adaptation de la charge du train à la locomotive	Variable	Variable		++
	Possibilité de coupler des trains en trains longs	5%	5%	Moyen terme	++
A1 FA 2 : Optimisation du trajet	Coupure traction avant arrivée	Variable	Variable	Court terme	+++
	Système d'aide à l'écoconduite (DAS)	5-10%	5-10%		++
A1 FA 3 : Collecte et analyse des consommations	Mise en place tableau de bord (collecte données)	Indirect	Indirect	/	+++
	Télématique embarquée	Indirect	Indirect	/	++
	Management des consommations	Indirect	Indirect	/	++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 2 - Information/sensibilisation					
A2 FA 1 : Formation à une conduite économique	Formation à une conduite économique	3-10%	3-10%	Court terme	+++
	Formation à l'utilisation du DAS	5-10%	5-10%		+++
A2 FA 2 : Participation à des sessions d'information	Participation à des sessions d'information	Indirect	Indirect	/	+++
A2 FA 3 : Gestion des stationnements	Gestion des stationnements	Variable	Variable		+++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 3 - Optimisation du système					
A3 FA 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel de traction	Renouvellement ou modernisation du matériel roulant, à motorisation identique	10%	10%	Long terme	+
A3 FA 2 : Stop & Start	Stop & Start	7%	7%	Court terme	+++
A3 FA 3 : Eco-stationnement	Equipped pour éco-stationnement	< 1%	< 1%	Moyen terme	+++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 4 - Mode de propulsion des engins					
A4 FA 1 : Locomotives et locotracteurs électriques	Locomotive électrique par caténaire	63%	96%	Long terme	++
	Locomotive électrique hybride batteries-caténaire	Variable	Variable	Long terme	+
	Locomotive hybride bi-mode diesel-électrique par caténaire	15% à 20%	Variable	Long terme	++
	Locotracteur hybride bi-mode diesel-électrique par batteries	22% à 50%	Variable	Long terme	++
A4 FA 2 : Locomotives et locotracteurs hydrogène	Locomotive hydrogène	-17%	80 à 95%	Long terme	+
	Locomotive hybride hydrogène-électrique par caténaire	Variable	80 à 95%	Long terme	+
A4 FA 3 : Locomotives et locotracteurs GNV	Locomotive GNV/bioGNV	-22%	20% (GNV), 80% (bioGNV)	Long terme	+
	Locomotive hybride dual fuel GNV-diesel	-22 à 0%	Variable	Long terme	++
	Locomotive hybride GNV-électrique par batteries	Variable	Variable	Long terme	+
A4 FA 4 : Locomotives et locotracteurs biocarburant	Locomotive B100	-5% à 0%	60%	Long terme	+
	Locomotive HVO	-10% à -5%	82%	Long terme	+

Axe 1 : Optimisation du plan de transport

- A1 FA 1 : Optimisation du taux de chargement 13
 - Solution 1 : Utilisation de wagons avec un meilleur taux de chargement..... 14
 - Solution 2 : Adaptation de la charge du train à la locomotive..... 15
 - Solution 3 : Possibilité de coupler des trains en trains longs..... 16
- A1 FA 2 : Optimisation du trajet..... 18
 - Solution 1 : Coupure de la traction avant arrivée 19
 - Solution 2 : Système d'aide à l'écoconduite (DAS) 20
- A1 FA 3 : Collecte et analyse des consommations 21
 - Solution 1 : Mise en place d'un tableau de bord : collecte de l'information 22
 - Solution 2 : Télématique embarquée..... 25
 - Solution 3 : Management des consommations..... 26

A1 FA 1 : Optimisation du taux de chargement

Synthèse

1. Description de l'action

L'optimisation de la charge du train permet de transporter plus de marchandises dans un même wagon ou plus de marchandises avec une seule locomotive.

2. Domaine de pertinence

Ces solutions sont adaptées à tous les engins et types de transport mais vont notamment dépendre des réglementations en vigueur sur les tailles maximales des trains sur les voies.

3. Solutions associées

Trois solutions sont associées à cette action :

- Utilisation de wagons avec un meilleur taux de chargement ;
- Adaptation de la charge du train à la locomotive ;
- Couplage de trains en trains longs.

4. Contexte et réglementation

Les normes françaises prévoient une longueur admissible des trains de marchandises de 740 m. Un train de marchandises de 740 m remplace 52 camions¹.

Les longueurs maximales des trains varient selon les pays et les secteurs traversés.

Au niveau des wagons, les constructeurs présentent des wagons avec des tares de plus en plus faible afin d'augmenter la charge nette.

¹ [La longueur optimale des trains de marchandises | Le Rail](#)

Solution 1 : Utilisation de wagons avec un meilleur taux de chargement

1. Principes

L'utilisation de wagons avec des tares plus faibles permet d'augmenter la charge nette disponible et donc d'optimiser le taux de chargement en poids.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Cette solution va apporter des gains variables qui dépendront à la fois des caractéristiques du wagon remplacé et du nouveau wagon. Chaque situation nécessitera donc une analyse spécifique.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES seront directement proportionnels à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour tous les types de transport de marchandises.

4. Mise en œuvre

Les constructeurs présentent des wagons avec des tares de plus en plus faibles afin d'augmenter la charge nette : on peut attendre des réductions de la tare du wagon de l'ordre de la tonne.

Cette action sera à mettre en œuvre conjointement avec les fabricants/loueurs de wagons.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de wagons optimisés ;
- Consommation d'énergie par t.km transportée.

Solution 2 : Adaptation de la charge du train à la locomotive

1. Principes

L'axe de progrès de l'optimisation de la charge du train peut se traduire au niveau des wagons (cf. Solution 1 : Utilisation de wagons avec un meilleur taux de chargement), au niveau de la longueur du train (cf. Solution 3 : Possibilité de coupler des trains en trains longs) mais aussi sur le train lui-même en adaptant au mieux la charge du train à la locomotive et au parcours.

Cette action passe par des simulations de charge qui permettent de déterminer par type de locomotive quelle est la charge maximale possible.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Cette solution va apporter des gains variables qui dépendront à la fois des caractéristiques du train, du type de marchandises transportées et du parcours simulé. Chaque situation nécessitera donc une analyse spécifique.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES seront directement proportionnels à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour tous les types de transport de marchandises.

4. Mise en œuvre

- Identification des parcours à optimiser ;
- Lancement des simulations de charge ;
- Modification des chargements.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de trains optimisés ;
- Consommation d'énergie par t.km transportée.

Solution 3 : Possibilité de coupler des trains en trains longs

1. Principes

La consommation d'une locomotive étant proportionnelle à la masse totale transportée, l'augmentation du taux de chargement aura pour effet direct d'augmenter la charge transportée et donc les consommations d'énergie associées.

Toutefois, la masse à vide du véhicule étant non nulle, le pourcentage d'augmentation du taux de chargement entraînera un pourcentage moindre d'augmentation de la masse totale. De ce fait, la consommation de carburant par tonne transportée diminue avec l'augmentation du taux de chargement. Une des clés pour améliorer les volumes de fret ferroviaire serait donc d'augmenter davantage la longueur des trains.

Cependant, la longueur et la masse autorisées des trains de marchandises, n'est pas toujours uniforme, notamment du fait des longueurs des voies d'évitement et des caractéristiques techniques des voies. Chaque réseau les limite selon ses propres critères. En France, les trains ont déjà une longueur admissible de 750 m. L'axe Perpignan – Luxembourg fût le premier à autoriser des trains plus longs, de 850 m. Certaines liaisons entre Perpignan, Le Havre, Lille et Luxembourg sont déjà disponibles pour des trains de fret de 850 m.

Pour des trains plus longs (1000 m ou plus), le temps de réaction de freinage entre la locomotive de tête et le dernier wagon peut différer de quelques secondes, ce qui peut causer des problèmes de sécurité. Des modifications techniques ainsi que de conduite deviennent alors nécessaires. Déplacer la locomotive ou multiplier le nombre de locomotives est alors envisagé.

La mise en place de ces trains longs nécessite également la construction de nouveaux ouvrages d'art avec des déclivités plus favorables et l'allongement des voies d'évitement et éventuelle adaptation des circuits de voie en signalisation.

Au-delà de la constitution ad-hoc de trains longs, la présente solution s'appuie la **possibilité de coupler des trains en trains longs, en particulier pour les trains de retour à vide** où il n'est pas rare d'associer deux retours de rame.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Dans le cadre du projet Marathon, une économie de **10 % de la consommation d'énergie** a été réalisée pendant le test du projet. D'autres chiffres indiquent un projet permettant d'économiser **5 % d'énergie par tonne transportée** et vise une réduction du coût du km-train de 30 % par rapport aux circulations actuelles².

En Espagne, une recherche sur la consommation d'énergie de trois trains de différentes longueurs (deux trains de 500 m et 750 m tractés chacun par deux locomotives et un train de 490 m avec une seule locomotive) démontre que le train de 750 m consommait et émettait moins pour chaque tonne nette de marchandises transportée que le train de 490 m.

3. Domaine de pertinence

Cette solution n'est accessible qu'aux entreprises ferroviaires ayant un volume de trains significatifs et donc la possibilité de les grouper sur une partie du parcours pour faire des trains longs.

² [La longueur optimale des trains de marchandises | Le Rail](#)

Toutefois, elle reste limitée par les caractéristiques du réseau emprunté (longueurs nécessaires des voies d'évitement, masses maximale autorisée, etc.) et nécessite d'adapter le format du train aux capacités des terminaux.

L'Europe a créé des corridors Réseau transeuropéen de transport (RTE-T) spécifiques censés relier tous les grands bassins industriels d'Europe. Cette solution est donc particulièrement pertinente pour les locomotives empruntant ces corridors.

4. Mise en œuvre

- **Revue des plans de transport pour déterminer les couplages de trains possibles ;**
- Des longueurs de voies d'évitement adaptées à la longueur des trains ;
- Des charges transportées conformes aux masses maximales autorisées sur les lignes ferroviaires correspondantes ;
- Une formation des conducteurs aux comportements de conduite et de freinage adaptés,
- La mise en œuvre de systèmes de freinage adaptés ;
- Etudier la nécessité de déplacer la locomotive (milieu ou en queue de train) ou d'en multiplier le nombre sous forme de traction distribuée.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de trains longs opérés ;
- Consommation d'énergie par t.km transportée.

A1 FA 2 : Optimisation du trajet

Synthèse

1. Description de l'action

L'optimisation du trajet des véhicules permet de réduire la consommation énergétique grâce à des modifications d'allures ou de fonctionnement lors du temps de trajet.

2. Domaine de pertinence

Ces solutions sont adaptées à toutes les locomotives.

3. Solutions associées

Deux solutions sont associées à cette fiche :

- La coupure des moteurs de traction avant arrivée ;
- La mise en place d'un système d'écoconduite (DAS).

4. Contexte et réglementation

L'information des conducteurs grâce aux documents de bord a existé avec la création en 1981 de la FT81 qui indiquait tout au long du parcours et pas seulement à l'arrivée les points de coupure traction. C'est la solution de base d'aide à l'écoconduite, elle peut être réalisée assez simplement avec des simulations de tracé intégrant ou non des coupures de traction en des points identifiés.

Le système d'aide à la conduite DAS (Driver Advisory System) permet d'aller plus loin en utilisant soit une version autonome (s-DAS) qui optimise la conduite à n'importe quel instant d'après la connaissance a priori de la configuration du train et du trajet et de sa position et vitesse en temps réel, soit une version connectée (c-DAS) qui intègre en temps réel les conditions de trafic.

Solution 1 : Coupure de la traction avant arrivée

1. Principes

Le séquençage normal du trajet d'un train se décompose en une phase d'accélération, un trajet à vitesse constante et une phase de décélération. Toutefois, il est possible de réaliser une coupure prématurée de la traction, laissant alors le train achever son trajet en « roue libre » et réaliser une « marche sur l'erre », afin de minimiser la consommation énergétique du train nécessaire pour le mouvoir sur les derniers kilomètres. La phase de décélération est ainsi assurée simplement par frottements.

Cette solution peut s'envisager dans une variante plus large de management de la conduite économique à travers toutes les optimisations technico-organisationnelles de régulation de la vitesse et non uniquement la coupure de la traction avant l'arrivée.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique attendu pour des opérations de fret³ n'est pas encore quantifiable et devra être estimé au cas par cas.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES seront directement proportionnels à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3. Domaine de pertinence

Applicable à toutes les locomotives.

4. Mise en œuvre

- Installation de logiciels permettant de déterminer le moment optimal d'arrêt des moteurs.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de locomotives équipées de logiciels ;
- Nombre de kilomètres roulés à moteurs éteints ;
- Gains énergétiques générés par cette pratique.

³ Cette pratique bien connue a notamment été réalisée sur les TGV Atlantique 68 km avant l'arrivée en gare du train lorsque celui-ci se déplaçait à 260 km/h.

Solution 2 : Système d'aide à l'écoconduite (DAS)

1. Principes

Afin de se déplacer le plus rapidement, un train doit démarrer par une phase d'accélération à pleine puissance, réaliser son trajet à une vitesse constante puis décélérer au maximal. Cependant, les temps de trajet sont calculés en ajoutant des marges à ce temps minimum théorique afin d'assurer la ponctualité du service, malgré d'éventuels retards imprévisibles.

De ce fait, lorsque le train ne subit aucun retard, il est possible de réduire la vitesse du train afin de réduire sa consommation énergétique et ses émissions de GES, sans modifier son heure d'arrivée.

La mise en place d'un système d'aide à l'écoconduite ou Driver Advisory System (DAS), système de communication entre le conducteur et l'infrastructure, optimise les mises en vitesse et les marches sur l'erre afin d'atteindre une vitesse de déplacement permettant de réduire la consommation énergétique du déplacement.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Des études réalisées en équipant des s-DAS et c-DAS, ont respectivement permis de constater des gains énergétiques de 5 % et de 10 %.

Les gains énergétiques restent variables selon les conditions de déplacement (caractéristiques de la locomotive, chargement transporté, dénivelé du territoire traversé, arrêts imposés par la signalisation, ...) et devront être estimés au cas par cas.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES seront directement proportionnels à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3. Domaine de pertinence

Applicable à toutes les locomotives.

4. Mise en œuvre

Mise en place d'un DAS :

- Soit en version autonome avec un s-DAS (majorité des versions actuelles implémentées) ;
- Soit en version dynamique c-DAS (prenant en compte les conditions de circulation en temps réel mais nécessitant des interfaçages complexes pour le transfert de données en temps réel).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de locomotives équipées de DAS ;
- Gains énergétiques des locomotives équipées de système embarqué ;

A1 FA 3 : Collecte et analyse des consommations

Synthèse

1. Description de l'action

La capacité de mesurer et de suivre de manière précise la consommation d'énergie (par engin voire par conducteur) permet à l'entreprise d'établir un point de départ et de se fixer un objectif de réduction concret et réalisable, ainsi que de mettre en place des actions ciblées.

2. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les domaines du transport ferroviaire.

3. Solutions associées

Trois solutions sont proposées :

- Collecter les informations relatives à la consommation ;
- La télématique embarquée ;
- La gestion et l'analyse des données de consommation.

