



Wagons automoteurs

Pré-études

Les poids lourds sont des wagons de frêt automoteurs mis sur la route. Ils ont l'avantage de la souplesse dans la gestion de leurs itinéraires et d'être rapide en évitant les gares de triage. Les camions consomment beaucoup, usent les chaussées et ne pratiquent guère la conteneurisation. Les conditions de travail des conducteurs sont difficiles.

Le frêt ferroviaire peut offrir les mêmes avantages si chaque wagon est autonome et automatique. L'enjeu vaut de se poser la question de la faisabilité d'un tel système et des exigences de sa compatibilité avec l'existant.

1.	Contexte	3
2.	Fonctions	3
2.1.	Autonomie lors des manoeuvres	3
2.2.	Motorisation de tous les essieux.....	3
2.3.	Accouplement/Désaccouplement automatique	4
2.4.	Motorisation réversible de tous les essieux:.....	4
2.5.	Petit stockage d'énergie sur chaque wagon	4
2.6.	Transmission de l'énergie à tous les wagons	4
2.7.	Transmission des ordres cinématiques à tout le train	4
2.8.	Transmissions sans fil	4
2.9.	Accouplement – désaccouplement automatique.....	5
2.10.	Localisation à large échelle	5
2.11.	Sécurisation à grande vitesse	5
2.12.	Sécurisation à faible vitesse	5
2.13.	Aiguillages rapides	5
2.14.	Transformation des wagons existants en wagons bi-mode	5
2.15.	Intermodalité - Conteneur.....	5
3.	Contraintes	6
3.1.	Compatibilité avec l'existant	6
4.	Moyens.....	6
4.1.	Infrastructures et services.....	7
4.1.1.	Equipement des itinéraires de transit	7
4.1.2.	Equipement des dessertes et voies d'attente	7
4.1.3.	Plate-formes d'échange.....	7
4.2.	Locomotive	7
4.3.	Wagon	7
4.3.1.	Moteur de 20 kW sur chaque essieu	7
4.3.2.	Energie	7
4.3.3.	Solution "Batteries".....	7
4.3.4.	Solution "Pile à combustible".....	8
4.3.5.	Solution "traction classique"	8
4.3.6.	Solution "Bus énergie".....	8
4.3.7.	Solution mixte "Bus énergie et supercondensateurs".....	8
4.3.8.	Solution mixte "Pile à combustible et supercondensateur"	8
4.3.9.	Solution mixte avec renvoi sur le réseau.....	8
4.4.	Convoi	8
4.4.1.	Dégrouper en dynamique	8
4.4.2.	Groupage.....	9
4.4.3.	Accostage automatique	9
4.4.4.	Attelage automatique.....	10
4.4.5.	Désattelage automatique en marche.....	10
4.5.	Wagons spéciaux	10
4.5.1.	Lanterne rouge	10
4.5.2.	Solution "WA spécial".....	10
4.5.3.	Solution "WA avec pantographe"	10
4.5.4.	Solution "Motrice rouge"	10
4.6.	Divers	10
4.6.1.	Commande du freinage par sabot, indépendante du reste, y compris pour l'énergie.	10
4.6.2.	Télécommande.....	10
4.6.3.	Simulation d'un dégroupage	10
4.6.4.	Récapitulatif.....	11

1. Contexte

Diminuer, ou tout au moins contenir le trafic lourd sur les routes et autoroutes, c'est le souhait d'une majorité de citoyens.

L'acceptabilité sociale des Poids lourds devient problématique. Leur nombre croissant et les poids à l'essieu autorisé trop élevé réduisent la durée de vie des chaussées, dont la rénovation est particulièrement coûteuse. Les accidents impliquant les camions ont de forts retentissements dans les media. Les conditions de travail des chauffeurs sont en décalage avec le progrès social. Les poids lourds sont difficiles à gérer dans les situations de crise telles qu'un épisode neigeux ou une fermeture d'axe. Les grèves du transports routiers peuvent conduire à une faillite économique...

