



Patrice Salini Consultant

AXEFRET

Rapport final

Marché Ademe (Predit) réf. 0503C0086 - Dot

Synthèse :	5
Un axe dédié au combiné est-il rentable ?	5
Rendre le rail compétitif	5
Une étude d'axe	5
Les coûts et fonctions de coût	6
Le modèle de simulation	6
Simuler d'abord le fonctionnement de l'axe	6
Simuler la formation des coûts	7
Les résultats	8
Un scénario de référence crédible et rentabilisable	8
Des scénarios innovateurs incertains	10
Pour conclure	11
Plan	13
Introduction et méthodologie	13
Introduction	13
Le cahier des charges implicite d'un axe "compétitif"	14
La demande, ou le potentiel de référence pour l'étude d'AxeFret et le cahier des charges	16
Le cadre général de l'étude	16
La définition de la demande potentielle par zone	18
Approche globale du trafic	18
Estimation du potentiel (majorant) en poids lourds par jour et par gare	19
La notion de cahier des charges et ses implications	20
Le cahier des charges	20
La mesure des coûts, leur évaluation	22
Typologie des coûts et typologie des problèmes	22
Les coûts, leur représentation, et leur mesure	22
Deux familles de coûts, deux approches	24
Connaître les fonctions de coût.. plus que les coûts eux-mêmes	25

Les méthodes d'évaluation des coûts : le cas des infrastructures	26
1. Les méthodes liées à la « liquéfaction des forces et des volumes » : l'économétrie	26
L'étude Gaudry-Quinet	26
Les résultats publiés par Martland	27
Les études britanniques	28
L'étude spécifique à l'énergie de traction de Michel Lamboley	29
Baumgartner :	30
2. Les autres approches	31
Les études allemandes, suédoises et australiennes sur le poids à l'essieu	31
Les études américaines	32
Les points de vue d'ingénieurs	33
3. Premières conclusions et problématiques	34
Les autres coûts :	37
La grille retenue pour l'étude systémique de l'axe	39
Etude de faisabilité : la construction d'un simulateur et son utilisation	40
Position du problème	40
Bloc de simulation du parcours	40
Vers une simulation de l'axe réel	41
Le modèle retenu pour le bloc de simulation des parcours sur l'axe et la production des gares	42
Le modèle : principes	42
Les gares	42
La simulation du départ des trains	44
La capacité de la ligne et détermination des équipements en gare	45
Détermination du nombre de voies et portiques	46
Quelques spécificités du Modèle	46
Des régulateurs pour prendre en compte la qualité	46
Péage ou coût ?	46
Incidence du prix sur la demande	47

La question de l'équilibre du système.	47
Intégration de périodes de maintenance	48
Le modèle comme simulateur de coûts	48
La formation des trains	49
Les coûts de personnels de conduite	50
Les coûts de manutention	50
Les coûts de voie et les coûts relatifs aux trains	51
Utilisation du modèle	54
Les scénarios	54
Scénario de référence (Trains traditionnels cadencés de 750 mètres de long)	54
Problème particulier des gares	55
Capacité de croissance dans le cas d'un système dédié classique	56
L'automatisme	57
Les trains longs et les trains sur double hauteur (double stack)	58
L'hypothèse du recours à la manutention horizontale.	59
Les scénarios novateurs	60
Conclusions et recommandations	62
Annexe : les modèles, ses interfaces, ses équations.	64
Interfaces	64
Les équations	66

Synthèse :

Un axe dédié au combiné est-il rentable ?

□ **Rendre le rail compétitif**

La compétitivité du rail est problématique. Nous pensons qu'elle peut se résumer à l'atteinte d'objectifs permettant :

De disposer d'une capacité suffisante (capacité que nous exprimerons en équivalent-poids-lourds (EPL), soit grossièrement deux équivalents 20 pieds (EVP)) ;

D'offrir des fréquences suffisantes pour apporter une souplesse compétitive par rapport à la route de bout en bout ;

De permettre, sur un axe donné, une accessibilité suffisante au territoire traversé

De permettre des liaisons à des vitesses effectives de point à point (origine réelle, destination réelle) comparables à celles de la route ;

D'avoir une fiabilité globale comparable à la route

En outre, ce service doit être produit à un coût significativement plus bas que le coût actuel, et permettant d'obtenir un coût de porte à porte comparable à celui de la route.

Mais ça n'est pas tout, il faut en outre que ces conditions soient remplies avec une rentabilité acceptable des investissements nécessaires, en particulier des infrastructures.

Le projet AxeFret consiste à étudier dans ce contexte la faisabilité économique et organisationnelle d'un axe ferroviaire dédié au transport combiné rail-route.

Or, force est de constater que le système de transport combiné actuel repose sur un modèle économique incapable de "durer" sans subventions massives, et ne capable de se développer de manière suffisante. Il faut donc s'interroger sur les conditions de rentabilité d'un système qui remplisse un cahier des charges minimal en termes de coûts, de fréquence, d'accessibilité, de vitesse, et de capacité.

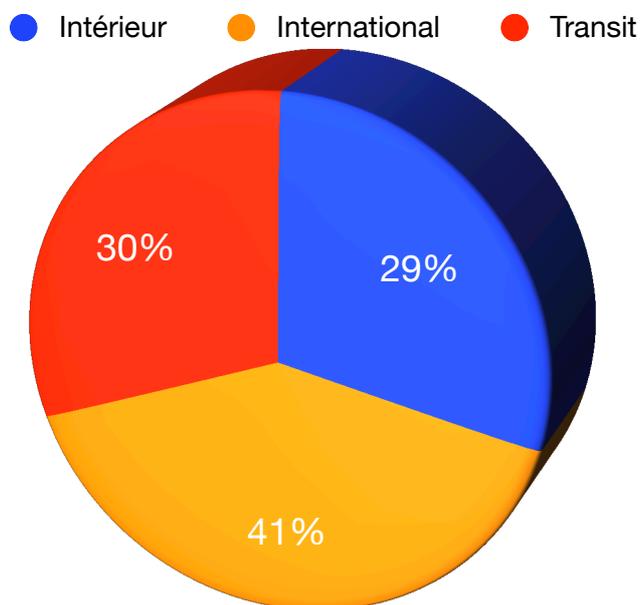
□ **Une étude d'axe**

Notre étude s'est appuyée, en ce qui concerne les trafics, sur celle menée sur l'autoroute automatique poids lourds¹. Elle repose donc exactement sur les mêmes statistiques de trafic, et permet donc de discuter de manière cohérente des options de politiques de transport à moyen terme.

Mais l'une des questions essentielles, était de reconstituer des fonctions de coût crédibles - et donc nécessairement non linéaires - permettant de tester différentes hypothèses de trafic, de conditions d'exploitation, et d'innovation ou de modification de la configuration des trains.