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

Une bonne gestion des consommations énergétiques 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 A2 FA1 « formation à une conduite raisonnée » où le suivi précis de la consommation des conducteurs permettra d'identifier ceux qui auront prioritairement besoin de suivre une formation.

Solution 1: Mise en place d'un tableau de bord: collecte de l'information

1. Principes

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

Pour un mode de propulsion électrique, la collecte de l'information peut dépendre de plusieurs acteurs : le transporteur de fret ferroviaire (compteur sur locomotive) et le fournisseur d'électricité (facture d'électricité). Le contexte actuel d'ouverture à la concurrence du transport ferroviaire imposé progressivement par l'Union Européenne devrait aider à la mise en place d'une collecte de données. Pour les autres modes de propulsion, la collecte des données est liée directement au transporteur de fret ou 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 d'énergie. 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 la faire baisser (au moins temporairement). La mise en place d'outils de gestion de la consommation est un premier pas vers la diminution de ces consommations, et donc vers un gain en émissions de GES.

Enfin, pour l'entreprise, 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 domaines du transport ferroviaire.

4. Mise en œuvre

Pour les trains en mode de propulsion non électrique, 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 trains en 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 locomotives à chaque apport de carburant	Investissement quasi-nul	Peu fiable Nécessite la mise en place d'un système de vérification	20 %
2	Retour des consommations par les installateurs et distributeurs de carburants	Permet une vérification des données remontées par les conducteurs	Harmonisation nécessaire entre les données des différents fournisseurs	10 %
3	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 %
4	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 d'avitailier les trains de noter à chaque plein effectué les données relatives aux volumes de carburant pompés ;
- **Méthode 2 « via installateurs »** : les installateurs et distributeurs d'énergie peuvent fournir les données relatives aux volumes de carburants achetés ;
- **Méthode 3 « via informatique cuves internes »** : les cuves de carburant doivent être équipées de capteurs permettant un relevé des volumes prélevés ;
- **Méthode 4 « 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 trains 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 au tonnage	-
2	Télématique embarquée	Transporteur de fret	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 télématique embarquée »** : cette méthode nécessite un investissement plus important. Elle inclut parfois des fonctionnalités supplémentaires permettant une optimisation globale de la gestion du parc (exemple : date et heure, géolocalisation, gestion des temps de conduite, vitesse instantanée au moment de la mesure, les grandeurs d'énergie échangée pendant les cinq dernières minutes, etc.). Certains trains sont déjà équipés d'un relevage par compteur.

A ces fichiers doivent être ajoutées des données relatives au train et au déroulement de la mission : caractéristiques techniques, origine, destination, tonnage, distance parcourue au cours de sa mission en cours, temps total de son parcours et éventuelles perturbations rencontrées. Ces informations permettront d'obtenir les kWh/tonne.km et L/tonne.km.

Cette solution ne présente pas de gain d'énergie 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 4 ou 1 et 2 ci-avant en fonction de la motorisation) ainsi que le niveau de précision estimé (exprimé en pourcentage).

Solution 2 : Télématicque embarquée

1. Principes

Le terme « télématicque » désigne de façon générale des appareils d'aide aux opérations de transport, qui combinent des technologies d'information et des outils de télécommunication, dont l'objectif est d'avoir un meilleur usage des engins et un meilleur suivi des conducteurs. Une utilisation efficace de ces appareils peut permettre des progrès significatifs en termes de sécurité et de productivité.

Trois types d'utilisateurs sont concernés par l'informatique embarquée et peuvent profiter des informations transmises : le conducteur (retours sur sa conduite), l'exploitant (aide à l'organisation) et le chef de parc (optimisation de la maintenance).

Les données collectées peuvent être très variées : données de localisation GPS, vitesse, temps à l'arrêt, consommation d'énergie, analyse des accélérations et des freinages brusques, émissions de GES, pannes, etc.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Cette solution a pour objectif de collecter des données d'usage des locomotives afin de cibler les leviers d'actions à mettre en place. Elle n'a donc pas d'impact direct sur la consommation d'énergie ni d'émission de GES.

3. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour les locomotives de traction.

4. Mise en œuvre

On retrouve plusieurs offres de systèmes de télématicque embarquée, respectant la norme sur les applications embarquées ferroviaires et intégrant ou non la technologie de l'internet des objets (IoT). Il est conseillé de se rapprocher des fabricants et installateurs de télématicque embarquée pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs systèmes.

Les trains peuvent être équipés à l'achat d'un système de télématicque embarquée ou peuvent a posteriori faire installer ce système sur une locomotive déjà existante.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins équipés de télématicque embarquée (avec un module de relevé des consommations).

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins équipés d'un système de télématicque embarquée (avec un module de relevé des consommations).

Solution 3 : Management des consommations

1. Principes

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

- **Niveau minimal** : analyser les données de consommation en L/100 km ou kWh/100 km et les comparer aux consommations standard ;
- **Niveau intermédiaire** : caractériser les trajets (vitesse moyenne, type de parcours, type de marchandises transportées, tonnage transporté), détailler les données de consommation par principaux types d'engins puis les analyser ;
- **Niveau maximal** : prendre en compte tous les paramètres de conduite (vitesse, freinage, etc.) mais aussi des paramètres exogènes qui relèvent de l'engin et/ou des conditions de son utilisation opérationnelles (poids à vide, tonnage transporté, type d'activité de transport, présence ou non de freinage régénératif) et des facteurs pouvant impacter la conformité du trajet effectué avec le trajet tracé.

Réaliser une estimation des données de consommation en L/t.km. ou kWh/t.km.

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 formation personnalisée adaptés à chaque conducteur en fonction de ses performances.

3. Domaine de pertinence

L'action est pertinente pour tous les domaines du transport ferroviaire.

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'entreprise peut faire progresser son niveau d'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, par exemple la typologie des parcours en manœuvre et en desserte pour les locotracteurs.

L'investissement en temps est étroitement lié à la taille du parc et à la diversité des activités de transport de l'entreprise⁴.

Cette solution ne présente pas de gain d'énergie 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.

⁴ 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.

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 2 : Information / sensibilisation

A2 FA 1 : Formation à une conduite économique.....	29
Solution 1 : Formation à une conduite économique.....	30
Solution 2 : Formation à l'utilisation du DAS.....	31
A2 FA 2 : Participation à des sessions d'information	32
Solution 1 : Participation à des sessions d'information	33
A2 FA 3 : Gestion des stationnements	34
Solution 1 : Gestion des stationnements	35

A2 FA 1 : Formation à une conduite économique

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 énergie.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des conducteurs de locomotives et locotracteurs.

3. Solutions associées

Deux solutions associées :

- La formation à une conduite économique ;
- La formation à l'utilisation du DAS.

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, notamment sur l'utilisation du DAS.

Solution 1 : Formation à une conduite économique

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 la société accompagnent, conseillent les conducteurs et analysent leur façon de conduire afin de les accompagner à adopter une conduite raisonnée.

Cette formation peut être complétée par l'installation d'outils d'aide à l'éco-conduite intégrés assurant à tout moment au conducteur de connaître la meilleure vitesse à laquelle rouler.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La sensibilisation aux bonnes pratiques se généralise. Toutefois, l'impact de cette solution sur la consommation énergétique de la locomotive/locotracteur varie à la fois selon le conducteur et selon la topométrie du territoire parcouru.

Un gain moyen de 5 % pourra être retenu dans un premier temps pour le fret en attendant des données issues de retours d'expériences spécifiques⁵.

3. Domaine de pertinence

La conduite des locomotives de fret est partiellement encadrée, notamment pour les arrêts déclenchés par la signalisation ferroviaire et les trains voyageurs prioritaires. Toutefois, la formation à l'éco-conduite permet avant tout une sensibilisation des conducteurs et un rappel des bonnes pratiques de conduite. En ce sens, cette solution est pertinente pour tous malgré un taux de transformation variable selon les conducteurs.

4. Mise en œuvre

Il existe une dizaine d'organismes de formation à la conduite des trains. Certaines sociétés privilégient la mise en place d'un centre de formation interne. Les formateurs accompagnent et conseillent les conducteurs. Ces formations permettent également de constituer ou de réviser un manuel des bonnes pratiques du conducteur de l'entreprise.

5. Suivi de la solution

Indicateurs 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.

⁵ [Optimiser la consommation d'énergie des TGV | SNCF](#)

Solution 2 : Formation à l'utilisation du DAS

1. Principes

La mise en place d'un système d'aide à la conduite ou Driver Advisory System (DAS), système de communication entre le conducteur et l'infrastructure, optimise les mises en vitesse et les marches sur l'erre afin d'atteindre une vitesse de déplacement permettant de réduire la consommation énergétique du déplacement.

La formation des conducteurs à la prise en main de ce système est nécessaire pour en assurer une bonne utilisation et obtenir les gains énergétiques escomptés.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les gains énergétiques liés à l'utilisation d'un DAS restent variables selon son utilisation par le conducteur et les conditions de déplacement de la locomotive/locotracteur. Ces derniers devront être estimés au cas par cas.

Pour rappel, la mise en place technique d'un DAS (cf. Solution 2 : Système d'aide à l'écoconduite (DAS)) permet d'envisager des gains énergétiques de l'ordre de 5 à 10 %.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES seront directement proportionnels à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

3. Domaine de pertinence

Applicable à tous les conducteurs de locomotives et locotracteurs.

4. Mise en œuvre

- Formation d'agents à l'utilisation du DAS.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre de conducteurs formés à l'utilisation du DAS.

A2 FA 2 : Participation à des sessions d'information

Synthèse

1. Description de l'action

La participation à des sessions d'information (colloque, webinaire, ...) permet de maintenir une veille sectorielle constante sur les enjeux sectoriels de transition énergétique. Ces sessions servent aussi à rassembler les parties prenantes, obtenir des retours d'expérience innovants et comprendre les enjeux et orientations sectorielles à venir.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des acteurs (société, conducteur, agent, etc.).

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la participation à des sessions d'information.

4. Contexte et réglementation

A l'heure de la transition écologique, le verdissement des flottes est un enjeu majeur pour l'ensemble des acteurs de tous les modes de transport.

La profession a bien intégré cette évolution et sa nécessité, même si actuellement il y a encore peu de colloques ou de sessions d'information sur la traction ferroviaire dans lesquels cette thématique de la transition énergétique est abordée.

Solution 1 : Participation à des sessions d'information

1. Principes

La participation à des sessions d'information (colloque, webinaire, ...) permet de maintenir une veille sectorielle constante sur les enjeux de transition énergétique.

Elle facilite notamment :

- La rencontre et la mobilisation des parties prenantes : entreprises ferroviaires, chargeurs et représentants des acteurs économiques, gestionnaires d'infrastructure, élus, partenaires institutionnels et organisations syndicales ;
- La présentation de retours d'expérience innovants permettant de supprimer les réticences au changement : présentation des difficultés rencontrées et de résultats concrets ;
- Le décryptage des enjeux et des orientations sectoriels.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'impact d'une participation à une session d'information (colloque, conférence, webinaire, etc.) sera nécessairement indirect, qu'il s'agisse de gains énergétiques ou d'évolution des émissions de GES.

3. Domaine de pertinence

La participation à des sessions d'information permet aux opérateurs et à leurs salariés de rester en éveil sur les enjeux techniques et environnementaux du secteur. En ce sens, cette solution est pertinente malgré son impact indirect.

4. Mise en œuvre

La définition des personnes pertinentes pour participer à ces sessions dépendra des thématiques traitées et de leur capacité à orienter la politique de l'entreprise.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Récurrence de la participation de l'entreprise aux sessions sectoriels.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi des sessions existantes et du taux de participation de la société ;
- Suivi de l'évolution des thématiques abordées.

A2 FA 3 : Gestion des stationnements

Synthèse

1. Description de l'action

L'éco-stationnement permet de réduire la consommation d'énergie en optimisant la consommation lors du stationnement de l'engin. Cette action concerne l'aspect comportemental de la mise en place de cette solution (l'aspect technique est traité en A3 FA 3 : Eco-stationnement).

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des acteurs (entreprise, conducteur, agent, etc.).

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la gestion des stationnements.

4. Contexte et réglementation

Aucune obligation réglementaire ne vient appuyer cette action mais un accompagnement au changement semble nécessaire pour faire évoluer les anciennes pratiques.

Solution 1 : Gestion des stationnements

1. Principes

Pour les trains en ligne, la mise en veille du moteur diesel lors des arrêts est une piste d'amélioration. Pour les manœuvres, pendant les temps d'attente, il est possible de couper le moteur diesel, voire certains auxiliaires.

Les conducteurs ont tendance à conserver le moteur diesel en marche pour garder les fonctions vitales du train en marche sans soucis futurs. Sur les matériels modernes, la surveillance de la tension batterie permet de procéder aux arrêts nécessaires, c'est la fonction Stop & Start manuelle.

Pour les locomotives en garage, la mise en veille grâce à une « prise maintenance », si la locomotive en est équipée (cf. A3 FA 3 : Eco-stationnement), permet de réaliser les charges des veilles et le préchauffage sans démarrer le moteur diesel sur les locomotives thermiques.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les gains énergétiques liés à cette action de sensibilisation dépendront du type de sensibilisation mise en place et de son suivi (incluant des sessions régulières de rappel). Ainsi les gains devront être estimés au cas par cas.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES devront également être évalués au cas par cas car selon qu'il s'agisse d'une diminution de la consommation (arrêt du moteur) ou d'un transfert de consommation (thermique vers électrique), des facteurs d'émission différents seront utilisés pour quantifier ce gain environnemental.

3. Domaine de pertinence

Applicable à tous les conducteurs de locomotives et locotracteurs, ainsi qu'aux agents de maintenance.

4. Mise en œuvre

- Préparation et animation de sessions de sensibilisation ;
- Suivi et contrôle de la mise en place de la gestion des stationnements.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre de conducteurs sensibilisés à l'éco-stationnement.

Axe 3 : Optimisation du système

A3 FA 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel roulant	37
Solution 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel roulant	38
A3 FA 2 : Stop & Start	40
Solution 1 : Stop & Start	41
A3 FA 3 : Eco-stationnement	44
Solution 1 : Equipement pour éco-stationnement	45

A3 FA 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel roulant

Synthèse

1. Description de l'action

Anticiper le renouvellement du matériel roulant, à **motorisation identique**, peut permettre un gain énergétique grâce aux nouvelles technologies. En effet, des locomotives plus récentes, pour un même type d'engin, sont souvent moins énergivores grâce à des optimisations techniques.

Les opérations de modernisation d'une partie des composants du matériel roulant, toujours à type de motorisation identique, rentrent aussi dans le cadre de cette action.

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.

2. Domaine de pertinence

Cette action s'adapte à toutes les locomotives et locotracteurs. La plupart des actions de l'axe 4 « Mode de propulsion des engins » sont à étudier en cohérence avec cette action d'ajustement du parc.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la modernisation de composants du matériel roulant ou le renouvellement, à motorisation identique, de la locomotive ou du locotracteur par un engin plus récent et moins énergivore.

4. Contexte et réglementation

Cette action doit être mise en œuvre dès l'achat de la locomotive ou du locotracteur, en forte interaction avec les constructeurs et loueurs : elle est d'une importance capitale, car elle implique le parc de véhicules sur sa durée de vie, de 30 à 40 ans.