Mettre le fret sur les rails, c'est conserver un équilibre concurrentiel voire complémentaire, faire des économies sur l'entretien des infrastructures routières, voire sur certains investissements lourds. C'est aussi éviter des conditions de travail pénibles aux chauffeurs routiers qui ont certainement un rôle à jouer dans les trajets locaux expéditeur-gare et gare-destinataire, C'est encore réduire la consommation énergétique et les pollutions ainsi que la gravité des accidents.

On peut certes essayer d'automatiser des pelotons de poids lourds sur les autoroutes, mais il faudra pour cela trouver une solution aux véhicules légers qui veulent sortir de l'autoroute alors qu'un train continu de camions en voie lente les en empêchent. La solution du problème existe, c'est le train sur chemin de fer, mais on lui reproche en particulier sa rigidité, dans le temps et dans l'espace.

Une première amélioration est le ferroutage qui permet aux camions de prendre le train. On peut aller plus loin sans révolutionner d'un coup le système ferroviaire actuel en donnant aux wagons une certaine autonomie et en généralisant les conteneurs.

Ce document est une première étude de faisabilité, présenté en deux parties : les fonctions à assurer et les moyens à mettre en œuvre.

2. Fonctions

2.1. Autonomie lors des manoeuvres

Le système de la bosse dans les gares de triage peut être transformé et généralisé:

- le wagon possède sa propre motorisation et le stockage d'énergie nécessaire à de courtes manoeuvres.
- le wagon connaît son chargement et sa destination. Il commande lui-même l'aiguillage
- La sécurité de la manoeuvre est réalisée avec les signaux habituels. L'automate du wagon assure leur prise en compte.

2.2. Motorisation de tous les essieux

Le moteur-roue existe déjà sur certains engins. Pourquoi pas un simple moteur électrique sur chaque essieu :

- effort faible de la part de la locomotive, qui sert seulement de distributrice d'énergie et de tête de train.
- le risque de patinage de la locomotive au démarrage est supprimé
- le moteur du wagon peut aider la traction dans les rampes
- les wagons peuvent se mouvoir isolément

2.3. Accouplement/Désaccouplement automatique

Le wagon régule sa motorisation pour exécuter un arrêt au but. Le but peut être fixe ou mobile. En particulier, le wagon peut s'accoupler à un autre wagon, lui-même pourvu de la même fonction. Le wagon peut s'accoupler dans un sens ou dans l'autre. Le processus d'attelage sur wagon à l'arrêt n'est pas fondamentalement différent pour un attelage sur wagon à faible vitesse. Par contre la gestion générale du train est sans doute plus complexe lorsque le convoi roule. En fait, le gain de temps est négligeable en amont de la divergence et est négatif lors de la reconstruction du convoi (les derniers wagons doivent parcourir une plus grande distance pour rattraper le convoi en marche).

2.4. Motorisation réversible de tous les essieux:

L'énergie de freinage peut être récupérée. Il est intéressant d'étudier les fréquences des démarrages et des arrêts, des freinages et des accélérations, des appoints en rampe, pour estimer les économies d'énergie et dimensionner l'organe de stockage de l'énergie. La récupération d'énergie dans les freinages ou les descentes est trop intense et trop importante pour être gérée par des batteries. 20 tonnes à 100 km/h représente une énergie cinétique d'environ 1000 kJ qui devrait être renvoyée sur la caténaire. Il y a là un grand gisement d'économies d'énergie.

2.5. Petit stockage d'énergie sur chaque wagon

Le stock d'énergie d'un wagon peut rester faible, dans la mesure où l'énergie de traction en vitesse de croisière est fournie par le convoi. Le wagon possède l'énergie nécessaire :

- pour démarrer le wagon au moment des manœuvres en gare
- pour rejoindre le convoi pour son attelage
- pour effectuer des petits parcours à faible vitesse
- pour réduire la puissance distribuée à la montée en vitesse du convoi ou pour soulager la locomotive sur de courtes rampes

2.6. Transmission de l'énergie à tous les wagons

Lorsque le wagon est attelé, c'est la motrice qui fournit l'énergie de traction sous forme mécanique ou électrique selon les besoins. L'énergie électrique distribuée semble intéressante :

- pour le régime de croisière en rampe
- pour la recharge lente

2.7. Transmission des ordres cinématiques à tout le train

Tous les essieux moteurs ont un fonctionnement synchrone. Les efforts de freinage ou d'accélération sont complètement répartis.