¹ "L'autoroute automatique poids lourds" - ou projet RAPL (LIVIC -Inrets-Lcpc - 2004).

Répartition du trafic sur l'axe de référence pour l'étude RAPL et pour AxeFret



☐ Les coûts et fonctions de coût

L'étude de cette question est à vrai dire assez "troublante", tant les données sont disparates - en nombre comme en qualité - reposent sur des méthodes différentes, et parfois inexistantes. Leur compilation et leur comparaison permet à la fois de retenir des formes possibles pour les courbes de coût en fonction de leurs paramètres de variabilité, et de retenir des ordres de grandeur. En pratique, cette revue des travaux permet de "borner" les éventuelles études de sensibilité. Une fois déterminé le volume d'activité que l'on cherche à traiter, il nous a semblé que la meilleure méthode consistait à simuler le système de transport ferroviaire de manière à vérifier s'il était possible de respecter le cahier des charges fixé. Il s'agit alors de dimensionner de manière dynamique les différentes caractéristiques de l'offre ferroviaire, d'en calculer les coûts, et d'en tester le réalisme du fonctionnement (en termes de capacité, de délais et de sécurité).

☐ Le modèle de simulation

Pour ce faire nous avons construit un modèle dynamique développé sous STELLA®, logiciel de dynamique des systèmes développé par Isee Systems.

Le recours à une modélisation systémique nous a semblé utile dès lors que certains facteurs étaient clairement en inter-relation et que nous voulions simuler le fonctionnement effectif d'une ligne nouvelle sur une période de quelques jours.

L'idée est en effet de mener de front une double approche fonctionnelle (la simulation du fonctionnement de la ligne et de son exploitation), et économique (calcul des coûts).

● Simuler d'abord le fonctionnement de l'axe

En ce qui concerne la dimension fonctionnelle, le problème central est celui de la simulation des parcours. A partir d'un niveau moyen de demande journalière entre les deux points du parcours, le

modèle calcule une demande horaire (le pas de calcul du modèle est l'heure) qui est variable selon l'heure de la journée. Sur cette base, des poids lourds arrivent sur site et transitent par un parking ou un ensemble de voies d'accès. Le processus de manutention (en réalité le processus global de prise en charge et de manutention) s'établit alors en fonction du nombre de voies, du nombre de portiques par voie, et naturellement, de la technologie utilisée (via une variable de temps unitaire de chargement). A ce niveau, le processus effectif de formation des trains est engagé, en tenant compte de la capacité maximale des équipements de manutention. Sa durée dépend de la nature des trains (longueur, nombre d'unités par wagon), de l'équipement (voies, portiques) et des techniques de manutention utilisées. Les trains étant prêts à partir, un "top départ" est donné en fonction de l'espacement souhaité des sillons et du taux minimal de remplissage des trains, tout en vérifiant le respect de l'espacement de sécurité. Les trains opèrent alors le parcours principal en fonction du temps de parcours réel qui est fonction de la vitesse maximale et de l'impact des accélérations et décélérations. Les trains s'arrêtent à chaque gare, l'objectif étant d'assurer une fréquence maximale. Bien entendu, la contrepartie de cette contrainte est de pouvoir garantir des temps d'arrêt minimaux, eux-mêmes permis par le haut niveau de trafic et les fréquences. A l'arrivée dans chaque gare un processus de manutention intervient alors selon le même principe que lors du chargement, et les poids lourds peuvent engager leur parcours terminal. Un calcul de durée de parcours entre l'entrée dans la gare de départ et le début du parcours terminal est effectué.

La simulation pendant quelques jours d'un tel système nous a conduit à définir un certain nombre de principes de régulation permettant de rendre le fonctionnement du système efficace. En effet, les flux ne sont pas équilibrés en structure, même si nous avons retenu un équilibre entre les flux montant et les flux à la descente. Comme on peut le voir, certaines gares ont un trafic fortement déséquilibré, et ce dans des proportions pouvant aller de 1 à 3. Autrement dit se pose implicitement le problème de la prise en compte des "vides". Par simplification, il nous a semblé que, faute de faire une modélisation de type multi-agents, le plus simple était de considérer que les flux étaient équilibrés.

En effet, le fonctionnement d'un système déséquilibré implique un mécanisme de consolidation soit dans le temps (parcours à vide) soit dans l'espace (organisations triangulaires par exemple), qui aboutissent in fine, pour un axe donné, soit à limiter le trafic au niveau du flux minimal, soit au contraire à générer un flux excédentaire, les deux flux étant égaux au flux maximal. Dans ce cas un flux "à vide" ou partiellement à vide est généré.

En pratique la réalité nous est partiellement inconnue, puisque nous avons reconstitué des flux à partir de calculs opérés non sur des véhicules, mais des tonnes transportées à partir d'une matrice origine -destination. Au surplus, les niveaux de saturation des véhicules varient selon les produits, leur densité, leur mode d'emballage, leur forme, etc... Il est donc difficile de donner une image précise de la réalité des déséquilibres réels de flux de véhicules. Nous avons donc finalement considéré comme plus simple et tout aussi rigoureux, de partir de deux vecteurs d'émission et de réception équilibrés. On rappelle en effet, que dans notre système, les flux sont en réalité mesurés sur chaque coupure (entre deux gares). Le modèle finalement retenu repose donc sur des flux équilibrés. Cela évite en outre une modélisation inutile des parcours à vide. En effet, il suffit dès lors de prendre en compte a posteriori le déséquilibre des flux, ce qui revient à majorer les coûts unitaires. Cet artefact permet en pratique d'éviter une modélisation complexe et donne strictement le même résultat, un coefficient permettant de passer du coût et des trafics calculés aux mêmes données prenant en compte les parcours à vide.

• Simuler la formation des coûts

L'autre grande dimension du simulateur concerne les coûts. En pratique, nous avons modélisé les coûts par nature, en distinguant ce qui relève de l'infrastructure (y compris la maintenance), les gares (y compris le matériel et le personnel de manutention), les trains (ce qui comprend le matériel, et le personnel), et l'énergie de traction.

Le simulateur calcule les coûts en fonction du trafic réel, un certain nombre de paramètres pouvant varier de manière non linéaire ou non proportionnelle en fonction des niveaux de trafics. Le simulateur calcule les effectifs nécessaires, les superficies de parkings, les voies, le nombre de portiques etc.

Les fonctions de coûts retenues découlent de la compilation de références bibliographiques, et de choix, toujours discutables, dont l'incidence sur les résultats peut toujours être évaluée ou analysée en sensibilité.

Le modèle a été ensuite testé puis utilisé pour mettre en oeuvre un certain nombre d'analyses.

Ayant constaté que le modèle permettait de disposer d'estimations de coûts à peu près stables sur la base d'une simulation portant sur 1 jour et demi de simulation, nous avons systématiquement testé différentes hypothèses sur la base d'un fonctionnement de 36 heures. L'analyse montre en effet que des simulations plus longues, pour autant que la simulation interdit par exemple des files d'attente explosives (cohérence du modèle plus boucles de rétroaction comportementales), permettent le calcul de coûts moyens annuels similaires aux résultats obtenus sur 36 heures.