Solution 1 : Renouvellement ou modernisation du matériel roulant

1. Principes

La consommation d'énergie représente une part significative des coûts du cycle de vie d'un train. Ainsi, investir dans un matériel roulant économe en énergie permet non seulement d'accélérer la transition vers la mobilité durable mais aussi de réduire le coût total de possession pour l'exploitant.

Même si les systèmes de traction de ces trains sont encore en état de marche, l'électronique de puissance et les techniques de contrôle ont fait d'énormes progrès depuis leur mise en service. Ainsi, le renouvellement des anciens trains avec des composants de pointe permet non seulement de prolonger leur durée de vie opérationnelle, mais aussi d'améliorer leur efficacité et leur fiabilité, et de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance. Le renouvellement du matériel roulant permet alors d'optimiser la technologie des locomotives et ainsi de minimiser leur consommation d'énergie et leurs émissions de GES pour une même utilisation.

Toutefois, la durée de vie moyenne d'une locomotive se situe entre 30 et 40 ans. De plus, l'évolution du trafic de fret ferroviaire ne nécessite pas un renouvellement prématuré de ces dernières. L'offre constructeur reste donc limitée. L'optimisation énergétique des locomotives de traction peut donc être réalisée à travers le renouvellement complet ou la modernisation de composants du matériel roulant.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les gains énergétiques dépendront de la locomotive à renouveler (âge, état, consommation moyenne observée, ...) et du composant remplacé ou de la nouvelle locomotive envisagée (consommation moyenne théorique, ...). Chaque situation nécessitera donc une analyse spécifique.

Nous préconisons, en attendant de disposer de données spécifiques au fret⁶, un gain moyen énergétique et d'émissions de GES de 10 % est retenu⁷. Ce ratio est défini à partir de chiffres fournis pour le transports de voyageurs⁸.

3. Domaine de pertinence

Cette action n'est pertinente que pour des locomotives ou locotracteurs d'un certain âge, qu'il s'agisse du renouvellement d'une locomotive ou de la modernisation de composants de la chaîne de traction.

4. Mise en œuvre

- Planification du plan de renouvellement et du plan pluriannuel d'investissement associé.
- Connaissance des critères de dimensionnement et de l'architecture de la chaîne de traction
- Connaissance des composants de la chaîne de traction existants
- Analyse de la possibilité de mettre en œuvre une solution plus efficace ponctuellement (avec nécessité d'une étude dédiée et d'une homologation) ou lors du renouvellement du parc de locomotives

⁶ Une étude des pertes de chaîne de traction entre les modèles BB 22200 et Traxx MS permettrait d'affiner les hypothèses de gains énergétiques.

⁷ Pour les TGV, le différentiel entre le gain énergétique et le gain GES provient d'un mix entre le matériel et le vecteur énergétique.

⁸ [Optimiser la consommation d'énergie du TGV](#)

A noter que la modernisation de composants est encore peu fréquente sur les locomotives électriques et rare sur les engins Diesel, à l'exception des moteurs MD.

Pour le cas spécifique des locotracteurs, la sélection des nouveaux engins doit être adaptée à l'usage et basée sur différents critères de choix :

- Nombre d'essieux : de 2 essieux à 4 essieux ;
- L'effort au crochet (kN) et la puissance motrice (kW) ;
- L'alimentation du moteur : mécanique, électrique, hydraulique ;
- Le poids total supporté par la machine ;
- Les véhicules à tracter avec le locotracteur ;
- La taille du réservoir ;
- Le système de freinage et la chaîne de traction ;
- La boîte de rapports et la vitesse maximale ;
- La transmission et la suspension ;
- La cabine et l'attelage ;
- Systèmes de stockage d'énergie électrique ;
- Les autres options disponibles sur la machine.

Il est possible d'obtenir des gains énergétiques sur un grand nombre de ces critères.

Cette solution peut aussi apporter des gains économiques. En effet, la plupart des locomotives en service nécessitent une augmentation des dépenses d'entretien et de réparation de 40 à 60 % par rapport aux modèles modernes⁹. L'investissement dans un nouveau véhicule permet donc des réductions de coûts énergétiques et de coûts d'entretien.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Etude des évolutions technologiques ;
- Plan de maintenance de la distribution d'énergie de la flotte ;
- Analyse de l'âge moyen du parc de locomotives ;
- Analyse du nombre de locomotives renouvelées.

⁹ [Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive - ScienceDirect](#)

A3 FA 2 : Stop & Start

Synthèse

1. Description de l'action

Les locomotives de traction peuvent fonctionner au ralenti sur de longues durée. Ce temps pouvant représenter jusqu'à 60 à 70 % du fonctionnement quotidien d'une locomotive de manœuvre¹⁰.

Le système « Stop & Start » est programmé pour arrêter automatiquement le moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt et le moteur au ralenti permettant de réduire la consommation d'énergie des engins de traction.

2. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins thermiques de traction, ou dédiés aux opérations de fret, de travaux sur voies ou de manœuvre/triage.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la mise en œuvre d'un système « Stop & Start » pour arrêter automatiquement le moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt et le moteur au ralenti.

4. Contexte et réglementation

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

¹⁰ (PDF) [Shunting Locomotives Fuel and Power Resources Decrease \(researchgate.net\)](#)

Solution 1 : Stop & Start

1. Principes

Le système « Stop & Start » est conçu pour arrêter automatiquement le moteur lorsque l'engin est à l'arrêt et le moteur au ralenti. L'arrêt automatique est programmé pour ne pas dépasser 15 minutes dans ces conditions. Le redémarrage du moteur est possible grâce à une action volontaire du conducteur.

Dans le cas des locomotives de manœuvre, leur fonctionnement se caractérise par un long temps au ralenti et à faible charge pouvant représenter 60 à 70 % de leur fonctionnement quotidien¹¹. Au total, la consommation d'énergie pour un mode ralenti du moteur compte pour 30 à 50 % de la consommation totale d'énergie du fonctionnement.

Pour cette solution, un certificat d'économie d'énergie (CEE) est disponible (TRA-EQ-125), sous certaines conditions.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Des retours d'expériences ont montré une réduction de la consommation moyenne de diesel de 12 %¹² grâce à un système de Stop & Start. Cela représente une réduction de 12 % des émissions de GES. Des locomotives utilisées dans les travaux ont pu atteindre une réduction de 20 %. Les trains de fret atteignent plutôt une réduction de 7 % de leurs consommations¹³. Pour une locomotive de manœuvre moyenne¹⁴, 70 % de son temps de fonctionnement est au mode ralenti, ce qui représente une consommation moyenne de carburant de 150 L par jour.

Les estimations sur les améliorations énergétiques dépendent grandement du système installé et de son fonctionnement. D'autres systèmes chiffrant à 3 %¹⁵ la réduction d'énergie pour les locomotives.

Les systèmes Stop & Start permettent aussi une réduction des pollutions atmosphériques et de la pollution acoustique. Il y a aussi une réduction des coûts liés à la maintenance des moteurs et sur d'autres organes de la machines (transmission, etc.).

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous les engins thermiques de traction, ou dédiés aux opérations de fret, de travaux sur voies ou de manœuvres/triage.

Le certificat d'économie d'énergie n'est compatible qu'avec les locomotives diesel.

4. Mise en œuvre

La mise en place doit être réalisée par un fournisseur de système Stop & Start. Ce système peut être intégré aux nouvelles locomotives dès l'achat.

¹¹ [\(PDF\) Shunting Locomotives Fuel and Power Resources Decrease \(researchgate.net\)](#)

¹² [Projet EcoStop, Colas Rail](#)

¹³ [Objectif OFP](#)

¹⁴ [General statistics of diesel engines' idle time: Shunting locomotives in industrial sidings in Poland 2009...2013 - ScienceDirect :](#)

¹⁵ [WABTEC](#)

Un projet de développement de système stop and start, pour des locomotives utilisées dans les travaux (étude du système, homologation, dépôt de brevet, CEE, prototype et industrialisation) a coûté 400 k€. Ce même projet définit un retour sur investissement rapide, de l'ordre de 40 mois sans CEE et de 22 mois avec CEE. Notamment grâce à une baisse de la consommation impliquant une économie moyenne de 1 000 € par mois par machine et un gain indirect par la maintenance de l'engin ferroviaire. L'installation d'un système Start and Stop est donc de l'ordre de 40 k€, pour une durée de vie conventionnelle de 15 ans¹⁶.

D'autres fournisseurs chiffent à 20 000 € par an et par engin les économies réalisées (gain d'énergie et gain en maintenance)¹⁷. Leur système étant compatible avec toute locomotive diesel déjà équipée d'un système de contrôle électronique.

Cette solution est mature permettant une mise en œuvre à moyenne et grande échelle.

Pour obtenir le certificat d'économie d'énergie il faut :

- La preuve de la réalisation de l'opération dont la mention de l'installation d'un système « Stop & Start » neuf ;
- Les mentions suivantes : le détail de la marque, la référence, le numéro de série et le numéro d'immatriculation EVN du véhicule ferroviaire sur lequel le système est installé.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins équipés de la technologie Stop & Start dans le parc.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte et suivi des temps passés à l'arrêt (moteur au ralenti) via une estimation ou grâce à l'informatique embarquée.

¹⁶ Source : entreprise ferroviaire

¹⁷ [Automatic Stop-Start System for Locomotives | Voith](#)



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° TRA-EQ-125

« Stop & Start » pour véhicules ferroviaires

1. Secteur d'application

Les véhicules ferroviaires dédiés aux opérations de fret, de travaux sur voies ou de manoeuvres/triage.

2. Dénomination

Mise en place d'un système « Stop & Start » neuf sur un véhicule ferroviaire fonctionnant au diesel et dédié aux opérations de fret, de travaux sur voies ou de manoeuvres/triage.

Le système « Stop & Start » est un système qui permet l'arrêt automatique du moteur lorsque l'engin est à l'arrêt et le moteur au ralenti. L'arrêt automatique est programmé pour que ces conditions n'excèdent pas 15 minutes. Le redémarrage du moteur est rendu possible par actionnement volontaire de l'opérateur.

3. Conditions pour la délivrance de certificats

La mise en place est réalisée par un professionnel.

La preuve de la réalisation de l'opération mentionne l'installation d'un système « Stop & Start » neuf, ses marque et référence, son numéro de série et le numéro d'immatriculation EVN du véhicule ferroviaire sur lequel le système est installé.

Les documents justificatifs spécifiques à l'opération sont :

1) Une photographie lisible de la plaque constructeur du système « Stop & Start », avec les indications minimales suivantes :

- 1.1. La raison sociale et l'adresse complète du fabricant du système « Stop & Start » et, le cas échéant, de son mandataire ;
- 1.2. Le numéro de série du système « Stop & Start » ;
- 1.3. Le numéro EVN du véhicule ferroviaire sur lequel le système est installé ;
- 1.4. L'année de construction du système « Stop & Start », à savoir l'année au cours de laquelle le processus de fabrication a été achevé.

Une copie papier ou numérique lisible de cette photographie peut être acceptée.

2) Un relevé du nombre total d'heures de fonctionnement du système « Stop & Start » actif et du nombre total d'heures de fonctionnement du moteur du véhicule ferroviaire, sur le territoire français, établi par le gestionnaire ou l'exploitant du véhicule ferroviaire sur une période maximale de six mois consécutifs. Le relevé précise, en outre, le numéro EVN du véhicule ferroviaire, les dates d'utilisation du véhicule, le temps journalier de fonctionnement du moteur du véhicule exprimé en minutes, le temps journalier de fonctionnement du système « Stop & Start » actif exprimé en minutes, le nombre journalier d'activation du système « Stop & Start », la date de début et de fin du relevé.

Il y a activation du système « Stop & Start » dès lors que ce système procède à l'arrêt du moteur. La durée pendant laquelle le système « Stop & Start » est considéré comme actif est la durée s'écoulant entre un arrêt du moteur déclenché par le système et le redémarrage du moteur. Cette durée n'est pas comptabilisée si l'arrêt du moteur

La date d'achèvement de l'opération est la date de fin du relevé susmentionné.

Le délai entre la date de la preuve de réalisation et la date d'achèvement de l'opération est au maximum de 18 mois.

4. Durée de vie conventionnelle

15 ans.

5. Montant de certificats en kWh cumac

Type de véhicule ferroviaire	Montant en kWh cumac	X	Nombre total d'heures de fonctionnement du moteur du véhicule ferroviaire indiqué dans le relevé
Fret	800		N
Travaux sur voies	1 800		
Manoeuvres/triage	950		

A3 FA 3 : Eco-stationnement

Synthèse

1. Description de l'action

L'éco-stationnement permet de réduire la consommation d'énergie en optimisant la consommation lors du stationnement du véhicule.

2. Domaine de pertinence

Cette solution concerne toutes les locomotives.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la mise en place d'équipements pour permettre l'éco-stationnement.

4. Contexte et réglementation

Aucune obligation réglementaire ne vient appuyer cette action. Par contre, elle est indissociable de l'action d'accompagnement au changement des pratiques des conducteurs (cf. A2 FA 3 : Gestion des stationnements).

Solution 1 : Equipement pour éco-stationnement

1. Principes

L'éco-stationnement est un processus de réduction de consommation d'énergie lors du stationnement du matériel roulant. Celui-ci peut intervenir pour de la maintenance ou avant/après un trajet. L'éco-stationnement des trains est une piste de gestion intelligente de la consommation d'énergie.

Les conducteurs ont tendance à conserver le moteur diesel allumé pour garder les fonctions vitales du train en marche sans soucis futurs. Sur les matériels modernes, la surveillance de la tension batterie permet de procéder aux arrêts nécessaires, c'est la fonction Stop & Start manuelle.

Pour les locomotives en garage, la mise en veille grâce à une « prise maintenance », si la locomotive est équipée, permet de réaliser les charges des veilles et le préchauffage sans démarrer le moteur diesel sur les locomotives thermiques.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

A ce jour, cette réflexion s'applique principalement aux trains de voyageurs¹⁸. Il faut donc s'attendre à des gains inférieurs dans le cas du transport de marchandises (moins grande consommation d'électricité autre que l'énergie de traction). En attendant de disposer de mesures spécifiques au fret, une hypothèse de gain énergétique inférieur à 1 % peut être utilisée.

Les gains associés relatifs aux émissions de GES devront être évalués au cas par cas selon qu'il s'agisse d'une diminution de la consommation (meilleure gestion prédictive du démarrage du préchauffage) ou d'un transfert de consommation (diesel vers électrique), des facteurs d'émission différents seront utilisés pour quantifier ce gain environnemental.

3. Domaine de pertinence

Cette action est pertinente pour tous types de locomotives.

Elle peut intervenir en complément d'un dispositif de « Stop & Start » (cf. A3 FA 2 : Stop & Start).

4. Mise en œuvre

L'aspect technique de la mise en œuvre pour les locomotives en garage va concerner l'équipement sol et bord :

- L'installation d'une prise électrique au lieu de stationnement ;
- L'installation d'une prise dite « maintenance » pour les locomotives diesel (certaines sont équipées) ce qui va permettre le préchauffage sans démarrer le moteur diesel mais aussi, le cas échéant, la recharge batterie avec le courant électrique extérieur.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins équipés d'une prise maintenance.