La cinématique du freinage d'urgence ne change pas, puisqu'actuellement l'effort de freinage est réparti sur toutes les roues.

L'accélération peut être forte puisque tous les essieux peuvent y participer. Le convoi atteint alors plus vite sa vitesse de croisière. Ce gain de temps compense le temps perdu lors des opérations de dégroupage/groupage.

2.8. Transmissions sans fil

Le wagon reçoit des ordres de manoeuvre de la locomotive, du wagon précédent ou de la gare.

Le wagon fournit les données sur sa position et sur son chargement.

Ces transmissions se font sans fil à courte distance (<300m) pour l'organisation des convois ou sur le réseau mondial pour le suivi à distance des marchandises.

La locomotive échange avec le système central pour le suivi des convois, avec les wagons de son convoi ou avec les wagons en attente sur son chemin.

Les transmissions sont sécurisées comme des transactions bancaires.

2.9. Accouplement – désaccouplement automatique

- pour dissocier un wagon du reste du convoi
- pour former un convoi

La composition dynamique des convois a pour objectif de supprimer les gares de triage. Seules des voies de desserte restent nécessaires.

2.10. Localisation à large échelle

Le suivi individuel des wagons est utile au sein du convoi et au niveau du centre de gestion général du fret. Cette fonction se complète avec les attributs du contenu transporté (nature, poids, origine, destination, propriétaire, affréteur,...)

2.11. Sécurisation à grande vitesse

Le système actuel reste le même pour espacer les trains entre eux

2.12. Sécurisation à faible vitesse

L'arrêt au but est une réalité depuis plusieurs dizaines d'années dans le métro parisien. Les technologies nouvelles de localisation permettent de réaliser cette fonction avec d'autres moyens pour les arrêts au but comme pour les accostages : le but est n'importe où sur la voie, il peut même être mobile si l'on veut qu'un wagon puisse rattraper un convoi en marche lente.

2.13. Aiguillages rapides

Les gares de triage ont des aiguillages pour le triage entre wagons se succédant espacés à faible allure. Ce type d'aiguillage peut être mis en section courante pour assurer le déroutement individuel des wagons en marche lente.

2.14. Transformation des wagons existants en wagons bi-mode

Cette fonction permet le passage progressif du système actuel avec des trains préformés au système des trains à formation dynamique.

2.15. Intermodalité - Conteneur

Le trafic maritime a compris l'intérêt du conteneur. Le trafic ferroviaire devrait comprendre l'intérêt du conteneur qui peut passer facilement d'une plate-forme sur rails à une plate-forme sur route. Entre l'expéditeur et la gare, comme entre la gare et le destinataire, le camion a encore un rôle à jouer. Comme un taxi prend et dépose les voyageurs, le camion-taxi prend et dépose les conteneurs.

3. Contraintes

3.1. Compatibilité avec l'existant

Le système est mis en œuvre progressivement.

Les trains classiques et les trains de wagons automoteurs utilisent les mêmes voies de liaison, à la même vitesse de croisière

Les voies de desserte utilisées par les wagons automoteurs isolés doivent être interdites aux wagons classiques isolés, mais les trains de wagons classiques sont admis en conduite à vue.

Les trains classiques peuvent tracter des wagons automoteurs dont les fonctions automotrices sont désactivées.

Les opérations de groupage/dégroupage s'inscrivent dans un diagramme de marche compatible avec le diagramme de marche des trains classiques. L'objectif est qu'une opération occupe globalement le temps d'un arrêt en gare d'un train de voyageur (<5mn)

Les adaptations nécessaires sur la voie sont marginales et peuvent se réaliser dans le temps d'une opération de maintenance classique.

Les courants de traction ou de restitution sont compatibles avec les caractéristiques du réseau existant.