Les résultats

Différents scénarios ont été examinés.

• Un scénario de référence crédible et rentabilisable

Dans le scénario de référence, il s'agit de traiter de manière cohérente (c'est à dire efficace) un flux de poids lourds correspondant à une demande égale à environ 50 % du trafic potentiel de l'axe, c'est à dire à l'hypothèse d'une stricte équivalence à l'offre routière. Nous sommes donc partis d'un chiffre d'environ 25 milliards de tonnes.km. Le maillage moins dense que celui retenu pour l'autoroute automatique poids lourds et la nature "non combinable" de certains trafics a pour conséquence de diminuer le potentiel d'environ 25 %.

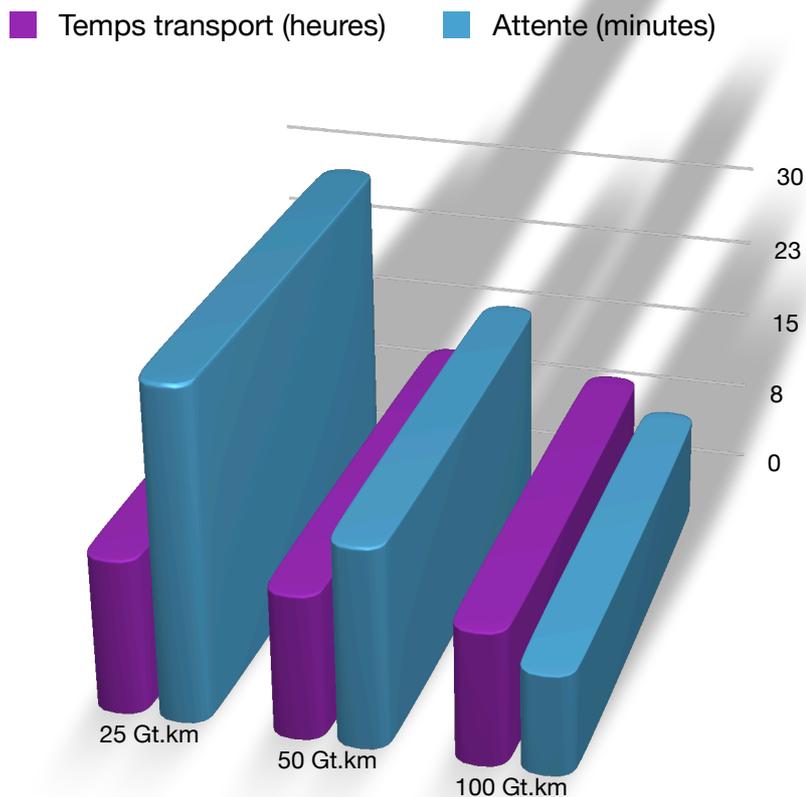
Le simulateur a pu montrer qu'il était possible de traiter un tel trafic, qui représente près de 6000 unités de transport par jour. Le transport de bout en bout en desserte omnibus classique permet d'obtenir une desserte de l'axe en 14 heures de délai de bout en bout (y compris accès en gare). Cette performance n'est possible qu'avec un niveau d'équipement en gare calibré sur les pointes de trafic.

Le coût complet de transport ferroviaire combiné (y compris les manutentions) serait de l'ordre de 0,71 €/équivalent semi-remorque au kilomètre avec charges d'infrastructures, et de 0,30 €/km hors infrastructures. Le coût avec un péage d'infrastructure moyen de 0,055€/UTI/km ressortirait donc alors à 0,35 €/km environ.

Un tel système classique combiné avec un dimensionnement des gares de manière à éviter toute attente, conduit à la mise en place d'un service relativement complexe reposant sur une "entreprise dédiée" de près de 1400 personnes, et mobilise un système de 193 portiques. Une telle structure requiert sans doute un management et des coûts de structure majorant notre estimation. Mais on peut considérer que l'utilisation d'un voie dédiée sur un axe comme celui que nous étudions est quasiment rentabilisable, puisqu'elle n'est pas éloignée des coûts marginaux routiers.

L'analyse menée sur des volumes d'activité plus élevés (50 et 100 milliards de t.km), montre que l'on tire avantage du niveau de trafic tant en ce qui concerne les délais d'attente, que, dans une faible mesure en ce qui concerne les temps de transport.

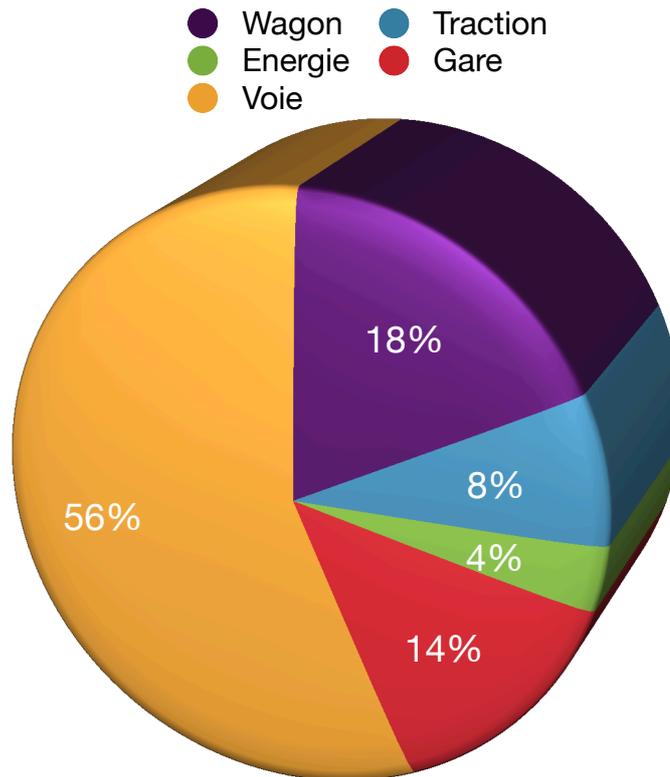
Temps de transport et d'attente selon le volume d'activité



De même, les coûts, du fait du caractère dédié de l'infrastructure, et de l'importance des coûts d'infrastructures, sont directement fonction du volume d'activité.

Les charges d'infrastructures, qui sont majoritaires à 25 milliards de tonnes.km (56 %) deviennent minoritaires à 50 milliards de tonnes.km (40 %) et très faibles à 100 milliards e tonnes.km (25 %). Ces éléments ont deux conséquences. Si la question la plus difficile concerne la gestion opérationnelle des gares, le système ferroviaire, si ce problème est résolu, peut développer une offre compétitive reposant sur un ou des axes dédiés, et bénéficier de réserves de productivité significatives.