¹⁸ Dans ce cadre, des gains de l'ordre de 5-7 % (stationnement court <1h) à 10 % (stationnement long >1h) ont pu être observés., cf. [Sobriété énergétique- Guide des bonnes pratiques CA2 \(utp.fr\)](#).

Axe 4 : Mode de propulsion des engins

A4 FA 1 : Locomotives et locotracteurs électriques.....	47
Solution 1 : Locomotive électrique par caténaire	48
Solution 2 : Locomotive électrique hybride batteries-caténaire	51
Solution 3 : Locomotive hybride bi-mode diesel-électrique par caténaire.....	54
Solution 4: Locomotive hybride bi-mode diesel-électrique par batteries	57
A4 FA 2 : Locomotives et locotracteurs hydrogène	59
Solution 1 : Locomotive hydrogène	60
Solution 2 : Locomotive hybride hydrogène-électrique par caténaire	63
A4 FA 3 : Locomotives et locotracteurs GNV	66
Solution 1 : Locomotive GNV/bioGNV.....	68
Solution 2 : Locomotive hybride dual fuel GNV-diesel.....	71
Solution 3 : Locomotive hybride GNV-électrique par batteries	74
A4 FA 4 : Locomotives et locotracteurs biocarburants	77
Solution 1 : Locomotive B100.....	78
Solution 2 : Locomotive HVO	80

A4 FA 1 : Locomotives et locotracteurs électriques

Synthèse

1. Description de l'action

Aujourd'hui le transport ferroviaire de marchandises hexagonal se fait à 80 % sur des lignes électrifiées. En termes de kilomètres, deux tiers des lignes adaptées au fret sont électrifiées. Au total, trois quarts des matériels roulants sont à traction électrique alimentée par caténaire. D'autres solutions apparaissent pour répondre à des cas de figure d'un trajet partiellement électrifié, notamment pour les opérations de manœuvre.

Le choix du mode de propulsion s'effectue au moment de l'achat du véhicule. Un retrofit peut aussi être envisagé.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives et locotracteurs, sur des lignes, partiellement ou entièrement électrifiés. En fonction de la part d'électrification des lignes sur les trajets/manœuvres concernés, les solutions seront plus ou moins adaptées.

3. Solutions associées

Quatre alternatives électriques aux moteurs diesel sont actuellement disponibles et dépendent des infrastructures du réseau :

- Une solution 100 % électrique, où la locomotive électrique est alimentée par caténaire (solution réservée aux locomotives à cause des caténaires ;
- Une solution hybride diesel-batterie pour les locotracteurs ;
- Pour des trajets où le réseau est partiellement électrifié, afin d'éviter le changement de locomotives aux ruptures de type d'alimentation, deux nouvelles alternatives se développent :
 - o Une solution hybride batterie-caténaire (pour de courtes portions non électrifiées) ;
 - o Une solution bi-mode diesel-caténaire (pour tout type de portion non électrifiée).

4. Contexte et réglementation

A ce jour, sur les 28 000 km de lignes du réseau ferré français, 16 000 km sont électrifiées¹⁹. L'intégration de moteurs électriques (en solution 100 % électrique ou en bi-mode) permet ainsi de profiter au maximum du réseau électrifié (gain énergétique et environnemental par rapport à l'utilisation du moteur thermique).

Le retrofit est plus compliqué que l'achat car les normes d'homologation sont telles qu'il faut de très grosses séries pour amortir les études et l'homologation.

¹⁹ Objectif OFP

Solution 1 : Locomotive électrique par caténaire

1. Principes

Une locomotive 100 % électrique est mue par des moteurs électriques. Ces derniers sont alimentés par des batteries qui sont rechargées au préalable ou qui se rechargent lors des phases de freinage.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Plusieurs données concernant les consommations énergétiques de locomotives de marchandises permettent de déterminer les améliorations énergétiques et les réductions d'émissions de GES.

En considérant qu'une locomotive électrique consomme en moyenne 57 Wh/t.km²⁰ et qu'une locomotive diesel consomme 0,009 L/t.km²¹, soit 90 kWh/t.km, le gain en efficacité énergétique est estimé à 37 %²² avec cette solution. Ce gain énergétique est lié en grande partie au meilleur rendement du moteur électrique face au moteur diesel.

Cependant, un constructeur annonce pour des trains de voyageurs, une consommation de 5 kWh/km pour une locomotive électrique contre 1 L/km pour une locomotive diesel soit 10 kWh/km. Dans ce cas, le gain en efficacité énergétique est de 50 %²³.

Enfin, selon EcoTransit World qui a obtenu des données par DB Cargo, SNCF et ifeu assumptions, une locomotive électrique moyenne (1000 t) consomme 32,3 Wh/Ntkm, tandis que l'équivalent diesel consomme 87 Wh/Ntkm. Soit un gain énergétique de 63 % pour les locomotives électriques.

Le tableau ci-dessous récapitule les données d'EcoTransit selon les types de locomotives :

Type véhicule	Consommation d'énergie finale (Wh/Gt.km) ²⁴		Consommation d'énergie finale (Wh/Nt.km) ²⁵		Gains énergétiques liés à l'électrique (% de réduction de la consommation)		Gains énergétiques liés à l'électrique (% de réduction des GES) ²⁶
	Electrique	Diesel	Electrique	Diesel	Tonne brute kilomètre transportée	Tonne kilomètre nette	
Locomotive légère (500 t)	25,5	68,8	49,5	133,7	62,9%	63%	95,5%
Locomotive moyenne (1000t)	16,6	44,8	32,2	87	62,9%	63%	95,5%
Locomotive lourde (1500t)	12,9	34,8	25,0	67,6	62,9%	63%	95,5%

²⁰ [GT Consommation - Transports.pdf \(concerte.fr\)](#)

²¹ [Fret rapport-final ShiftProject PTEF.pdf \(theshiftproject.org\)](#)

²² En considérant que 1L de diesel correspond à 10kWh

²³ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#), Bombardier et mission de B. Simian

²⁴ Gt.km est la tonne brute kilomètre transportée, incluant le poids du wagon vide

²⁵ Nt.km est la tonne kilomètre nette, incluant que les tonnes de marchandises transportées

²⁶ Calcul à partir de la Base Empreinte de l'Ademe et en considérant que 1 L de diesel correspond à 10 kWh

Locomotive très lourde (2000t)	10,8	29,1	20,9	56,6	62,9%	63,1%	95,5%
Locomotive supérieure (>2000t)	10,0	27,0	19,4	52,5	62,9%	63%	95,5%

Concernant les locomotives de manœuvre 100 % batteries, elles sont au stade de recherche et quelques prototypes et modèles à la vente émergent. Les retours d'expérience sur les consommations énergétiques ne sont pas encore disponibles. Ainsi, les gains énergétiques sont difficilement identifiables à ce jour.

Bien qu'elle n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation d'une locomotive électrique nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Compte tenu du mix énergétique de la production française d'électricité, on estime que la réduction des émissions de GES en France métropolitaine par rapport à un engin similaire fonctionnant au gazole est proche de 94 %, d'après les émissions des trains de marchandises moyennement denses de la Base Empreinte de l'ADEME²⁷. Un calcul à partir des émissions liées aux consommations d'énergie nous amène à un gain GES de 93 %.

A l'aide des données d'EcoTransit et de la base Empreinte de l'ADEME, **les gains GES sont estimés à 95,5 % quel que soit le type de véhicule**. En effet, 1 kWh d'électricité du mix français émet 0,0386 kg CO₂e²⁸ tandis qu'un litre de diesel émet 3,16 kg CO₂e/litre, c'est-à-dire 0,316 kg CO₂e/kWh. Une locomotive électrique émet en moyenne 1,24 g CO₂e/Nt.km contre 27,5 g CO₂e/Nt.km²⁹ pour son équivalent diesel. En moyenne, une locomotive électrique permettrait donc de réduire de 95,5 % les émissions de GES.

Cette solution aura d'autres impacts positifs :

- Limiter les nuisances sonores liées au moteur de la locomotive ;
- Minimiser les coûts de maintenance (comparé aux moteurs diesel) ;
- Minimiser les coûts liés aux postes de maintenance et gazole.

3. Domaine de pertinence

La solution 100 % électrique apporte une réponse aux locomotives se déplaçant sur des sections entièrement électrifiées. En revanche, elle n'est pas applicable aux locotracteurs à cause des caténaires.

4. Mise en œuvre

Plusieurs puissances différentes existent, une étude du besoin permettra de déterminer le type et la puissance de la batterie et du générateur les plus adaptés à l'utilisation du locotracteur.

Economiquement, le CAPEX d'une locomotive électrique est jusqu'à 6 fois plus élevé que pour une locomotive diesel. Une locomotive diesel coûte entre 1,2 et 2,2 millions d'euros tandis qu'une

²⁷ En considérant que pour un train de marchandises moyennement dense, un train de marchandise à motorisation électrique son facteur d'émission soit 1.70^{e-3} kg éq. CO₂/tonne.km et que celui d'un train à motorisation gazole soit 0.0280 kg éq. CO₂/tonne.km. Source : Base Empreinte, ADEME

²⁸ Base Empreinte, ADEME. Données : 2018, usage : Transports/consommation et Train de marchandises

²⁹ 87 Wh diesel = 0,0087 L donc 27,5 g éq. CO₂ / Nt.km

locomotive électrique coûte entre 4 et 6,5 millions d'euros³⁰ selon sa puissance (actuellement, le marché français se concentre sur l'achat de locomotive MS). En coûts de fonctionnement, le coût de l'énergie et les coûts de maintenance sont plus faibles pour la locomotive électrique que pour la locomotive diesel³¹.

Economiquement, un projet de locotracteurs électriques à batterie a montré une économie de 75 k€ par an par engins sur les consommations d'énergies. De plus, pour ce même projet, la programmation de maintenance a été réduite de 97 %³².

Cependant, les coûts de l'ensemble du cycle de vie sont dominés par le coût initial des batteries. Les coûts d'exploitation des locotracteurs à batterie sont très faibles et ne nécessitent pratiquement aucun entretien mais l'investissement initial est important.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée entre facile (locomotives) et moyenne (locotracteurs) du fait de la maturité de la solution, de la disponibilité de ces engins et de l'investissement nécessaire. Des locomotives électriques sont commercialisées en Europe et bientôt en France (Alstom, Stadler, Siemens).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de locomotives et locotracteurs électriques dans le parc (en absolu et en relatif) ;
- Kilométrage (en absolu et en relatif) parcouru par les locomotives et locotracteurs électriques ;
- Tonnes.km (en absolu et en relatif) parcourues par les locomotives électriques ;
- Consommation d'électricité correspondante ;
- Pourcentage d'engins électriques roulant sur des sections complètement électrifiées.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi de l'état du parc ;
- Suivi de la consommation électrique des locomotives et locotracteurs.

³⁰ [How Much Do Locomotives Cost – Diesel-Electric, Steam, Used, GE. - Train Conductor HQ](#)

³¹ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#)

³² [Wabtec, KTZ reach MoU for battery-electric shunters, LNG locomotives \(railway-technology.com\)](#)

Solution 2 : Locomotive électrique hybride batteries-caténaire

1. Principes

Une locomotive électrique hybride batteries-caténaire est une locomotive mue par des moteurs électriques. Elle utilise plusieurs sources d'énergies en fonction des situations :

- **Alimentation électrique par caténaire ;**
- **Alimentation électrique par batteries :** utilisées lors d'arrivée, arrêt et départ de station, dans le cas d'un défaut d'alimentation (coupure, défaut réseau/caténaire, etc.) et lors de sections du réseau non électrifiées. Les batteries se rechargent lors des phases de freinage et lors d'arrêt grâce à des sous-stations ou lorsque la tension fournie par la caténaire le permet. Elles peuvent également fonctionner en combinaison avec la caténaire lors d'une faible tension reçue par cette dernière.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Une locomotive 100 % électrifiée par caténaire réduit de 63 % la consommation énergétique et de 95,5 % les émissions de GES. Une locomotive hybride batterie-caténaire peut stocker de l'énergie récupérée, par exemple lors des phases de freinage, et la réutiliser lors de sections de voies non électrifiées. Elle fonctionne alors sans consommer d'électricité du réseau. Cependant, l'utilisation de batterie baisse le rendement global.

Une étude constructeur chiffre, pour un train de voyageur, la consommation d'énergie à 5,0 kWh/km pour un train électrique et à 5,7 kWh/km pour un train électrique à batterie soit 14 % de consommation supplémentaire par rapport à un train électrique par caténaire.

Pour information, la consommation électrique d'un train de 1900 t sur l'artère NE (profil difficile) est de 47 kWh/km³³

Les locomotives de manœuvre hybride caténaire batterie sont encore peu développés à ce jour. Quelques prototypes et modèles à la vente émergent. Les retours d'expérience sur les consommations énergétiques ne sont pas encore disponibles. Ainsi, les gains énergétiques sont difficilement identifiables à ce jour.

Le gain énergétique de ces locotracteurs dépendra en grande partie de la part de voies électrifiée.

Les chiffres ci-dessus ne prennent pas en compte l'impact environnemental et les émissions liées à la fabrication des batteries. Cette étape énergivore est actuellement quasi-exclusivement réalisée hors France Métropolitaine avec un mix électrique plus carboné que le mix français. Par exemple pour une voiture électrique, la fabrication de la batterie compte pour 45 % de l'empreinte carbone de la fabrication totale du véhicule³⁴.

3. Domaine de pertinence

La solution hybride batterie-caténaire apporte une réponse aux engins se déplaçant sur des sections partiellement électrifiées inférieures à 80 km pour une question de contrainte d'autonomie.

³³ Objectif OFP

³⁴ [Comment réduire le bilan carbone d'une voiture électrique ? \(hellocarbo.com\)](http://hellocarbo.com)

Cette solution est particulièrement pertinente lorsque la partie non-électrifiée se limite aux derniers kilomètres notamment sur l'installation terminale embranchée qui permet d'accéder au chargeur. Elle permet d'obtenir une solution 100 % électrique en embarquant peu de batteries à bord de la locomotive (coût d'investissement plus faible). Si les sections sont supérieures, la solution hybride diesel-électrique (par caténaire) avec ajout d'un moteur thermique est adaptée.

Aujourd'hui encore, les locomotives électriques par caténaires et batterie ne sont pas développées pour le fret en France³⁵. Des projets pour le ferroviaire voyageurs existent pouvant assurer la traction du train sur des tronçons de 80 km non électrifiés et permettent d'économiser jusqu'à 20 % d'énergie. Pour le fret ferroviaire, le poids embarqué étant nettement supérieur, les parties non électrifiées parcourables grâce à des batteries sont inférieures à 80 km.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives batterie-caténaire est en cours de développement. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de locomotives pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices. 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 véhicules.

Les questions de puissance doivent être évaluées en amont.

Dans le cas d'une recharge rapide par les caténaires lorsque le matériel est à l'arrêt, il faut s'assurer que le dimensionnement des caténaires est adapté. Si la recharge s'effectue au cours de la circulation, la vitesse d'exploitation sur certaines portions de voies pourrait être réduite, afin de réduire le pic de puissance nécessaire. L'adaptation du dimensionnement des batteries aux caractéristiques des voies ferrées pourrait faire disparaître l'avantage d'un moindre coût du matériel ferroviaire s'il fallait concevoir des matériels spécifiquement pour chaque cas.³⁶

Economiquement, pour des trains de voyageurs, un constructeur annonce un coût des véhicules 30 % supérieurs par rapport à un train diesel. Cependant, le coût de l'énergie est ensuite 35 % plus faible et les coûts de maintenance sont jugés de moyen par rapport à un train diesel qui possède des coûts de maintenance élevés.