Pour information, la motrice BB36000, avec 4 moteurs de 1850 kW, (d'un poids d'environ 100t ?) assure:

- la remorque d'un train de voyageur de 16 voitures à 200 km/h en rampe de 2,5 ‰,
- la remorque d'un train de marchandise de 2050 t à 80 km/h en rampe de 8,8 ‰.

4. Moyens

Un convoi est un ensemble composé exclusivement de WA, avec une locomotive et un conducteur.

Contrairement aux trains actuels qui ne peuvent se former que dans des gares de triage à l'aide de motrices de service, les convois de WA se composent et se décomposent par eux-mêmes.

Les convois circulent sur toutes les voies autorisées aux trains de marchandises. La composition dynamique n'est autorisée que sur les itinéraires équipés en conséquence.

Des WA en attente à une convergence viennent s'accrocher à la suite d'un convoi venant de l'autre branche.

Des WA ayant une destination différente de celle du convoi dont il font partie peuvent quitter le convoi au moment de la divergence.

La voie divergente peut mener à une gare de destination ou à une voie d'attente, dans l'attente du prochain convoi dont l'itinéraire emprunte la voie divergente.

En gare, les WA se présentent au site de chargement/déchargement qui assure la télécommande de leur déplacement.

Les WA ont une motorisation qui permet

- les déplacements à faible vitesse dans les sites terminaux
- les accélérations pour rejoindre un convoi
- les accélérations pour permettre au convoi d'atteindre sa vitesse de croisière
- les apports dans les rampes
- selon les solutions: la propulsion en régime de croisière

4.1. Infrastructures et services

4.1.1. Equipement des itinéraires de transit

Les aiguillages (convergence ou divergence) qui peuvent être empruntés sur les deux branches disposent d'un transpondeur fournissant l'identifiant de l'aiguillage (axe, km, sens, GPS, gares encadrantes et/ou voie d'attente), ainsi que son état (état inconnu lorsque l'aiguille est en mouvement, prochaine gare desservie par l'aiguillage dans sa position, horodate courant, horodate du précédent changement d'état, place disponible). Le transpondeur est situé à la distance de sécurité de l'aiguillage. Il est répété au guidon d'arrêt.

4.1.2. Equipement des dessertes et voies d'attente

Des transpondeurs d'arrêt au but permettent aux WA de s'arrêter en attente d'ordres extérieurs.

En entrée de zone, un transpondeur fournit l'indication de place disponible. Si l'offre de la zone est insuffisante, les WA refusés doivent rester avec leur convoi d'origine. Cette procédure est exceptionnelle. Un "hyperviseur" permet de vérifier que tout WA se joignant à un convoi a une possibilité d'accueil dans toutes les zones où il sera autonome.

4.1.3. Plate-formes d'échange

Un cahier des charges pour les outils de déchargement et de chargement pour différents types de wagon (pont transbordeur pour conteneurs, transpalettes, pompes pour pulvérulent,...) permet de construire des plate-formes d'échange efficaces et rapides au voisinage des zones urbaines, industrielles ou commerciales.

Dès qu'un wagon chargé s'approche de sa gare d'arrivée, il avertit le destinataire qui peut alors réserver le camion-taxi pour le transport du conteneur entre la gare et sa destination finale. Inversement, l'expéditeur ou son transitaire réserve un wagon vide et le camion-taxi nécessaires.

4.2. Locomotive

Une étude particulière coût/puissance devrait permettre de déterminer s'il est préférable d'utiliser les locomotives classiques (en y ajoutant les fonctions nécessaires à la gestion d'un convoi) ou de développer un nouveau type de locomotive plus légère.

4.3. Wagon

4.3.1. Moteur de 20 kW sur chaque essieu

Un train de 100 wagons de 20t à 2 essieux équipés chacun d'un moteur de 20kW dispose de 4000 kW de traction.

Pour information, les moteurs d'automobiles électriques font environ 40kW.

Le bas de caisse des wagons de marchandises à 2 essieux peut facilement accueillir ce type de moteur et son couplage mécanique à l'essieu.

Cette répartition de la motorisation permet de mettre en œuvre des motrices plus légères et peu puissantes.