Structure des coûts dans le cadre du scénario de référence.



A contrario, la dégradation du système - par exemple en raison de fréquence plus basses, d'une compétitivité par les prix problématique, ou tout autre facteur, conduit à des coûts complets prohibitifs. A 13 milliards de t.km, ceux-ci passeraient à 1,1 € le km par équivalent poids lourd transporté, et explose au delà (2,26 pour 5 milliards de tonnes.km).

• Des scénarios innovateurs incertains

Le test de solutions de type trains longs ou double-stack, nous a conduit à estimer que ces formules pouvaient permettre de peser sur les coûts de 5 à 15 centimes d'Euros (si on considère des trains double-stack de 1500 mètres), mais détérioraient assez nettement les performances et donc l'attractivité du système pour des trafics routiers traditionnels. D'abord en allongeant les temps d'attente (doublement possible) et les temps de transport moyens de 3 heures environ.

Un tel constat ne disqualifie pas la "solution" étudié, mais explicite sa pertinence commerciale.

La manutention horizontale de son côté bute sur son surcoût, qui, en l'état actuel des données en notre possession n'est pas compensé par les économies de matériel et de personnel. De même, les systèmes utilisant des wagons automoteurs sont pour l'instant, semble-t-il, trop onéreux. Ces systèmes peuvent permettre de bien synchroniser les flux de véhicules ferroviaires et routiers. A vitesse nominale identique, un tel système achemine la même demande (24,5 milliards de tonnes.km dans le cas du scénario de référence) avec un gain significatif en temps (10 heures 3/4 au lieu de 14 heures) et en délai (l'attente serait limitée à 2 minutes). Mais, s'agissant des coûts, il apparaît que le coût kilométrique dépasserait 1€/km (0,66 hors infrastructures). Ces ordres de grandeur découlent directement de l'estimation du coût d'un wagon automoteur et de sa motorisation, et dans une moindre mesure du coût de l'automatisme. C'est l'un des points qu'il conviendrait d'affiner avec les constructeurs et dans le cadre de recherches techniques plus approfondies.

Pour conclure

Ces travaux permettent au total de livrer quelques conclusions :

- Dans le cadre de notre scénario de référence, la rentabilité d'un axe dédié au fret est crédible, Celle-ci est très dépendante du niveau de trafic. En effet, avec un volume d'activité de l'ordre de 25 milliards de tonnes.km, le système est à la fois attractif (délais de transport et délais d'attente convenables), et permet d'obtenir une bonne couverture territoriale (thématique de l'accessibilité).
- A contrario, pour des niveaux d'activité plus faibles, le système devient moins compétitif, tant en coût qu'en délais. Cette concomitance des phénomènes est importante. En dessous d'un certain niveau de trafic - grossièrement celui du scénario de référence - le péage pratiqué ne peut en aucun cas permettre d'amortir l'infrastructure, ou si l'on préfère, le coût de l'infrastructure ne peut être répercuté sur le client. Le tableau ci-après met en lumière ces caractéristiques.
- Sous contrainte d'équilibre budgétaire - un partage de la voie implique sans aucun doute des subventions croisées avec les autres types de trafic, mais ne règle aucunement la question de l'adaptation aux flux réels de l'économie, caractérisés actuellement par un relatif étalement des flux. Il implique alors de revenir à un système de programmation très rigoureux.
- Le recours à des formules de transport plus massif (trains longs par exemple) permet sans doute d'améliorer la compétitivité "prix", mais peut détériorer celle des délais de transport et d'attente.
- Un système de wagons automoteurs automatiques est très efficace sur le terrain de la qualité de service, mais nous semble actuellement trop cher, dans l'attente d'une vérification plus précise des coûts possibles de fabrication de tels wagons.
- Le problème essentiel réside dans la gestion des gares. Cependant si l'on dimensionne convenablement les voies et les équipements de manutention, le recours à une gestion dynamique des chargements-déchargements, peut, dans un contexte de grande fluidité des départs-arrivées (hautes fréquences), permettre de faire face dans de bonnes conditions. Il reste que cela est largement théorique et mériterait une modélisation "multi-agents" discrète. Outre les problèmes de gestion optimale de la circulation et des manutentions, le problème de la forme et de la nature des voies, celle de l'alimentation électrique des wagons ou des trains doit être prise en compte de manière approfondie.
- La perspective de gares automatisées doit être précisément étudiée. Leur conception et leur mode de fonctionnement doit faire l'objet d'une analyse approfondie.
- Le recours à des formes nouvelles de trains - y compris des modes nouveaux de chargement-déchargement - doit être considéré en lien avec l'organisation des gares. La dissociation des opérations (préparation du "wagon", constitution du train (R-Shift-R) nous semble pertinente dès lors que l'on ne sait pas gérer un ensemble complexe et important de véhicules dans un chantier classique. Cet aspect doit faire l'objet d'études techniques approfondies comparatives.
- Notre raisonnement économique repose sur des équations de coût découlant d'une étude de la littérature portant sur le sujet. Certaines évaluations sont bien entendu discutables et peuvent être modulées dans le modèle. Il semble important de se souvenir pour autant, que - dans le cadre du scénario de référence - le premier poste de dépense demeure l'infrastructure, devant les dépenses de wagons et de gares. Cette situation est encore plus déséquilibrée lorsqu'il y a un niveau d'activité plus faible. Il nous semble donc logique de rechercher non pas des moyens d'économiser des sillons par la massification - ce qui ne permet pas d'espérer une part de marché importante mais réduit quelque peu les coûts - mais d'utiliser de manière intensive les voies, et donc de

produire des transports cadencés à haute fréquence. Ce constat nous semble déboucher naturellement sur deux thématiques :

- Quel est le meilleur système de transport ferroviaire cadencé à haute fréquence ? Où peut-on attendre le plus de baisse de coûts unitaires ? Quel sera le coût réel d'automoteurs produits en série ?
- Quel est le meilleur système de manutention à haute fréquence dans les gares selon qu'on utilise des trains ou des automoteurs ? Comment concevoir les automatismes ? Sur quels principes ?
- Au delà, il convient de s'interroger sur l'évolution de l'énergie de traction et son adéquation avec les formes prises par le transport ferroviaire (nature des trains, automoteurs, etc.).



Plan

Le présent rapport s'articule en trois parties principales (si l'on met de côté la synthèse ci-dessus, l'introduction et la conclusion).