Pour les locotracteurs, quelques constructeurs proposent des locomotives de manœuvres bi-modes. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se développer.

Cette solution aura d'autres impacts importants :

- Limitation des nuisances sonores : pour autant les émissions sonores des moteurs électriques en conditions réelles d'exploitation ne sont pas nulles ;
- Réduction des polluants atmosphériques ;
- Suppression des coûts de maintenance des moteurs diesel ;
- Les gains économiques seront liés aux postes suivants : maintenance et gazole ;
- Eviter d'électrifier une voie, ce qui représente des investissements importants : 350 k€ à 1,5 M€ par km.³⁷

³⁵ « Les trains de marchandises peuvent dès aujourd'hui combiner propulsion électrique par caténaire et diesel et à l'avenir par caténaire et batterie, voire par caténaire et hydrogène. » [Fret rapport-final_ShiftProject_PTEF.pdf \(theshiftproject.org\)](#)

³⁶ [Fret rapport-final_ShiftProject_PTEF.pdf \(theshiftproject.org\)](#)

³⁷ [Pourquoi des trains carburent-ils toujours au diesel en France ? \(francetvinfo.fr\)](#)

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

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Kilométrage parcouru par les locomotives batterie-caténaire ;
- Pourcentage tonnes.km parcourues par les locomotives batterie-caténaire ;
- Consommation d'électricité correspondante ;
- Pourcentage de véhicules batterie-caténaire dans le parc ;
- Pourcentage de véhicules batterie-caténaire roulant sur des sections partiellement électrifiées (avec des tronçons non électrifiés inférieurs à 100 km) ;
- Nombre de kilomètres maximum assurés par traction du train grâce à la batterie seule.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi du parc ;
- Suivi de la consommation électrique.

Solution 3 : Locomotive hybride diesel-électrique par caténaire

1. Principes

La motorisation hybride consiste à associer une motorisation thermique et une motorisation électrique. L'engin hybride utilise alors plusieurs sources d'énergies en fonction des situations :

- **Alimentation électrique par caténaire** ;
- **Alimentation par moteurs thermiques** : lorsque la voie n'est pas électrifiée.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Une locomotive 100 % électrifiée par caténaire réduit de 63 % la consommation énergétique et de 95,5 % les émissions de GES. Le gain énergétique des locomotives hybride diesel-caténaire dépend en grande partie de la part électrifiée du réseau. Plus le véhicule hybride sera affecté à une ligne possédant des sections électrifiées et ayant recours à des freinages répétitifs (énergie qu'elle pourra stocker dans les batteries et réutiliser), plus les gains de consommation seront importants.

A contrario, une locomotive hybride affectée principalement à des trajets sur ligne non électrifiée avec peu d'arrêts ne présentera qu'un gain de consommation très faible puisque la partie électrique du moteur sera très peu sollicitée et le surcoût de l'hybride ne compensera pas le gain issu de la diminution de la consommation d'énergie.

Il est important de prendre en compte l'impact environnemental et les émissions liées à la fabrication des batteries. Cette étape énergivore est actuellement quasi-exclusivement réalisée hors France Métropolitaine avec un mix électrique plus carboné que le mix français. Par exemple, pour une voiture électrique, la fabrication de la batterie compte pour 45 % de l'empreinte carbone de la fabrication totale du véhicule³⁸.

En utilisant un système hybride, un train hybride diesel-électrique à deux voitures peut réduire sa consommation d'énergie de 15 à 20 %³⁹ et réduire les GES de 20 %⁴⁰.

Quant aux locotracteurs hybride diesel-caténaire, elles sont au stade de recherche et expérimentations. Les retours d'expérience sur les consommations énergétiques ne sont pas encore disponibles. Ainsi, les gains énergétiques sont difficilement identifiables à ce jour (et dépendront fortement de la part de voies électrifiées).

3. Domaine de pertinence

Le train hybride diesel-caténaire apporte une réponse aux trains se déplaçant sur des sections partiellement électrifiées.

Contrairement aux trains électriques roulant sur des sections partiellement électrifiées à l'aide de batteries, l'hybride diesel-caténaire n'a pas de contrainte d'autonomie. C'est pourquoi elle est pertinente pour la circulation sur des lignes avec des sections non électrifiées supérieures à 80 km. Si les sections sont inférieures, la solution caténaire-batterie sans moteur thermique permet une réduction des GES plus importante.

³⁸ [Comment réduire le bilan carbone d'une voiture électrique ? \(hellocarbo.com\)](http://hellocarbo.com)

³⁹ [ABB EfficaciteEnergetique LivreBlanc Transport 2021.pdf \(energyefficiencymovement.com\)](http://energyefficiencymovement.com)

⁴⁰ SNCF

Cependant, en France, les locomotives diesel et électriques par caténaires sont très peu développées pour le fret. Seuls quelques exemples de mise en service existent. Elle est toutefois développée en Europe (Allemagne, Suisse)⁴¹. La technologie était développée et mature pour le transport de voyageurs, la solution semble envisageable pour le fret.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives de fret avec une motorisation bi-mode se développe. De nombreux modèles pour passagers existent déjà. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de véhicules 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 changement de mode de propulsion peut se faire soit à l'arrêt soit en roulant. Dans le second cas, il est nécessaire d'implanter une signalisation indiquant le passage d'une section de ligne sous caténaire à une section non électrifiée afin de s'assurer de la possibilité du changement de mode de traction en roulant et pouvoir arrêter le train en cas de panne.⁴²

Selon les locomotives, il est techniquement possible d'utiliser leetrofit en remplaçant des moteurs thermiques par des batteries lithium-ion de grandes capacités qui seront notamment capable de récupérer l'énergie de freinage (freinage régénératif).

Economiquement, la première locomotive bi-mode diesel-caténaire pour le fret ferroviaire, a coûté environ 5,5 millions d'euros. Le développement des offres et des technologies permettra de faire baisser les coûts d'investissement⁴³.

Cette solution aura d'autres impacts importants⁴⁴ :

- Limitation des nuisances sonores : à l'arrêt car arrêt du moteur et fonctionnement sur batterie mais aussi lors du trajet. En station la réduction de nuisances sonores est estimée à plus de -6dB ;
- -30 à -50 % des coûts de maintenance des moteurs diesel par leur réduction en nombre ;
- Réduction des polluants atmosphériques ;
- Les gains économiques seront liés aux postes suivants : maintenance 46 %, gazole 48 % et électricité 6 %.

La faisabilité de cette solution peut être considérée comme bonne car l'hybridation des locomotives avec un petit groupe électrogène 6 000 kW est mature.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre d'engins hybrides diesel-caténaire dans le parc (en absolu et en relatif) ;
- Pourcentage d'engins hybrides diesel-caténaire parmi les engins roulant sur une ligne partiellement électrifiée ;
- Kilométrages parcourus par les engins hybrides diesel-caténaire (en absolu et en relatif) ;

⁴¹ AFRA

⁴² [Les TER bimode sous caténaire, le vrai, le faux... | Sylvain, cheminot \(sylvainbouard.fr\)](#)

⁴³ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#)

⁴⁴ https://uic.org/events/IMG/pdf/01_17-10-04_hybrid_traction_sncf_phclement_fdegardin.pdf

- Pourcentage de km parcourus sur voie électrifiée et sur voie non-électrifiée pour les engins hybrides diesel-caténaire.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi du parc.

Solution 4 : Locotracteur hybride diesel-électrique par batteries

1. Principes

Un locotracteur hybride diesel-batterie est un locotracteur 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.

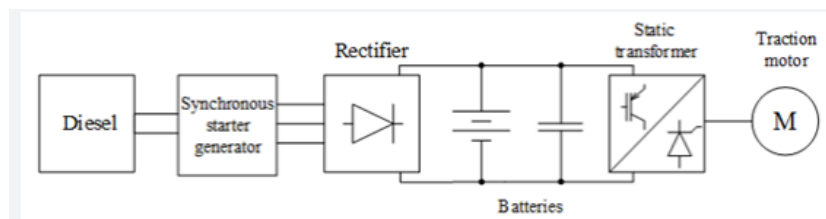


Diagramme fonctionnel d'une locomotive hybride diesel

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Un retour d'expérience sur un locotracteur à 3 essieux, hybride diesel-batterie, a montré une consommation d'énergie jusqu'à deux fois inférieure. De plus, elle émet jusqu'à deux fois moins de GES que les locomotives de manœuvre conventionnelles, ce qui permet l'économie de 200 tonnes de CO₂e chaque année par locotracteur.

Un autre avantage de la locomotive hybride est qu'elle peut circuler à hauteur de 50 à 75 % sur batteries⁴⁵⁴⁶.

Une étude réalisée sur des locomotives hybrides class 718 et des locomotives non-hybride class 730, indique les consommations suivantes des locotracteurs en service⁴⁷ :

Type of shunting	Fuel consumption dm ³ /h		Ratio of fuel consumption
	Class 730	Class 718	
Shunting on hump	14,92	13,09	0,88
Pushing off and allocation of load	13,62	10,33	0,76
Shunting to hump	23,53	25,56	1,09
Pulling of load	12,87	10,86	0,84

Comparaison de la consommation d'énergie des locotracteurs en service

D'autres études sur des locotracteurs hybrides montrent des réductions de consommation d'énergie de 24 %⁴⁸, 27,7 %⁴⁹ et de 40 %⁵⁰.

Les émissions de polluants atmosphériques sont aussi réduites de 70 % et le bruit de plus de 80 %, soit environ 15 dB⁵¹.

⁴⁵ [CFF Cargo signe pour douze nouvelles locomotives ambimoteurs H3. - SBB Cargo Blog](#)

⁴⁶ [Locomotives: Superior hauling power in challenging environments | Alstom](#)

⁴⁷ [Possibilities for decreasing fuel c.pdf](#)

⁴⁸ [POSSIBILITIES FOR DECREASING FUEL CONSUMPTION OF RAIL VEHICLE OF INDEPENDENT TRACTION, Possibilities for decreasing fuel c.pdf](#)

⁴⁹ [Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive \(sciencedirectassets.com\)](#)

⁵⁰ [Substantiation of the Way of Modernization of Shunting Diesel Locomotives \(juniperpublishers.com\)](#)

⁵¹ [Locomotives : Performance supérieure dans les environnements difficiles | Alstom](#)

Cependant, il est nécessaire de prendre en compte l'impact environnemental et les émissions liées à la fabrication des batteries. Cette étape énergivore est actuellement quasi-exclusivement réalisée hors France Métropolitaine avec un mix électrique plus carboné que le mix français.

3. Domaine de pertinence

Cette solution concerne tous les locotracteurs.

4. Mise en œuvre

De plus en plus de constructeurs proposent des locotracteurs électriques ou hybrides. La technologie évoluant, le nombre de modèles est amené à se développer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs matériels.

Economiquement, le CAPEX d'un locotracteur hybride dépendra des caractéristiques souhaitées. Une locomotive de manœuvre hybride équipée d'un générateur de 350 kW et d'une batterie de 350 kW coûte environ 3 millions d'euros⁵². Les coûts d'acquisition restent élevés. Les OPEX seront considérablement réduits grâce à l'économie d'énergie et la réduction de la maintenance sur les moteurs.

Techniquement, les locotracteurs hybrides peuvent atteindre des vitesses de 100 km/h et ont une durée de vie d'environ 40 ans. Cependant, leur masse totale sera plus élevée. Une augmentation de 6,5 t a été observée sur une expérimentation⁵³.

L'ajout d'un système de stockage d'énergie permet de sous-dimensionner la puissance du moteur et de réaliser des gains économiques et d'espace. Par exemple, la locomotive hybride class 718 possède un moteur de seulement 189 kW, remplaçant ainsi un moteur de 600 kW initialement utilisé sur la locomotive non-hybride⁵⁴, soit une réduction de la puissance du moteur de 68 %.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme moyenne du fait du manque de maturité de la solution et de la faible disponibilité de ces engins. Des locomotives électriques sont commercialisées en Europe et bientôt en France (Alstom, Stadler, Siemens).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Kilométrage parcouru par les locotracteurs batterie-diesel ;
- Pourcentage de locotracteurs batterie-diesel dans le parc ;
- Nombre de kilomètres maximum assurés par traction du locotracteur grâce à la batterie seule.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte de locotracteurs.

⁵² CFF Cargo signe pour douze nouvelles locomotives ambimoteurs H3. - SBB Cargo Blog

⁵³ Case Study Locomotive | rail (hoppecke.com)

⁵⁴ Possibilities_for_decreasing_fuel_c.pdf

A4 FA 2 : Locomotives et locotracteurs hydrogène

Synthèse

1. Description de l'action

Les locomotives hydrogène rentrent dans la catégorie des locomotives à propulsion électrique. Elles sont alimentées par une pile à combustible, elle-même avitaillée en hydrogène. Les technologies hydrogène regroupent 2 types de technologies :

- Les moteurs fonctionnant directement à l'hydrogène (moteur à combustion hydrogène) ;
- 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.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives qui se déplacent sur des lignes non électrifiées ou partiellement électrifiées.

3. Solutions associées

Deux alternatives hydrogène aux moteurs diesel existent et dépendent des infrastructures du réseau :

- Pour un réseau non électrifié, la locomotive hydrogène alimentée à 100 % par hydrogène, en cours de R&D et de phases de tests ;
- Pour un réseau partiellement électrifié, la locomotive bi-mode hydrogène – caténaire, alimentée soit par les caténaires soit par l'hydrogène embarqué. Cette solution est aussi au stade de R&D et de phases de test.

4. Contexte et réglementation

Le développement d'une flotte fonctionnant à l'hydrogène requiert :

- Des engins spécifiques adaptés et d'un dispositif de stockage d'hydrogène dédié ;
- Un système spécifique de recharge, qui peut être une infrastructure fixe ou mobile.

Solution 1 : Locomotive hydrogène

1. Principes

Les locomotives hydrogène rentrent dans la catégorie des locomotives à propulsion électrique. Elles sont alimentées par une pile à combustible, elle-même avitaillée en hydrogène. Les technologies hydrogène regroupent 2 types de technologies :

- Les moteurs fonctionnant directement à l'hydrogène ;
- 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 2ème 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.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La production d'un kilogramme d'hydrogène (équivalent à la consommation d'une voiture neuve standard pour parcourir 100 km⁵⁵), 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. **Les engins à hydrogène consomment 17 % d'énergie de plus que leur équivalent diesel**⁵⁶.

Cependant, les nombreuses recherches autour de l'hydrogène montrent une grande marge d'amélioration du rendement possible. Cette différence énergétique est vouée à diminuer dans les prochaines années. A ce jour, les premiers résultats montrent une consommation entre 0,12 kg d'hydrogène/100 km⁵⁷ et 0,18 kg d'hydrogène/100 km⁵⁸.