4.3.2. Energie

La locomotive peut assurer la traction en vitesse de croisière. L'énergie stockée dans les WA peut aussi servir aux phases d'accélération et au passage de certaines rampes. En vitesse de croisière, la locomotive peut assurer sur sa réserve de puissance la recharge lente des WA.

4.3.2.1. Solution "Batteries"

A plat (cas général des zones de manoeuvre) et à 20 km/h, en estimant qu'il faut 1 Watt par kg pour vaincre les frottements, soit 10 kW pour un wagon de 20 tonnes. En supposant que les technologies de type LI-ion pourront atteindre 200Wh par kg, il faudrait 50 kg de batterie dans chaque wagon pour une heure d'autonomie.

Le calcul se complique si l'on veut que le wagon participe à l'accélération générale du convoi et récupère dans les ralentissements. Avec un bon récupérateur électrique au freinage, il ne devrait pas y avoir à augmenter le poids des batteries.

Les batteries ont un mauvais rendement pour les recharges très rapides et très intenses (à vérifier pour les nouvelles technologies Li-ion...). Les super-capacités sont sans doute envisageables, mais elles ont une autodécharge plus importante que les batteries et une densité d'énergie faible. Les volants d'inertie semblent une solution mieux adaptée, en imaginant que le volant d'énergie encaisse d'abord la décélération puis participe à la recharge lente des batteries, ou restitue rapidement cette énergie pour une nouvelle accélération. Un stockage hybride est à envisager.

C'est dans l'assistance à la traction dans les rampes que les batteries peuvent se révéler très vite insuffisantes. Il faut trouver 981 Joules pour hisser 100kg de 1m, soit environ 100kWh pour 20 tonnes sur une rampe de 100km à 1%, soit 500kg de batterie.

4.3.2.2.Solution "Pile à combustible"

Sans doute la plus prometteuse. Les gares sont équipées de pompes ou de systèmes d'échanges de réservoirs (hydrogène ou si possible méthanol).

Ce système nécessite un suivi de consommation.

4.3.2.3.Solution "traction classique"

C'est la locomotive qui tracte, comme pour un convoi classique, dès que tous les wagons sont accouplés.

4.3.2.4.Solution "Bus énergie"

L'énergie de propulsion est distribuée à tous les WA.

La solution de mettre une pantographe sur chaque wagon ne semble pas très réaliste. Elle mériterait cependant un remue-méninge. Certains wagons pourraient en être équipés.

Le problème est d'assurer la continuité électrique de la locomotive jusqu'au dernier wagon, compatible avec la distribution de 4000 kW en croisière (cette distribution peut être coupée à faible allure ou à l'arrêt). L'accostage doit mettre en oeuvre un cheminement de puissance sans perte et sans danger le long de tous les wagons, avec, entre les wagons, un dispositif contacteur de sécurité (amorçages) ou un couplage inductif (sans contact),.

4.3.2.5.Solution mixte "Bus énergie et supercondensateurs"

Le "Bus énergie" permet la recharge lente. Dans ce cas, la puissance électrique à transmettre d'un bout à l'autre du train est moindre que précédemment.

Les supercondensateurs ou les volants d'inertie permettent la recharge intense lors des freinages ou des descentes.

4.3.2.6.Solution mixte "Pile à combustible et supercondensateur"

Cette solution simplifie les WA mais nécessite un réseau de distribution de combustible.