- * Il s'agit d'une partie consacrée à l'analyse de la demande - dont on rappellera qu'elle est volontairement comparable à celle qui a été mise en oeuvre pour l'analyse de l'autoroute automatique poids lourds. Cette partie rentre plus précisément dans la définition de l'axe de transport servant de base à l'étude du projet Axefret. Elle fournit les éléments de cadrage nécessaires en ce qui concerne le potentiel de trafic à prendre en compte par la suite. Elle détermine en outre le cahier des charges que devra respecter le système mis en place.
- * Une seconde partie traite de la question des coûts ferroviaires et de leur formation, et présente une revue des différentes innovations évoquées généralement pour transformer l'offre ferroviaire de transport combiné, et donc peser sur les termes de l'équation de formation des coûts et de résolution des contraintes de marché.
- * La troisième partie concerne plus directement l'étude de faisabilité proprement dite d'un système innovant sur un axe dédié. L'analyse repose sur la construction et l'utilisation d'un modèle de simulation permettant de tester différentes hypothèses d'innovation sur un axe dédié au fret. La simulation permet de tester la faisabilité "physique", organisationnelle et économique de l'innovation. La partie présente le simulateur et sa construction et différents résultats économiques.

Introduction et méthodologie

Introduction

Le projet Axefret est né de l'expérience de mise en oeuvre d'une approche globale et systémique dans le cadre du projet « Autoroute Automatique Poids Lourds ». Il vise à mener une exploration économique technologique et fonctionnelle d'un système de transport combiné rail-route du futur fortement innovant. Il s'agit en effet, à partir d'objectifs ambitieux de niveau de service et de capacité – c'est-à-dire permettant de peser de manière très significative sur le partage modal d'un corridor - d'explorer des scénarios technologiques et organisationnels appliqués à un axe ferroviaire dédié au fret. Cette exploration concerne à la fois les plans technique et économique. Le choix d'une étude d'axe permet de concentrer l'approche méthodologique sur un sous-système obéissant à des règles relativement objectives (fiabilité, coût, horaire, fréquence, temps) et assez constantes au cours du temps. Ce choix permet en outre de mesurer la rentabilité prévisible d'un investissement formant un ensemble, et donc peu influencé par l'évolution globale du système ferroviaire ou les hypothèses relatives à l'évolution de la concurrence sur le réseau existant.

A la demande du Predit, nous avons procédé à une première phase de l'étude du projet AxeFret, dite étude de pertinence et de faisabilité dont l'objectif est de déterminer à quelles conditions il est possible et rentable pour la collectivité de mener à bien l'étude AxeFret.

□ Le cahier des charges implicite d'un axe "compétitif"

Notre recherche part de l'idée qu'il n'est pas possible aujourd'hui de concevoir des projets ferroviaires permettant de peser de manière significative sur la répartition modale s'ils ne permettent pas :

- De disposer d'une capacité suffisante (capacité que nous exprimerons en équivalent-poids-lourds (EPL), soit grossièrement deux équivalents 20 pieds (EVP)) ;
- D'offrir des fréquences suffisantes pour apporter une souplesse compétitive par rapport à la route de bout en bout ;
- De permettre, sur un axe donné, une accessibilité suffisante au territoire traversé
- De permettre des liaisons à des vitesses effectives de point à point (origine réelle, destination réelle) comparables à celles de la route ;
- D'avoir une fiabilité globale comparable à la route
- Enfin, de produire ce service à un coût significativement plus bas que le coût actuel, et permettant d'obtenir un coût de porte à porte comparable à celui de la route.

Ces six conditions étant posées, il en existe deux autres, à nos yeux fondamentales :

- il faut que ces conditions soient remplies de sorte qu'une telle offre puisse être produite avec une **rentabilité acceptable**. Autrement dit, il convient que la réalisation d'un axe dédié et son exploitation produisent un taux de rentabilité interne satisfaisant, ou si l'on préfère soit finançable par le marché financier. Bien entendu, le critère de rentabilité peut s'apprécier selon diverses hypothèses d'internalisation des coûts externes.
- Bien entendu ces conditions doivent être remplies en **maintenant voire en améliorant les qualités intrinsèques du rail** (sécurité, rendement énergétique, sources d'énergie...)

Si ces huit conditions constituent le cadre imposé de notre réflexion, il n'en demeure pas moins que l'on considère généralement que le système ferroviaire européen ne peut pas – dans les conditions actuelles – satisfaire effectivement et à la fois ces conditions, ce qui péjore du coup toute faisabilité économique de projets qui ne seraient pas largement subventionnés.

En d'autres termes, le « business model » qui fonctionne aujourd'hui n'est que rarement compétitif, ou alors dans des conditions spécifiques (par exemple sur l'Arc Alpin), et au prix de transferts relativement massifs de la part des collectivités publiques.

Il nous est donc apparu qu'il fallait reprendre ces différentes conditions, en tâchant d'explorer les solutions possibles pour les remplir, et par conséquent en approcher les coûts.

Ainsi, devons-nous nous interroger sur :

- Comment augmenter la capacité du rail, et/ou en baisser le coût ?
- Comment assurer des fréquences élevées ?
- Comment augmenter l'accessibilité des territoires au transport combiné ?
- Comment assurer des vitesses porte-à-porte comparables à la route ?
- Comment assurer la fiabilité voulue ?
- Comment réduire de manière significative (au moins 50 % ?) les coûts ferroviaires

Cette approche (« comment ? ») vise à explorer un ensemble de pistes d'innovation connues ou faisant l'objet de recherches, et à en évaluer la contribution, mais à prendre tout aussi bien en compte des pratiques qui ont cours dans certains pays à travers le monde. Bien entendu, ces innovations et pratiques ont un impact sur les coûts, impact qu'il faut estimer. Le problème est en effet –suivant les objectifs même de notre recherche – d'explorer la faisabilité de certaines innovations possibles en termes économiques. Il convient donc d'en cerner d'un côté le coût, et de l'autre l'apport à la résolution de notre fonction « objectif ». En d'autres termes cela pose fondamentalement la question de la variabilité des coûts ferroviaires (et annexes comme ceux des chantiers de transport combiné).

Cette question n'est pas aisée à traiter. Comme nous l'indiquerons, elle nécessite de confronter de multiples sources et méthodes, et de proposer une estimation des « formes de courbes de coût », tout autant que des ordres de grandeur des intervalles de variation de ces coûts.

La demande, ou le potentiel de référence pour l'étude d'AxeFret et le cahier des charges

□ Le cadre général de l'étude

Nous avons choisi de mener l'étude AxeFret en nous appuyant sur les travaux auxquels nous avons participé relatifs à l'autoroute automatique poids lourds - ou projet RAPL (LIVIC -Inrets-Lcpc - 2004).

Ce choix a plusieurs intérêts majeurs.

- * Il porte sur un axe nord sud traversant la France, et permet donc d'étudier un axe de fort trafic.
- * L'étude de transport a été réalisée permettant de disposer - assez facilement - d'estimation de trafic potentiel.
- * La logique d'exploitation de l'autoroute automatique poids lourds a conduit à définir un cahier des charges rigoureusement transposable à l'étude d'un axe ferroviaire, et aboutissant in fine à un nombre réduit de points d'entrée sur l'infrastructure, mais suffisant pour assurer un bon niveau d'accessibilité des territoires traversés. Nous pensons que la même logique peut être retenue pour le rail, dès lors que nous sommes en présence d'une exploitation reposant sur la formation de trains. En revanche, le recours à une technologie de wagons automoteurs peut permettre une approche différente, reposant sur un grand nombre de gares².