Quant au bilan environnemental de la mobilité hydrogène, « du puits à la roue », il est complexe et va principalement dépendre de la nature de la source primaire (renouvelable ou fossile), du pays de production de l'hydrogène ainsi que du mode de transport (et de la distance) utilisé pour l'acheminement de l'hydrogène. Si l'hydrogène est produit à partir d'électrolyse avec intrant d'énergie décarbonée (hydrogène bas carbone), le **gain GES est de l'ordre de 80 à 95 %** par rapport à une exploitation de train thermique⁵⁹. En réalité, pour le transport ferroviaire de passagers, les réductions des émissions de GES atteignent 66 % au maximum par km par passagers⁶⁰.

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

⁵⁵ [Production d'hydrogène renouvelable : comment ça marche ? \(engie.com\)](#)

⁵⁶ Périmètre : voiture. Une voiture neuve consomme en 2019, en moyenne, 5L/100km correspondant à 50kWh. [Car Labelling Ademe : Graphique - Évolution de la consommation moyenne](#)

⁵⁷ Périmètre : train voyageurs à 1 wagon. [Hydrogen trains coming soon? - Rail Engineer](#)

⁵⁸ Périmètre : train voyageurs à 2 wagons. [Microsoft Word - Autorail Hydrogène ALSTOM.doc \(fnaut-paca.org\)](#)

⁵⁹ Périmètre ; TER Thermique vs TER Hydrogène produit par électrolyse d'énergies renouvelables [synthese-etude-perspectives-train-hydrogène-France-2020 \(connaissancedesenergies.org\)](#)

⁶⁰ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#)

3. Domaine de pertinence

À ce jour la propulsion à hydrogène semble moins intéressante pour les locomotives de fret ou les trains à grande vitesse, et plus attrayante pour les applications de faible puissance (locomotives de manœuvre et petites unités) L'industrie des locomotives n'envisage pas de locomotives de forte puissance à l'hydrogène seul dans les prochaines années. Ainsi, le remplacement du diesel par l'hydrogène dans les cas réclamant le plus de puissance et d'autonomie ne pourra pas commencer avant 2030. Cela semble envisageable à plus long terme et pour de courtes distances dans un premier temps. Ainsi quelques projets sont en cours pour concevoir des locomotives de manœuvre à hydrogène pour assurer des opérations logistiques sur sites industriels⁶¹. Des projets chiffrent, dans l'hypothèse d'un scénario d'hydrogène vert, une réduction d'environ 263 et 109 tonnes de CO₂e pour une locomotive avec une charge de manœuvre de 450 tonnes et une réduction de 109 tonnes de CO₂e par an pour une locomotive possédant une charge de manœuvre de 125 tonnes⁶².

En cas de parcours sur des portions électrifiées, une solution bi-mode caténaire-hydrogène est envisageable (cf. solution 2 ci-après).

Des projets pour le ferroviaire voyageurs existent en France et dans le monde, incluant des projets de rétrofit, et quelques mises en service pour des phases de tests sont lancées.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives hydrogène est en cours de développement. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de véhicules pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs véhicules.

Il est possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant des moteurs thermiques par une pile à combustible alimentant les moteurs de traction électriques au travers d'accumulateurs tampon lithium-ion disposés sous les caisses. Ensuite, il faut positionner des réservoirs d'hydrogène sous pression en toiture pour que l'hydrogène puisse être en contact avec l'air pour l'électrolyse.

A noter que le dihydrogène possède une très grande densité massique d'énergie (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais une très faible densité volumique. Il faut le transformer pour pouvoir le stocker dans un volume utilisable. En le comprimant à 700 bars, 7 litres d'hydrogène peuvent contenir ainsi autant d'énergie qu'1 litre d'essence⁶³. Alors que comprimé à 350 bars, l'hydrogène contient 5 fois moins d'énergie qu'un litre de pétrole pour le même volume.⁶⁴

A ce jour, la durée de vie des piles à combustibles est encore trop brève pour des trains à grandes vitesses ou roulant sur des grandes distances (sauf si utilisation comme source auxiliaire d'électricité pour un bi-mode caténaire-hydrogène par exemple) et le rendement actuel d'un système de propulsion avec PAC est de l'ordre de 30 % (semblable aux moteurs diesel).

Du point de vue économique, une étude annonce pour une large flotte (10 trains captifs avec déploiement national), un surcout total de possession du train hydrogène par rapport au train

⁶¹ [HDF Energy et Captrain France convertissent une locomotive à l'hydrogène - Environnement Magazine \(environnement-magazine.fr\)](https://www.environnement-magazine.fr/actualites/locomotive-hydrogene)

⁶² [Une modernisation basée sur le H2 de locomotives diesel pour réduire les émissions de CO2 : problèmes de conception et de contrôle - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620300000)

⁶³ [Tout savoir sur l'hydrogène | IFPEN \(ifpenergiesnouvelles.fr\)](https://www.ifpen.org/fr/tout-savoir-sur-lhydrogene)

⁶⁴ [Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France](https://www.remove.fr/rapport-modal-et-verdissement-des-flottes-de-transport-massifie)

thermique est de l'ordre de +9 %. Un train à hydrogène coûte 14 millions d'euros⁶⁵. Le CAPEX du matériel roulant est de l'ordre de +50 %, les OPEX sur l'énergie (sur 40 ans) de l'ordre de +44 % à +50,6 %⁶⁶ et les OPEX liés à la maintenance de l'ordre de -30 %⁶⁷. A ce jour, un retour sur investissement n'est pas possible.

Une seconde étude pour le transport ferroviaire de voyageurs parle d'un coût des véhicules supérieur de +30 % et d'un coût de l'énergie de +20 à +300 % plus cher par kilomètre⁶⁸. La différence d'achat du véhicule est due au coût élevé, à l'heure actuelle, des piles à combustibles, mais aussi des réservoirs permettant de stocker l'hydrogène à bord du train. Le coût d'un stockage de 200 kg s'élèverait ainsi à 200 k€⁶⁹. De même, le coût de l'hydrogène vert (le seul permettant de réduire les émissions de GES, avec l'hydrogène décarboné produit à partir d'électricité nucléaire) représente un coût d'exploitation plus élevé que celui de l'hydrogène gris : 10 €/kg contre 4 €/kg.

De plus pour cette solution, des stations à hydrogène doivent être installées sur le parcours des locomotives, ce qui représente un nouvel investissement important et donc un réel enjeu de logique territoriale à prendre en compte. Le coût pouvant s'élever à au moins 1 à 1,5 million d'euros (pour une capacité de ravitaillement d'environ 100 à 200 kg d'H₂ par jour)⁷⁰. Grâce à ces stations, le plein peut se réaliser rapidement, le temps nécessaire étant de l'ordre de 30 minutes.

Cependant, cette solution a d'autres impacts importants :

- Limitation des nuisances sonores ;
- Réduction des polluants atmosphériques.

La faisabilité de cette solution peut être considérée comme très faible du fait de la maturité de la solution et de la disponibilité de ces véhicules (offre encore très restreinte).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Kilométrage parcouru par les locomotives hydrogène ;
- Pourcentage tonnes.km parcourues par les locomotives hydrogène ;
- Consommation d'hydrogène correspondante ;
- Pourcentage d'engins hydrogène dans le parc.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation hydrogène.

⁶⁵ [L'électrification frugale : décarboner les petites lignes | SNCF](#)

⁶⁶ [Cost optimization of multi-mode train conversion for discontinuously electrified routes - ScienceDirect](#)

⁶⁷ [synthese-etude-perspectives-train-hydrogene-France-2020 \(connaissancedesenergies.org\)](#)

⁶⁸ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#), Bombardier

⁶⁹ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](#)

⁷⁰ [Vorstudie_H2-Rangierlok_Duisport_DLR_final_20220323.pdf](#)

Solution 2 : Locomotive hybride hydrogène-électrique par caténaire

1. Principes

Les locomotives hydrogène rentrent dans la catégorie des locomotives à propulsion électrique. Elles sont alimentées par une pile à combustible, elle-même avitaillée en hydrogène.

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.

La locomotive bi-mode hydrogène-caténaire permet de circuler de façon décarbonée sur des lignes partiellement électrifiées. Elle circule grâce à la caténaire et à son pantographe sur les parties électrifiées et grâce à la pile à combustible alimentée par de l'hydrogène sur les parties non électrifiées.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique des locomotives hybrides (hydrogène – électrique par caténaire) dépend en grande partie de la part électrifiée du réseau. En effet, les véhicules à hydrogène consomment 17 % d'énergie de plus qu'un véhicule diesel⁷¹ tandis qu'une locomotive alimentée par caténaire consomme 63 % de moins.

La réduction des GES dépend elle aussi de la part électrifiée du trajet. Une locomotive alimentée par caténaire réduit de 95,5 %⁷² ses émissions de GES tandis que pour une mobilité hydrogène il atteint un maximum de réduction compris entre **80 et 95 %**.

Ce bilan environnemental pour l'hydrogène est complexe et va dépendre principalement de la nature de la source primaire (renouvelable ou fossile) et de la distance d'acheminement entre la production de l'hydrogène et la station-service. C'est seulement si l'hydrogène est produit à partir d'électrolyse avec intrant d'énergie décarbonée (hydrogène bas carbone) que le gain GES est de l'ordre de 80 à 95 % par rapport à une exploitation de train thermique⁷³.

L'hydrogène produit sur site par électrolyse avec le mix français puis compressé et transporté sur 100 km à 200 bars permet une réduction de 84 % des GES par km par rapport à l'utilisation d'un train thermique⁷⁴. Pour le même périmètre mais si l'hydrogène est produit par énergies renouvelables, la réduction est plus importante et atteint 90 %.

⁷¹ Périmètre : voiture. Une voiture neuve consomme en 2019, en moyenne, 5 L/100 km correspondant à 50 kWh. Car Labelling Ademe : Graphique - Évolution de la consommation moyenne

⁷² EcoTransit World

⁷³ Périmètre ; TER Thermique vs TER Hydrogène produit par électrolyse d'énergies renouvelables [synthese-etude-perspectives-train-hydrogene-france-2020](https://www.connaissancedesenergies.org/synthese-etude-perspectives-train-hydrogene-france-2020) (connaissancedesenergies.org)

⁷⁴ Base Empreinte, ADEME

3. Domaine de pertinence

À ce jour, du fait des importants espaces de stockage nécessaires et de leur impact sur l'autonomie des locomotives, le remplacement des locomotives diesel par des locomotives 100 % hydrogène n'est pas encore d'actualité.

Le développement des locomotives bi-mode hydrogène-caténaire pourrait toutefois permettre une alternative aux locomotives bi-mode Diesel-caténaire sur des sections partiellement électrifiées mais les technologies sont en phase de développement et ne sont pas encore accessibles.

Des projets pour le ferroviaire voyageurs existent en France et dans le monde, incluant des projets de rétrofit, et quelques mises en service pour des phases de tests sont lancées.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives hydrogène est en cours de développement. Les coûts associés devraient aussi évoluer. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de véhicules pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs véhicules.

Il est possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant des moteurs thermiques par une pile à combustible alimentant les moteurs de traction électriques au travers d'accumulateurs tampon lithium-ion disposés sous les caisses. Ensuite, il faut positionner des réservoirs d'hydrogène sous pression en toiture pour que l'hydrogène puisse être en contact avec l'air pour l'électrolyse.

A noter que le dihydrogène possède une très grande densité massique d'énergie (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais une très faible densité volumique. Il faut le transformer pour pouvoir le stocker dans un volume utilisable. En le comprimant à 700 bars, 7 litres d'hydrogène peuvent contenir ainsi autant d'énergie qu'1 litre d'essence⁷⁵.

Lorsque la voie est électrifiée, le train fonctionne grâce à la caténaire et au pantographe. A ce jour, la durée de vie des piles à combustibles est encore trop brève pour des trains à grandes vitesses ou roulant sur des grandes distances (sauf si utilisation comme source auxiliaire d'électricité pour un bi-mode caténaire-hydrogène par exemple) et le rendement actuel d'un système de propulsion avec PAC est de l'ordre de 30 % (semblable aux moteurs diesel).

Du point de vue économique, pour une large flotte 100 % hydrogène (10 trains captifs avec déploiement national), le surcout total de possession du train hydrogène par rapport au train thermique est de l'ordre de +9 %. Le CAPEX du matériel roulant est de l'ordre de +50 %, les OPEX sur l'énergie (sur 40 ans) de l'ordre de +44 % à +50,6 %⁷⁶ et les OPEX liés à la maintenance de l'ordre de - 30 %⁷⁷. Les locomotives bi-modes permettent de réduire considérablement les OPEX énergétique mais ne permettent pas d'obtenir un retour sur investissement.

De plus, des stations à hydrogène doivent être installées pour cette solution, ce qui représente un nouvel investissement important, le coût pouvant s'élever à au moins 1 à 1,5 million d'euros (pour une capacité de ravitaillement d'environ 100 à 200 kg d'H₂ par jour)⁷⁸.

⁷⁵ [Tout savoir sur l'hydrogène | IFPEN \(ifpennergiesnouvelles.fr\)](https://www.ifpen.org/fr/tout-savoir-sur-lhydrogene)

⁷⁶ [Cost optimization of multi-mode train conversion for discontinuously electrified routes - ScienceDirect](https://doi.org/10.1016/j.scitechtr.2021.100654)

⁷⁷ [synthese-etude-perspectives-train-hydrogene-france-2020 \(connaissancedesenergies.org\)](https://www.connaissancedesenergies.org/synthese-etude-perspectives-train-hydrogene-france-2020)

⁷⁸ [Vorstudie_H2-Rangierlok_Duisport_DLR_final_20220323.pdf](https://www.dlr.de/fo/fo-VO-2022-03-23.pdf)

Cependant, cette solution a d'autres impacts importants :

- Limitation des nuisances sonores ;
- Réduction des polluants atmosphériques.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait de la maturité de la solution et la disponibilité de ces véhicules (offre encore très restreinte).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Kilométrage parcouru par les locomotives bi-mode hydrogène-caténaire ;
- Pourcentage tonnes.km parcourues par les locomotives bi-mode hydrogène-caténaire ;
- Consommation d'hydrogène correspondante ;
- Pourcentage de locomotives bi-mode hydrogène-caténaire dans le parc ;
- Pourcentage de locomotives bi-mode hydrogène-caténaire roulant sur des sections partiellement ou non électrifiées.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi du parc ;
- Suivi de la consommation hydrogène des engins.

A4 FA 3 : Locomotives et locotracteurs GNV

Synthèse

1. Description de l'action

Le Gaz Naturel pour Véhicule (GNV) est composé de plus de 85 % de méthane, de 2 à 8 % d'éthane et d'une faible quantité d'autres hydrocarbures (propane, butane). Plus léger que l'air, le GNV se dissipe rapidement en cas de fuite, contrairement aux autres énergies. Il est stocké et utilisé sous forme gazeuse ou liquide et sa distribution se généralise.

Le GNV se décline sous trois formes :

- **Le Gaz Naturel Comprimé ou Compressé (GNC)**, sous forme gazeuse ;
- **Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL)**, sous forme liquide ;
Il est stocké dans des réservoirs isolés sous vide à des températures comprises entre -125 °C et -160 °C. Le GNL dispose d'une plus grande quantité d'énergie par volume que le carburant GNC assurant une autonomie importante et le rendant particulièrement adapté aux longues distances.
- **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 :

- 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) ;
- Un système spécifique de recharge, qui peut être une infrastructure fixe (station) ou mobile.