4.3.2.7.Solution mixte avec renvoi sur le réseau

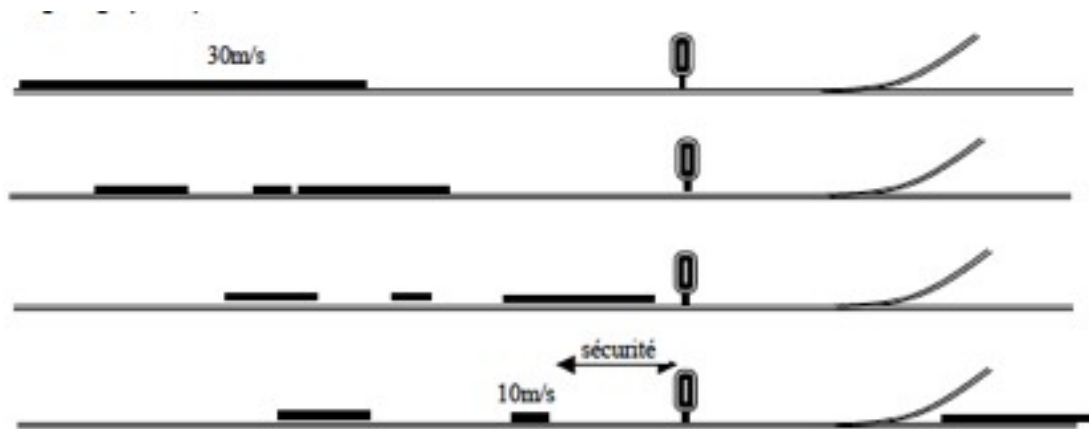
La possibilité¹ de renvoi de l'énergie de récupération sur la caténaire simplifie le stockage. Seule la recharge lente doit être assurée.

4.4. Convoi

4.4.1. Dégroupage en dynamique

En amont d'une divergence, les WA qui divergent se désaccouplent et attendent le mouvement d'aiguillage pour quitter le convoi.

1 L'irrégularité de ces apports en courant sur le réseau EDF est difficile à traité. Mais la politique d'économie d'énergie devrait inciter à trouver des solutions.



Le WA déconnecté du convoi rejoint celui-ci dès la remise en position directe de l'aiguillage. Etc.

La procédure la plus simple est que la motrice et la première coupe directe franchissent l'aiguille et s'arrêtent ensuite dans l'attente d'une reconnexion des WA retardés par les WA divergents.

La première coupe divergente s'arrête automatiquement au guidon de l'aiguille et attend le signal de bon positionnement de l'aiguille pour repartir et quitter l'itinéraire.

La coupe directe qui suit s'arrête au guidon d'arrêt et attend le signal de repositionnement de l'aiguille pour repartir et rejoindre le convoi.

Lorsque le convoi est complètement reconstruit, il reprend sa croisière.

Dégroupage avec arrêt

Le dégroupage en dynamique est complexe au niveau de la sécurité, pour un gain de temps globalement faible.

Le processus peut être simplifié :

Le convoi s'arrête au guidon d'arrêt.

Les coupes se désatellent.

La locomotive et les wagons direct qui précèdent la première coupe passent au vert. La suite du convoi reste à l'arrêt au signal d'annonce

Le dernier wagon direct déclenche le rouge.

L'aiguille change et déclenche le vert

La première coupe passe le signal et se dévie. Le dernier wagon de la coupe met le signal au rouge, pendant que le wagon suivant prend position au signal d'annonce...

4.4.2. Groupage

En aval d'une convergence, les WA en attente sur la voie convergente attendent que le convoi soit passé pour s'engager sur l'itinéraire et le rejoindre.

La procédure la plus simple est que le convoi s'arrête pour assurer l'accostage automatique de la nouvelle coupe avant de reprendre sa croisière.

4.4.3. Accostage automatique

L'approche lointaine se fait au GPS. Tout WA non accouplé aux deux extrémités émet en permanence sa position. Une transmission onde courte ou radar assure la redondance de sécurité.

L'approche à vue se fait au transpondeur. Le délai de réponse à une interrogation détermine la distance (technique identique au GPS, avec un seul degré de liberté).

L'approche finale se fait par palpeur souple (ou autre système si les contraintes d'environnement, température, agressions physiques,... le nécessitent). Ce système assure par ailleurs la régulation des moteurs lorsque ceux-ci sont sollicités par le convoi (accélération, rampe, freinage).

Le système d'attelage automatique prend le relais pour la dernière phase.

4.4.4. Attelage automatique

L'[attelage automatique avec tampon central](#) reste la solution d'avenir.