Ces éléments nous semblent militer pour un travail fondé sur l'approche menée dans le cadre du projet RAPL.

Carte du tracé de l'autoroute automatique poids lourds et de ses échangeurs majeurs (projet RAPL tome 3)



La carte ci-contre, tirée du rapport sur l'autoroute automatique poids lourds visualise le tracé étudié, et les points d'entrée sur le réseau. Le nombre et la localisation des échangeurs de l'autoroute dépendent de plusieurs paramètres. Au départ de l'étude on considérait que "l'espacement des accès dépend du tracé de la RA. Plus le tracé est proche des grandes et moyennes agglomérations, plus le nombre d'entrées/sorties est important. Chaque entrée/sortie doit être adaptée au scénario de circulation et au débit en chaque point." Dans le cadre du tracé retenu ci-contre, le nombre d'échangeurs est de 8, soit 6 échangeurs situés sur le parcours de l'autoroute. Ces échangeurs permettent un accès commode au réseau autoroutier pré-existant.

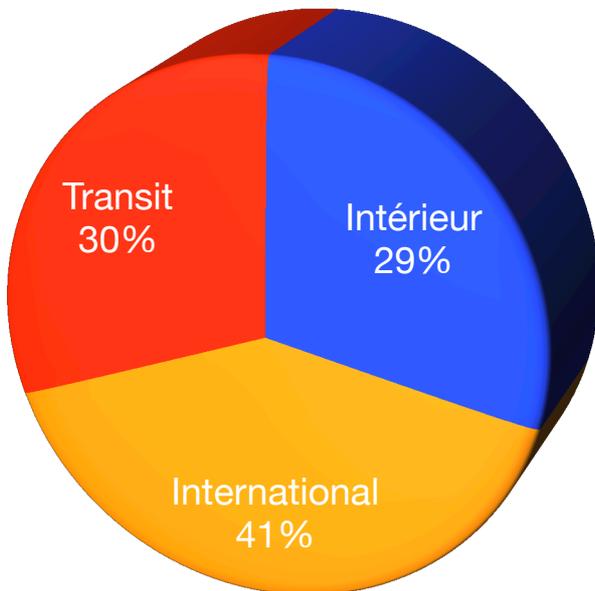
² Idéalement on peut imaginer un nombre de gares très important, ... de l'ordre de la centaine, mais il faudrait imaginer autant de boucles d'accès. Le calibrage des gares est alors sensiblement plus simple, celles-ci pouvant d'ailleurs accueillir aussi des trains.

Il nous semble que dans le cas d'une exploitation de trains - et singulièrement de trains longs - et non d'automoteurs, le nombre de gares doit être du même ordre que le nombre d'échangeurs d'une autoroute automatique, et se situer effectivement à proximité immédiate du réseau routier existant. Le choix devrait donc être de 5 à 7 arrêts intermédiaires sur l'Axe.

Deux études de trafic avaient été menées dans le cadre du projet RAPL, puis confrontées. Elles peuvent servir de référence au potentiel de l'axe pour une infrastructure dédiée et donc l'accessibilité est limitée par le truchement du faible nombre d'échangeurs.

Sur l'axe on estimait que le trafic était aux alentours de l'ordre de 5 millions de véhicules-km en 2000, et qu'environ les 3/4 seraient "captés" ou captables par la nouvelle autoroute dédiée. Cet ordre de grandeur - qui correspond à un volume de transport sur le sol national d'environ 68 milliards de tonnes-km est particulièrement intéressant dans la mesure où il est largement international, et comprend une part très significative de transit.

Répartition du trafic sur l'axe de référence pour l'étude RAPL et pour AxeFret



Par conséquent, outre les relations strictement frontalières, une part prépondérante des transports est mécaniquement à longue distance. A titre d'illustration, sur la partie sud actuelle du réseau autoroutier existant, les enquêtes CETE permettent de mettre en évidence des distances moyennes relativement longues. Ces chiffres font ressortir une part des transports à plus de 600 km supérieure à 57 %.

De tels éléments, s'il réduisent la difficulté apparente de l'analyse ne suppriment pas toutes les difficultés. Les mêmes analyses localisées mettent en lumière une dispersion importante des points de destination à partir d'une zone d'origine. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes livrés à une analyse par zone des entrées et sorties potentielles sur le réseau.

Distance moyenne de transport tirée de l'étude de plus de 5000 réponses à des enquêtes auprès des chauffeurs (partie sud de l'Axe) - Source Emc pour le rapport RAPL, d'après données Cete.

Distance parcourue (km)	- de 200	200-300	300-400	400-600	600-800	+ de 800
% de PL	20,57%	5,80%	5,85%	10,70%	11,56%	45,52%

□ La définition de la demande potentielle par zone

• Approche globale du trafic

Nous disposons finalement pour mener à bien cette approche des données routières utilisées par le projet Rapl, c'est à dire, outre des données tirées de enquêtes relatives au transit international, des données SItram de transport international par département français, et d'une estimation que nous avons faite de la matrice origine -département du transport routier.

Ces données ont été travaillées de manière à reconstruire des matrices origines-destinations intéressant l'axe, en répartissant les trafics d'importation d'exportation et de transit par département supposés d'entrée ou de sortie de l'axe.

Dans un second temps, ces données ont été regroupées par grande zone correspondant aux futures gares, puis enfin ramenés à un nombre d'équivalents poids lourds par jour.

Ces calculs font appel à diverses conventions.

- * Les unes concernent l'attractivité de l'axe lui-même par rapport à des origines ou destinations situées dans des départements non directement irrigués par la nouvelle infrastructure. Pour déterminer cette "influence" potentielle de l'axe, une étude a été faite pour chaque couple O-D. Nous avons considéré à ce niveau trois cas de figure. Le premier concerne une influence de 100 %, l'axe traversant les deux départements considérés. Dans le cas du transit ayant pour origine ou destination la péninsule ibérique, nous avons pris en compte le seul transport intéressant le Benelux le Royaume Uni et une partie de celui intéressant l'Allemagne. La même démarche a permis de filtrer les transports internationaux intéressant l'Espagne, le Bénélux, le Royaume Uni et l'Allemagne. L'étude des entrées et sorties approximatives par département permet de visualiser l'intensité moyenne des trafics intéressant les départements situés sur l'axe étudié. Un nombre non négligeable de départements (60 % des sorties, 41 % des entrées) aurait un potentiel horaire inférieur à 50 poids lourds par heure.
- * Disposant pour l'essentiel de données en tonnes et - pour le seul transport intérieur - en tonnes.km, nous avons du transformer en camions les données prises en compte. Il faut donc choisir un coefficient de passage. Ce coefficient à été pris égal à 15 tonnes par véhicules.
- * Enfin dès lors que nous avons réduit le nombre de gares, il a fallu estimer le trafic potentiel par gare en fonction de l'origine et/ou de la destination réelle des transports. Cet exercice a été mené pour 7 gares (5 intermédiaires), et peut être affiné au cas par cas, en fonction de la localisation choisie pour chaque gare, et renouvela en fonction du nombre de gares retenu. Ce potentiel est un majorant qu'il convient alors de discuter en fonction des performances sur système de transport. Dans le cas de l'autoroute automatique poids lourds, l'avantage offert en termes de temps de transport (vitesse élevée, régulation de la circulation, moindre congestion), et de coût opérationnel (gestion du personnel), pouvait conduire à considérer qu'un éventuel détour était parfois avantageux économiquement et en termes de niveau de service. Les hypothèses d'exploitation ferroviaire et les conditions de manutention dans les gares auront donc une influence directe sur la réalité du potentiel effectivement accessible par le service combiné offert.