Etant donné qu'entre les solutions gaz ou bio-gaz, les engins, les infrastructures et le carburant gazeux 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

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives et locotracteurs, même si, à ce jour, les engins GNV sont en phase de recherche et ne sont donc pas encore disponibles (hors quelques tests).

3. Solutions associées

Trois alternatives GNV aux moteurs diesel existent et dépendent des infrastructures du réseau :

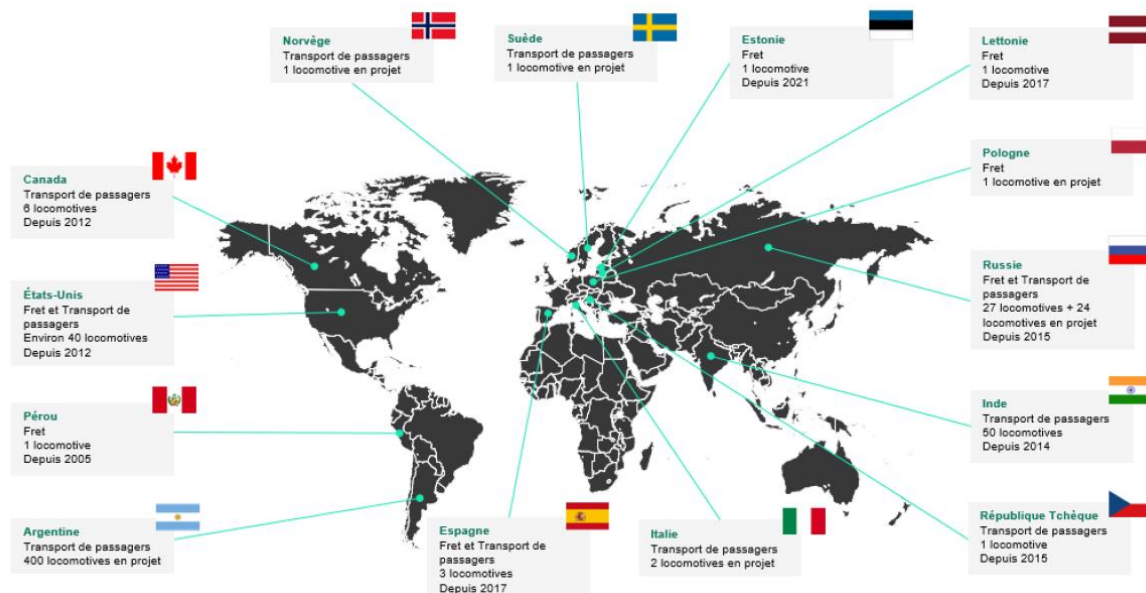
- La locomotive ou locotracteur GNV/bioGNV, alimentée à 100 % par GNV ou bioGNV ;
- La locomotive ou locotracteur hybride dual-fuel, alimentée soit par du diesel soit par du GNV ou bioGNV ;
- La locomotive hybride GNV/bioGNV et batteries, alimentée soit par GNV ou bioGNV soit par de l'énergie stockée dans des batteries.

Ces solutions sont en cours de développement R&D et de tests.

4. Contexte et réglementation

En France, le cadre réglementaire concernant l'utilisation du gaz pour le secteur ferroviaire (pour du matériel neuf comme rétrofité) est à construire⁷⁹.

Pour autant, la solution existe et est déployée dans un quinzaine de pays⁸⁰ (le plus souvent avec moins de 5 locomotives en service ou en projet). En France, il n'y a pas encore de trains fonctionnant au bioGNV en exploitation commerciale, malgré plusieurs projets.



Cartographie des initiatives du transport ferroviaire GNV

⁷⁹ Par exemple à travers l'élaboration d'un référentiel bioGNV spécifique au ferroviaire, en s'inspirant notamment de l'expérience routière, le tout dans un cadre de normalisation à l'échelle européenne.

⁸⁰ Etude sur les perspectives du train bioGNV en France, ADEME, 2023

Solution 1 : Locomotive GNV/bioGNV

1. Principes

Les locomotives et locotracteurs GNV fonctionnent avec un moteur à allumage (essence) et un stockage embarqué.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

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 diesel. 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 diesel**⁸¹.

Concernant, l'impact sur les **émissions de GES, le gain peut atteindre 20 % par rapport au gazole**⁸². Quant au **BioGNV**, il permet de réduire les émissions de GES de **80 % par rapport à un véhicule diesel**⁸³.

Cependant, des études montrent que les réductions d'émissions de GES du GNL pour le transport routier ne s'élèvent pas à plus de 6 % (de 2,6 à 5,6 %). Pour cause, le stockage du GNL entre -125°C et -160°C est énergivore et bien que les véhicules au GNL émettent moins de GES à l'échappement en raison de la composition chimique plus favorable du carburant, ils produisent d'autres gaz à effet de serre. En particulier, le fonctionnement des véhicules entraîne des émissions considérables de méthane. Lorsqu'il est libéré dans l'atmosphère sans être brûlé, le méthane est un gaz à effet de serre très puissant⁸⁴.

Par rapport au diesel, le gaz naturel véhicule (GNV) permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 à 70 %, les particules fines de 90 %⁸⁵.

Des expérimentations sur des trains de voyageurs au GNL ont réussi à obtenir des réductions des émissions d'oxydes d'azote (NOx) entre 60 et 80 % et des émissions d'oxydes de soufre (SOx) de 99 %. Cette même expérimentation a obtenu une réduction de 20 à 30 % des émissions de GES par rapport à un moteur diesel sans solution de traitement catalytique des gaz⁸⁶.

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)	
		GNV	bioGNV
Locomotive	-22 %	3 à 20 %	80 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

⁸¹ Périmètre : fret routier. [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://theicct.org)

⁸² Ferroviaire : [l'introduction du bioGNV par le rétrofit \(gaz-mobilite.fr\)](https://gaz-mobilite.fr)

⁸³ GRDF : [bb160f85-2f80-34cf-923d-3061d7dbc69f \(grdf.fr\)](https://bb160f85-2f80-34cf-923d-3061d7dbc69f.grdf.fr)

⁸⁴ [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://theicct.org)

⁸⁵ ADEME

⁸⁶ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](https://184000739.pdf(vie-publique.fr))

3. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives et locotracteurs.

Toutefois, à ce jour les engins 100 % GNV / bioGNV ne sont pas développées pour le fret en France. Concernant les trains de ligne, la puissance et l'autonomie exigées ne permettent pas de privilégier une solution GNC. Le GNL semble plus adapté du fait de sa plus grande quantité d'énergie par volume.

Des projets existent en France et dans le monde, incluant des projets de rétrofit, et quelques mises en service pour des phases de tests sont lancées.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives 100 % GNV est en cours de développement et en phases de tests.

Il est aussi possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant les moteurs thermiques par des moteurs à allumage (à essence). Une société proposant du rétrofit indique que chaque moteur peut être remplacé en 3 heures à l'aide d'un chariot élévateur ou d'une grue. Il faudra aussi placer des bonbonnes de gaz naturel sur la plateforme et en dessous, en s'assurant de la bonne répartition des masses et la meilleure utilisation de l'espace disponible. Il y aura aussi des modifications des conduites de gaz, des détecteurs de méthane et des équipements de transfert de chaleur, le cas échéant.

Du point de vue motorisation, l'opération est peu complexe car elle est déjà existante et maîtrisée. Le point de complexité se situe au niveau de l'implémentation de l'espace de stockage du gaz. En effet, pour une énergie déployée équivalente, le gaz prend environ 5 fois plus de place que le stockage diesel.

Selon les technologies, le temps d'avitaillement varie de plus de 90 minutes pour 11 000 L (120 L/min) à 45 min pour 22 700 L (500 L/min)⁸⁷.

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.

Concernant la maintenance, elle est estimée à 8 à 10h⁸⁸ par an pour chaque module moteur. Les intervalles révisions moteurs de locomotives de 18 750 à 25 000 h et pour un coût d'environ 20 000 euros par moteur. Les cylindres de stockage GNC ont pour l'instant une durée de vie de 20 ans, qui peut être étendue à 30 ans.

Les coûts d'investissement pour l'installation d'une station de remplissage GNL sont estimés à 480 k€⁸⁹ et les coûts d'exploitation à environ 27 k€ par an⁹⁰.

Economiquement, dans le cas d'un camion (peu de REX sur les locomotives), une motorisation **GNL** demande des investissements de 30 à 40 % supplémentaires à l'achat pour un camion hybride que pour un camion diesel⁹¹. Ce surcoût est notamment dû aux réservoirs cryogéniques, bien plus complexes que les réservoirs diesel classiques où le carburant est stocké à température ambiante.

⁸⁷ [Is compressed natural gas finally feasible for railroad applications? - FreightWaves](#)

⁸⁸ [Optifuel Systems](#)

⁸⁹ [Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel \(gaz-mobilite.fr\)](#)

⁹⁰ [LBST \(2016\), Périmètre : fret routier](#)

⁹¹ [Le GNL comme carburant routier, quel potentiel pour la France ? \(sia-partners.com\)](#)

Avant la flambée des prix de l'énergie (en particulier du gaz) en 2021, le coût à l'utilisation était bien inférieur, notamment grâce au prix du GNV qui était de 30 à 50 %⁹² inférieur à celui du gazole⁹³, ce qui permettait un retour sur investissement intéressant.

Un projet de locomotives **GNL** a réduit de 26 % ces coûts d'énergie⁹⁴. Un autre a obtenu une réduction des coûts d'exploitation de 45 %⁹⁵.

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

- Réduction des nuisances sonores de 30 %⁹⁶ ;
- Moteur plus économique à entretenir ;
- 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 %, les particules fines de 90 %⁹⁷.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait de la maturité de la solution et disponibilité de ces véhicules (offre encore très restreinte).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins fonctionnant au GNC ;
- Pourcentage d'engins fonctionnant au GNL ;
- Pourcentage de kilomètres effectués avec du GNC ;
- Pourcentage de kilomètres effectués avec du bioGNC ;
- Pourcentage de kilomètres effectués avec du GNL ;
- Volume de GNC consommé ;
- Volume de bioGNC consommé ;
- Volume de GNL consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre d'engins fonctionnant au GNC et GNL ;
- Suivi de la consommation de GNC, bioGNC et GNL.

⁹² [Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel \(gaz-mobilite.fr\)](https://gaz-mobilite.fr)

⁹³ [Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel \(gaz-mobilite.fr\)](https://gaz-mobilite.fr)

⁹⁴ [Wabtec et KTZ concluent un protocole d'accord pour les manœuvres électriques à batterie, les locomotives GNL \(railway-technology.com\)](https://railway-technology.com)

⁹⁵ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](https://vie-publique.fr)

⁹⁶ [184000739.pdf \(vie-publique.fr\)](https://vie-publique.fr)

⁹⁷ ADEME

Solution 2 : Locomotive hybride dual fuel GNV-diesel

1. Principes

Les locomotives de traction et de manœuvre GNV hybride dual-fuel sont des technologies bicarburant associant diesel et gaz naturel. La locomotive possède un système de motorisation compatible au dual-fuel. Le stockage des énergies est embarqué dans la locomotive. Le mode de propulsion dual-fuel demande moins d'espace de stockage que le mode de propulsion 100 % GNV.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique des locomotives dual-fuel GNV-diesel dépend de la part d'utilisation du GNV par rapport au diesel. En effet, les moteurs à allumage (pour le GNV) ont un rendement inférieur aux moteurs diesel : de l'ordre de 30 à 35 % contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel. Cela est principalement dû à des taux de compression plus faible. Ce rendement fait qu'en moyenne, **un véhicule GNV consomme 22 % plus d'énergie qu'un véhicule diesel**⁹⁸. La part d'utilisation du GNV par rapport au diesel déterminera la consommation énergétique.

Les émissions de GES dépendront également de la part d'utilisation de GNV par rapport au diesel. Pour les véhicules **GNV** le gain peut atteindre 20 % par rapport au gazole⁹⁹. Quant au BioGNV, il permet de réduire les émissions de 80 % par rapport à un véhicule diesel¹⁰⁰. Cependant, des études montrent que les réductions d'émissions de GES du **GNL** pour le transport routier ne s'élèvent pas à plus de 6 % (de 2,6 à 5,6 %). Pour cause, le stockage du GNL entre -125°C et -160°C est énergivore et bien que les véhicules au GNL émettent moins de CO₂ à l'échappement en raison de la composition chimique plus favorable du carburant, ils produisent d'autres gaz à effet de serre. En particulier, le fonctionnement des véhicules entraîne des émissions considérables de méthane. Lorsqu'il est libéré dans l'atmosphère sans être brûlé, le méthane est un gaz à effet de serre très puissant¹⁰¹.

Une locomotive dual-fuel aura donc un gain GES inférieur à une locomotive 100 % GNV. Celui-ci dépendra de la part d'utilisation de GNV et de diesel.

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 %¹⁰².

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)	
		GNV	bioGNV
Locomotive	-22 à 0 %	Inférieur à de 3 à 20 %	Inférieur à 80 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

⁹⁸ Périmètre : fret routier. [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://theicct.org)

⁹⁹ Ferroviaire : [l'introduction du bioGNV par le retrofit \(gaz-mobilite.fr\)](https://gaz-mobilite.fr)

¹⁰⁰ GRDF : [bb160f85-2f80-34cf-923d-3061d7dbc69f \(grdf.fr\)](https://bb160f85-2f80-34cf-923d-3061d7dbc69f.grdf.fr)

¹⁰¹ [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://theicct.org)

¹⁰² ADEME

3. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives. Cependant, à ce jour les locomotives dual-fuel GNV-diesel ne sont pas développées pour le fret en France. Des projets existent, incluant des projets de rétrofit, notamment pour des locotracteurs et quelques mises en service pour des phases de tests sont lancées.

Pour une énergie déployée équivalente, le gaz prend environ 5 fois plus de place que le stockage diesel. Les véhicules dual-fuel sont donc notamment pertinent pour des locomotives ne disposant pas d'assez d'espace pour installer des stockages GNV.

4. Mise en œuvre

Le développement d'une flotte fonctionnant au dual-fuel GNV et diesel requiert :

- D'une part des véhicules spécifiques adaptés et équipés :
 - o D'un moteur à allumage commandé dual-fuel. Dans le moteur dual-fuel, le gazole est injecté directement dans la chambre de combustion et le GNV injecté dans le collecteur d'admission soit par carburation ou par injection ;
 - o De dispositifs de stockages de carburants spécifiques (différent entre les versions GNC et GNL mais identique 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 qui est économiquement plus intéressant dans le cas d'une petite flotte. La station GNV sera raccordée au réseau de gaz et contiendra un compresseur et un stockage tampon relié à la station ;
 - o Diesel : le système de recharge diesel étant déjà existant.

L'offre commerciale de locomotives dual-fuel GNV-diesel est en cours de développement et phases de tests. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de véhicules ou qui proposent un rétrofit, pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs engins.