Néanmoins, on pourrait imaginer avoir une compatibilité avec le système d'attelage manuel actuel en équipant le WA d'un bras manipulateur capable de d'engager la chape sur le crochet du wagon précédent, puis de mettre en tension l'attelage et de raccorder le circuit pneumatique. Le problème reste le gel. Le bras manipulateur peut être chauffé au niveau des articulations.

4.4.5. Désattelage automatique en marche

C'est sans doute un problème difficile à résoudre, car l'attelage peut être en très forte tension en roulage.

Après débranchement du circuit pneumatique, il est nécessaire de détendre brusquement l'attelage pour que le crochet et la chape puisse se séparer.

4.5. Wagons spéciaux

4.5.1. Lanterne rouge

Un élément de fin de convoi est sans doute nécessaire pour assurer des fonctions de sécurité, pour maintenir l'intégrité du train en cas de défaillance d'un WA, et pour vérifier les groupages.

A l'approche d'une convergence, la locomotive vérifie que des wagons ne sont pas en attente pour prendre le train.

Dans ce cas, c'est la lanterne rouge qui décroche et ralentit pour permettre au(x) wagon(s) en attente de s'insérer sur la voie et de rattraper le train.

Lorsque la lanterne rouge est raccrochée, le train reprend sa vitesse de croisière.

4.5.2. Solution "WA spécial"

Un WA avec une motorisation plus puissante, un stockage d'énergie en conséquence et une "intelligence" adaptée.

4.5.3. Solution "WA avec pantographe"

Le WA peut aussi distribuer de l'énergie.

4.5.4. Solution "Motrice rouge"

Une motrice peut faire office de lanterne rouge.

4.6. Divers

4.6.1. Commande du freinage par sabot, indépendante du reste, y compris pour l'énergie.

Le circuit d'air comprimé doit aussi satisfaire à l'accostage automatique.

4.6.2. Télécommande

Chaque WA gère son chemin lui-même. La motrice a juste un rôle de supervision.

Lorsqu'il quitte un convoi, le WA peut se mettre automatiquement dans une zone d'attente sécurisée, qu'il ne pourra quitter que sur télécommande.

4.6.3. Simulation d'un dégroupage

Le convoi roule à 30 m/s.

La longueur du convoi est de 1000m.

La décélération du convoi est paramétrée à 0,5m/s/s

La décélération d'une coupe isolée est paramétrée à 1m/s/s

L'accélération du convoi ou d'une coupe est paramétrée à 0,5m/s/s

Si une coupe diverge, le convoi décide une attente après la divergence, à une distance égale à la longueur du convoi.

La coupe divergente décide un arrêt au carré qu'elle ne franchira réglementairement qu'à vitesse de manoeuvre

Avec une décélération de 1m/s/s, la coupe en déviation mettra 20s à atteindre la vitesse de divergence, sur 400m. Si le carré est déjà ouvert (cas normal puisque le début de convoi aura laissé un intervalle suffisant pour le changement de position après son passage), il faut encore environ 10 secondes pour franchir l'aiguillage.

La coupe suivante qui est une coupe directe doit aussi décélérer pour être au maximum à 10m/s à 50m du carré au moment où celui-ci va s'ouvrir dès que l'aiguille sera revenue en position.

Si le mouvement de l'aiguille dure 3 secondes (vérification comprise), la coupe directe doit donc avoir un intervalle d'au moins 8 secondes avec la coupe en déviation. Sa décélération doit donc commencer 8 secondes avant celle de la coupe directe.

On peut estimer à 20s la durée totale minimale de la déviation d'une coupe.

La coupe directe ainsi retardée rejoint le convoi à vitesse de manoeuvre. L'accostage prend environ 10s (pendant lesquelles les autres extractions peuvent avoir lieu. Seul le dernier accostage influe sur le retard général)

Le convoi peut repartir dès le franchissement de la divergence par la dernière coupe directe.

4.6.4. Récapitulatif

- 20s pour la décélération jusqu'à la vitesse de manoeuvre
- 10s pour l'extraction de la première coupe à extraire
- 10s pour la remise en convoi de la première coupe directe retardée
- 60s pour atteindre de nouveau la vitesse de croisière.

Soit environ 2 minutes et 20s par coupe à extraire