• Estimation du potentiel (majorant) en poids lourds par jour et par gare

Nous avons donc établi un potentiel approximatif par gare. Celui-ci se décompose alors en unités de transport (Equivalent poids lourd, EPL) chargées et déchargées, celles-ci étant distinguées suivant qu'il s'agit d'un transport "montant", c'est à dire sud-nord, ou descendant, c'est à dire nord-sud.

On rappelle ici que les calculs de simulation reposent fondamentalement sur des flux à traiter dans chaque gare, ces flux déterminant différentes variables de capacité (voies, portiques, wagons, trains, etc.), et de performance (immobilisation des trains, temps de chargement...).

Les données de base font apparaître - en partie en raisons de déséquilibres de trafic, et de taux de chargement hétérogènes, des déséquilibres entre trafics montants et descendants, bien entendu inexistant en pratique, à quelques triangulaires près. Il a donc fallu redresser les données de manière à présenter un tableau cohérent. Diverses méthodes sont possibles. Le plus simple consiste à considérer que le sens le plus chargé génère nécessairement un flux opposé équivalent, et que les entrées sont nécessairement égales aux sorties. Ce calcul n'est pas nécessairement très optimiste en raison même des calculs précédents, qui en prenant un chargement moyen de 15 tonnes néglige complètement l'incidence des déséquilibres de trafic sur les taux de chargement, et l'importance des parcours en charge.

Le tableau ci-après reprend le résultat de ces calculs.

Tableau du nombre potentiel d'Equivalent poids lourd par jour et par gare (nombre maximal de poids lourds pouvant éventuellement être concernés par l'offre AxeFret)

Situation de référence : 2000

Gare ou échangeur	Entrée Montante	Entrée Descendante	Sortie Montante	Sortie Descendante	Manutentions Montantes	Manutentions descendantes
Nord	0	3 491	2 490	0	2 490	3 749
Picardie	1 437	747	1 850	428	3 322	1 194
Ouest Idf	1 462	1 006	2 100	985	3 598	2 016
Sud Idf	712	618	300	528	1 030	1 162
Poitou	212	230	410	1 213	628	1 450
Bordeaux	575	1 149	90	799	679	1 978
Sud	2 842	0	0	3 288	3 093	3 291
Total	7 240	7 240	7 240	7 240	14 840	14 840

Ces résultats permettent d'évaluer le potentiel maximal - pour le niveau de trafic de base, c'est à dire celui estimé de l'année 2000. Ce potentiel permet également de calculer des coefficients de report de trafic, et de valoriser l'impact réel d'un éventuel nouveau système de transport. Les ordres de grandeur trouvés - de l'ordre de 15000 véhicules par jour et par sens - et la hiérarchie des gares de l'axe permet de mieux cerner les enjeux.

□ La notion de cahier des charges et ses implications

Le potentiel retenu est vaste. Il retient l'ensemble des trafics qui - accessibles par le service offert sur la nouvelle infrastructure - "peut" se structurer, s'organiser, et se consolider autour des gares retenues. Dans une version organisée autour d'un nombre réduit de gares - comparable au nombre d'échangeurs retenu dans le projet RAPL - nous sommes donc en présence de "grands chantiers" dont le potentiel journalier dans chaque sens peut être de l'ordre de 600 à 3500 véhicules, et concerne donc plusieurs centaines de véhicules par heure.

Dans une version organisée autour d'un nombre plus important de gares - pour le même niveau de service - le potentiel pourrait être sensiblement supérieur.

Reste donc à déterminer non plus un potentiel maximal - c'est à dire une limite supérieure du trafic "accessible", mais un potentiel réaliste. Il nous semble en réalité que la compétitivité d'un système de transport combiné dépend de sa capacité à répondre à un cahier des charges particulier.

Que peut-il être ?

●Le cahier des charges

Notre analyse nous a conduit à considérer pour l'autoroute automatique poids lourds que la compétitivité d'un système de transport "nouveau" reposait en fait sur cinq familles de critères :

- **Critère de coût** : le système doit permettre au pire de maintenir le même niveau de prix de revient global de porte à porte.
- **Critère de capacité et de fréquence** : le système doit permettre, in fine, aux transporteurs de disposer d'une capacité de transport permettant - tout en conservant une grande flexibilité d'horaire - de faire face à la demande découlant de la compétitivité prix du produit.
- **Critère de vitesse commerciale** : le système doit permettre d'effectuer le parcours de porte à porte dans un délai inférieur ou égal au délai de transport actuel, et en respectant les contraintes horaires.
- **Critère de fiabilité et de qualité** : l'offre nominale du nouveau système doit être respectée avec un taux de fiabilité de l'ordre de 95 à 99 % au quart d'heure près, sans perte et sans incident.
- **Critère de simplicité et de réversibilité** : l'accès au nouveau système de transport doit être simple et commode, et le choix en sa faveur réversible à un coût modéré.

La satisfaction totale de ces cinq critères permet théoriquement de se trouver dans une situation d'équivalence avec la situation actuelle. Si l'un des critères est mieux satisfait par le nouveau système, on peut penser qu'il bénéficiera d'une part de marché supérieure. A l'inverse, la non satisfaction à 50 % d'un critère conduit à perdre une certaine part de marché.

Comme le suggère le graphique ci-contre le strict respect du cahier des charges ne suffirait pas à capter la totalité du potentiel. Par contre, en cas d'avantage significatif - par exemple un gain de temps ou un gain économique important - il est possible que la part de marché du nouveau système augmente très sensiblement. Il nous semble donc nécessaire, dans le cadre de l'évaluation du système, de considérer que **la satisfaction à 100 % des critères est un objectif ferme à atteindre**. Dans le cadre d'une comparaison avec le projet d'autoroute automatique poids lourds, une vitesse plus élevée devrait être considérée.