Il est possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant les moteurs thermiques par des moteurs à allumage. Une société proposant du rétrofit indique que chaque moteur peut être remplacé en 3 heures à l'aide d'un chariot élévateur ou d'une grue. Il faudra aussi placer des bonbonnes de gaz naturel sur la plateforme et en dessous, en s'assurant de la bonne répartition des masses et la meilleure utilisation de l'espace disponible. Des réservoirs diesel pourront être retirés puisqu'ils seront remplacés par des réservoirs gaz. Il y aura aussi des modifications des conduites de gaz, des détecteurs de méthane et des équipements de transfert de chaleur, le cas échéant. Un calculateur électronique gère l'injection de diesel et de GNV et permet de communiquer entre le conducteur et les équipements techniques.

Du point de vue motorisation, l'opération est peu complexe car elle est déjà existante et maîtrisée. Le point de complexité se situe au niveau de l'implémentation de nouveau stockage de gaz.

Dans le cas d'un rétrofit de locotracteurs, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- Pour transformer un modèle en dual-fuel il faut une phase d'étude technique pour pouvoir intégrer le système sur un type de locotracteur précis. Ce coût est à payer une seule fois par type de locotracteur et est estimé à 300-350 k€ ;
- La transformation de chacune des locotracteurs, estimée à 200-250 k€ (pour une commande d'une dizaine d'unité) ;
- L'installation d'une station GNV ou le rechargement par camion-citerne ;

- Le coût du carburant, qui était estimé de 30 à 50 % inférieur pour le GNV par rapport au diesel¹⁰³ avant la flambée des prix de l'énergie (en particulier du gaz) en 2021.

Au total, une étude de locotracteurs rétrofité au dual-fuel GNV-diesel a obtenu une réduction des coûts des carburants de plus de 26 %¹⁰⁴.

Pour un locotracteur à utilisation intensive (500 L diesel/jour), une hybridation dual-fuel (1/4 GNV, 3/4 diesel) a montré un retour sur investissement de 4 ans (hors aides), pour des machines qui vont durer entre 20 et 40 ans.

Les critères structurants pour passer au dual-fuel sont :

- L'âge du moteur, plus il est ancien plus il est simple de le transformer ;
- La taille de la flotte, notamment pour le coût d'étude non négligeable et pour le coût d'avitaillement. Plus elle est importante, plus l'amortissement est rapide ;
- La consommation annuelle de la locomotive, plus la consommation est importante, plus la rentabilité est rapide.

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

- Limitation des nuisances sonores, son niveau de décibels est inférieur de 10 % à celui des locomotives conventionnelles¹⁰⁵ ;
- Moteur plus économique à entretenir ;
- Réduction des émissions d'oxydes d'azote de 30 à 70 % et les particules fines de 90 %¹⁰⁶.

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

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins fonctionnant au dual-fuel GNV-diesel ;
- Pourcentage de kilomètres effectués par des engins dual-fuel GNV-diesel ;
- Volume de GNV consommé ;
- Volume de diesel consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre de véhicules fonctionnant au dual-fuel GNV-diesel ;
- Suivi de la consommation de GNV et de diesel.

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

¹⁰⁴ Wabtec, KTZ reach MoU for battery-electric shunters, LNG locomotives (railway-technology.com)

¹⁰⁵ Locomotives: Is LNG the next generation? - Railway Age

¹⁰⁶ ADEME

Solution 3 : Locomotive hybride GNV-électrique par batteries

1. Principes

Les locomotives GNV hybrides sont des technologies possédant deux systèmes de propulsion : un générateur au GNV et une batterie. Le stockage du GNV est embarqué dans la locomotive et la batterie peut stocker de l'énergie récupérée par exemple lors de freinage.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique des locomotives hybrides GNV-batterie dépend de la puissance des batteries embarquées. Un engin 100 % GNV consomme 22 % plus d'énergie qu'un véhicule diesel mais l'ajout de batterie permet de réduire la consommation énergétique puisque les batteries récupèrent de l'énergie lors des phases de freinage, qu'elle peut ensuite réutiliser comme mode de propulsion.

Concernant l'impact sur les GES, il dépendra aussi de la puissance des batteries embarquées. La récupération de l'énergie par les batteries permet de réduire les émissions de GES puisque la batterie n'en émet pas. Cependant, l'impact environnemental et les émissions liées à la fabrication des batteries est important et doit être étudié. Cette étape énergivore est actuellement quasi-exclusivement réalisée hors France Métropolitaine avec un mix électrique plus carboné que le mix français. Pour une voiture électrique, la fabrication de la batterie compte pour 45 % de l'empreinte carbone de la fabrication totale du véhicule¹⁰⁷.

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 %, les particules fines de 90 %¹⁰⁸.

3. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives. Cependant, à ce jour les locomotives hybrides GNV-batterie ne sont pas développées pour le fret en France.

Pour une énergie déployée équivalente, le gaz prend environ 5 fois plus de place que le stockage diesel. Les véhicules dual-fuel sont donc notamment pertinent pour des locomotives ne disposant pas d'assez d'espace pour installer des stockages GNV.

4. Mise en œuvre

La mise en œuvre d'une locomotive hybride GNV-batterie est presque identique à celle d'une locomotive 100 % GNV.

Le développement d'une flotte fonctionnant au GNV requiert :

- Des véhicules spécifiques adaptés et équipés d'un moteur à allumage commandé et d'un dispositif de stockage d'énergie spécifique (différent entre les versions GNC et GNL mais pas entre le GNV et le bioGNV), ainsi que l'ajout de batteries embarquées ;

¹⁰⁷ [Comment réduire le bilan carbone d'une voiture électrique ? \(hellocarbo.com\)](http://hellocarbo.com)

¹⁰⁸ ADEME

- Un système spécifique de recharge, qui peut être une infrastructure ou bien une recharge par camion-citerne. La station GNV sera raccordée au réseau de gaz et contiendra un compresseur et un stockage tampon relié à la station.

L'offre commerciale de locomotives hybrides GNV-batterie est en cours de développement et phases de test. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs de véhicules ou qui proposent un rétrofit, pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs véhicules.

Il est aussi possible d'utiliser le rétrofit en remplaçant les moteurs thermiques par des moteurs à allumage (à essence). Une société proposant du rétrofit indique que chaque moteur peut être remplacé en 3 heures à l'aide d'un chariot élévateur ou d'une grue. Il faudra aussi placer des bonbonnes de gaz naturel ainsi que des batteries sur la plateforme et en dessous, en s'assurant de la bonne répartition des masses et la meilleure utilisation de l'espace disponible. Il y aura aussi des modifications des conduites de gaz, des détecteurs de méthane et des équipements de transfert de chaleur, le cas échéant.

Du point de vue motorisation, l'opération est peu complexe car elle est déjà existante et maîtrisée. Le point de complexité se situe au niveau de l'implémentation de nouveau stockage de gaz.

Selon les technologies, le temps de remplissage varie de plus de 90 minutes pour 11 000 L (120 L/min) à 45 min pour 22 700 L (500 L/min)¹⁰⁹. Concernant la maintenance, elle est estimée à 8 à 10h¹¹⁰ par an pour chaque module moteur. Les intervalles révisions moteurs de locomotives de 18 750 à 25 000 h et pour un coût d'environ 20 000 euros par moteur. Les cylindres de stockage GNC ont pour l'instant une durée de vie de 20 ans, qui peut être étendue à 30 ans.

Les coûts d'investissement pour l'installation d'une station de remplissage GNL sont estimés à 480 k€¹¹¹ et les coûts d'exploitation à environ 27 k€ par an¹¹².

Economiquement, dans le cas d'un camion (peu de REX sur les locomotives), une motorisation GNL demande des investissements de 30 à 40 % supplémentaires à l'achat pour un camion hybride que pour un camion diesel¹¹³. Ce surcoût est notamment dû aux réservoirs cryogéniques, bien plus complexes que les réservoirs diesel classiques où le carburant est stocké à température ambiante. Cependant, le coût à l'utilisation est bien inférieur, notamment grâce au prix du GNV qui est de 30 à 50 %¹¹⁴ inférieur à celui du diesel ce qui permet un retour sur investissement intéressant.

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

- Limitation des nuisances sonores ;
- Moteur plus économique à entretenir ;
- 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 %, les particules fines de 90 %¹¹⁵.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait de la maturité de la solution et disponibilité de ces véhicules (offre encore très restreinte).

¹⁰⁹ [Is compressed natural gas finally feasible for railroad applications? - FreightWaves](#)

¹¹⁰ [Optifuel Systems](#)

¹¹¹ [Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel \(gaz-mobilite.fr\)](#)

¹¹² [LBST \(2016\), Périmètre : fret routier](#)

¹¹³ [Le GNL comme carburant routier, quel potentiel pour la France ? \(sia-partners.com\)](#)

¹¹⁴ [Ferroviaire : GRDF pousse le GNV comme alternative au diesel \(gaz-mobilite.fr\)](#)

¹¹⁵ ADEME

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Pourcentage de véhicules fonctionnant au dual-fuel GNV-batterie ;
- Pourcentage de kilomètres effectués par des véhicules GNV-batterie ;
- Volume de GNV consommé.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi du nombre de véhicules fonctionnant au GNV-batterie ;
- Suivi de la consommation de GNV.

A4 FA 4 : Locomotives et locotracteurs biocarburants

Synthèse

1. Description de l'action

Des énergies alternatives au gazole sont disponibles rapidement et sans modification structurelle de l'engin. Il existe notamment le B100 et l'huile végétale hydrotraitée (HVO).

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des locomotives et des locotracteurs. Des recherches sont actuellement lancées mais la disponibilité des engins n'est pas prête.

3. Solutions associées

Deux alternatives biocarburants aux moteurs diesel existent :

- La locomotive fonctionnant au B100, en cours de R&D et de phases de tests ;
- La locomotive fonctionnant au HVO, en cours de R&D et de phases de tests.

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 : Locomotive B100

1. Principes

Le B100 contient 100 % d'esters méthyliques d'Acides Gras (EMAG) (contre 7 % au maximum en volume pour le gazole standard actuel). Les Esters Méthyliques d'Huile Végétale (EMHV) sont la principale forme d'EMAG utilisée (~94 %). En France, le carburant type B100 est issu à 100 % de l'huile de colza (provenant d'un sous-produit de l'industrie du colza et non d'une culture dédiée). Le B100 est réservé aux flottes captives disposant de leurs propres capacités de stockage. 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.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

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 voirie¹¹⁶). En première approximation, on peut considérer que le différentiel de contenu énergétique sera identique pour le ferroviaire.

Concernant, l'impact sur les **GES**, la réduction pour le ferroviaire est de **60 % en comparaison au gazole fossile**^{117,118}. Concernant les émissions de polluants atmosphériques, les résultats divergent selon leurs natures. La réduction est de 85 % pour les PM, 54 % pour HC, 40 % pour CO, cependant il y a une augmentation moyenne de 18 % pour les NOx.¹¹⁹

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Locomotive	-5 à 0 %	60 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

La solution décrite dans cette fiche concerne l'ensemble des locomotives et locotracteurs thermiques. Cependant, à ce jour, les engins B100 ne sont pas développées pour le fret en France. Des projets existent en France et dans le monde, notamment pour le ferroviaire voyageurs, et quelques mises en service pour des phases de tests sont initiées.

¹¹⁶ [Les énergies disponibles | Kit Environnement \(terre-tlf.fr\)](#) . Périmètre : véhicules routiers

¹¹⁷ [Base Empreinte® \(ademe.fr\)](#)

¹¹⁸ [Le B100 utilisé pour le transport ferroviaire : une diversification de marché prometteuse - L'actualité - Découvrir Terres Univia - Terres Univia](#)

¹¹⁹ [brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf \(totalenergies.fr\)](#)

Le B100 ne peut être utilisé que dans des flottes professionnelles 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 d'énergie pour l'approvisionnement.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives B100 est en développement et en tests. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs véhicules.

Le B100 ne nécessite pas de modification de la motorisation des trains roulant initialement au gazole. Les coûts d'investissement en matériel seront faibles. Il est toutefois nécessaire de posséder une cuve dédiée à cette énergie pour assurer l'avitaillement de l'engin. Il est possible d'utiliser une cuve existante en remplaçant l'énergie stockée par du B100 ou de faire installer une nouvelle cuve. Le fonctionnement en cuve est inchangé et l'entretien est similaire. Il est toutefois conseillé de réaliser un nettoyage de la cuve avant le premier remplissage au B100 en cas de réutilisation d'une cuve gazole. Des cuves connectées peuvent permettre un suivi des stocks et des programmations de livraisons de produit plus adaptées. Pour ce type d'énergie, la façon de faire le plein reste inchangé ce qui favorise son adoption. Les besoins d'entretien peuvent quant à eux être différents.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait de la maturité de la solution et de la disponibilité des engins (en phase de R&D)¹²⁰.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins fonctionnant au B100 ;
- Pourcentage de kilomètres effectués avec du B100 ;
- Nombre de litres de carburant B100 consommés.

Modalités pratiques de collecte des données :

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

¹²⁰ Du fait de son origine végétale, le coût et la disponibilité du B100 sont également soumis aux productions et positionnements politiques locaux sur les énergies de motorisation.

Solution 2 : Locomotive HVO

1. Principes

Le HVO (Huiles Végétales Hydrogénées) 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 trains roulant au gazole, tout en garantissant une réduction des GES.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Pour les véhicules routiers, la **surconsommation** des véhicules HVO est estimée de **5 à 10 %**¹²¹ par rapport au diesel traditionnel. En première approximation, on peut considérer que le différentiel de contenu énergétique sera identique pour le ferroviaire.

Concernant, l'impact sur les GES, la réduction est de 82 % par litre consommé en comparaison au gazole non routier¹²².

Concernant les émissions de polluants atmosphériques, la réduction est de 12 % pour les PM, 32 % pour HC, 16 % pour CO et 22 % pour les NOx.¹²³

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Locomotive	-10 à -5 %	82 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

La solution décrite dans cette fiche concerne l'ensemble des locomotives et locotracteurs thermiques. Cependant, à ce jour les locomotives HVO ne sont pas développées pour le fret en France. Sa commercialisation n'est pas envisagée à grande échelle compte tenu du coût actuel de l'énergie. Le coût peut baisser à l'avenir mais sa fabrication semble tout de même compliquée¹²⁴. Des projets d'études existent tout de même en France et dans le monde. Dans certains cas, l'utilisation du HVO est envisagée pour décarboner le dernier kilomètre.

Le HVO ne peut être utilisé 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 d'énergie pour l'approvisionnement.

¹²¹ [Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? \(autoplus.fr\)](http://autoplus.fr)

¹²² [Base Empreinte® \(ademe.fr\)](http://ademe.fr)

¹²³ [brochure-carburants-alternatifs-fr-vf.pdf \(totalenergies.fr\)](http://totalenergies.fr)

¹²⁴ [Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? \(autoplus.fr\)](http://autoplus.fr)

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de locomotives HVO est en phase de recherches. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs d'engins pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de cette solution.

Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme très faible du fait de la maturité de la solution et disponibilité des engins (R&D)¹²⁵.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Pourcentage d'engins fonctionnant au HVO ;
- Pourcentage de kilomètres effectués avec du HVO ;
- Nombre de litres de carburant HVO consommés.

Modalités pratiques de collecte des données :

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

¹²⁵ Du fait de son origine végétale, le coût et la disponibilité du HVO sont également soumis aux productions et positionnements politiques locaux sur les énergies de motorisation.

GUIDE DES FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE DU PROGRAMME REMOVE POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES FLOTTES DE TRANSPORT MASSIFIE