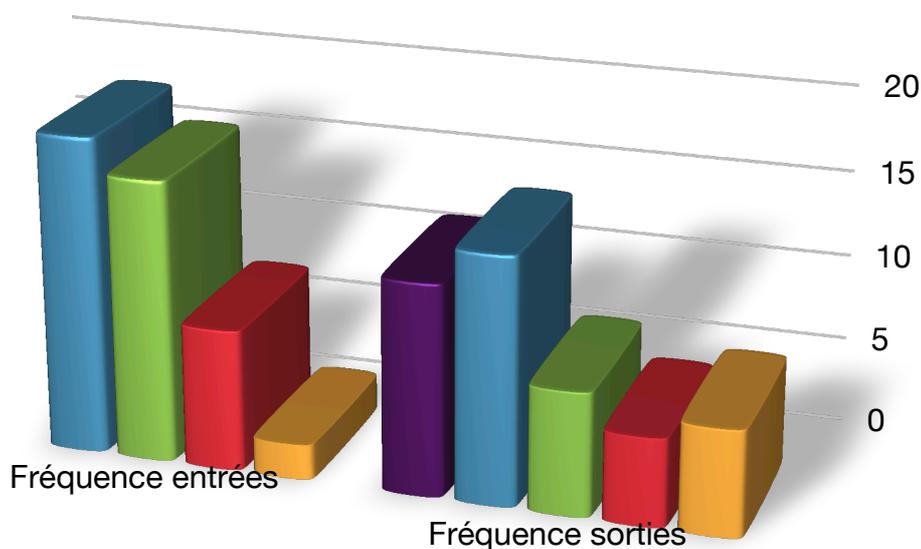
Nous retiendrons donc comme scénario central à simuler un potentiel correspondant à une part de marché de 50 % sur l'axe. Cette simulation a pour intérêt de tester la faisabilité d'un nouveau système avec des niveaux de demande importants, représentant une part de marché significative, et de calibrer le niveau d'équipements nécessaire. Elle permet en outre de comparer différents systèmes d'exploitation (manuel ou automatique) et types de trains (longueur, hauteur...). Enfin, elle permet de mettre en évidence les différents paramètres de coût, ce qui, en retour permet de valider la compétitivité du système (et la satisfaction du critère de coût défini plus haut). Des tests de sensibilité pourront alors être faits, ce qui permettra d'évaluer la robustesse du résultat en fonction de différentes hypothèses.

Tableau des "objectifs" de trafic à reprendre dans la simulation AxeFret

Gare ou échangeur	Entrée Montante	Entrée Descendante	Sortie Montante	Sortie Descendante	Manutentions Montantes	Manutentions descendantes
Nord	0	1 745	1 245	0	1 245	1 874
Picardie	718	373	925	214	1 661	597
Ouest Idf	731	503	1 050	492	1 799	1 008
Sud Idf	356	309	150	264	515	581
Poitou	106	115	205	606	314	725
Bordeaux	287	575	45	400	339	989
Sud	1 421	0	0	1 644	1 546	1 646
Total	3 620	3 620	3 620	3 620	7 420	7 420

Fréquences horaires moyennes d'entrée et de sortie estimées pour une gare par département (en camions /heure)

■ Moins de 10
 ■ de 10 à 50
 ■ de 51 à 100
 ■ de 101 à 150
 ■ plus de 150



La mesure des coûts, leur évaluation

La représentation des coûts du système ferroviaire dépend largement de leur mesure, de la nature de leur formation et des méthodes d'évaluation. Pour autant, il nous semble que cette problématique n'est pas homogène, et doit prendre en compte la typologie de ces coûts.

□ Typologie des coûts et typologie des problèmes

• Les coûts, leur représentation, et leur mesure

Un coût est quelque chose de fondamentalement variable. Le coût d'un produit par exemple varie d'un fournisseur à l'autre, et dépend sensiblement des séries produites. Ce coût peut être mesuré objectivement par celui qui achète le produit par l'entremise des prix de marché. On assimile alors le coût au prix³. Ainsi, telle compagnie ferroviaire achète-t-elle des rails à un certain prix, qui est pour elle le coût d'achat de ses rails. Si le coût réel du rail – on entend ici le coût de production du rail – est différent on peut parfaitement considérer que le marché – s'il est efficace – permet aux prix et aux coûts de converger relativement.

Ce coût du rail – disons qu'il revient par exemple à **60 €** le mètre -, ne sera qu'une partie du coût du rail posé. Il faudra, soit sous-traiter soit effectuer la pose de ce rail « en régie ». Il faudra donc le stocker, le choisir, le transporter, le mettre en place etc.... Toutes choses qui mobilisent d'autres formes de coûts à travers différents corps de métiers. Des coûts de stockage – eux-mêmes composés de nombreux autres coûts élémentaires -, des coûts administratifs, des coûts de transport, et naturellement le coût de l'équipe chargée de mettre en place le rail. Comme on le voit, le coût du rail posé va dépendre de dizaines d'autres coûts variant en fonction de nombre de paramètres et de situations. Dans notre exemple on voit bien que ces situations peuvent aller de l'intervention d'urgence après la casse d'un rail, à un chantier d'infrastructure nouvelle. On comprend intuitivement que la variabilité de ces coûts ne peut-être proportionnelle à une unité d'œuvre donnée que par hasard.

L'organisation de la firme joue ici un rôle essentiel.

Les «coûts » se mesurent en effet au niveau des « **centres d'activité** » qui « produisent » des biens et services. Le problème du comptable analytique sera donc de choisir les bonnes « unités d'œuvre », c'est à dire « **l'expression quantitative de la fourniture de services assumée par chaque centre**⁴ ». Ainsi, le service de maintenance d'une compagnie devra déterminer ses unités d'œuvre de manière à en déterminer le coût. Il faudra donc en analyser la production « d'œuvre », et, ce qui est plus complexe et coûteux la mesurer. La SnCF par exemple établit des types de maintenance dont elle tâche de mesurer le coût.

In fine, cette analyse permet de proche en proche, à consolider les coûts des différents centres, et à les affecter aux produits ou services de l'entreprise.

La représentation de ce que l'on vend est ici essentielle. En matière de chemins de fer, le gestionnaire d'infrastructures vend des sillons, leur usage, leur réservation. L'opérateur ferroviaire, vend des transports qu'il mesure selon des unités de mesure usuelles (voyageurs.km ou tonnes.km par exemple), qu'il produit avec des trains dont l'activité se mesure en tonnes.km brutes remorquées (TKBR)

Il convient ici de prendre le temps de rappeler que différentes méthodes de comptabilité analytique existent et peuvent être utilisées dans des organisations comparables et concurrentes :

³ On néglige ici bien entendu la question des coûts externes.

⁴ On reprend cette définition de A. Cibert, « Comptabilité analytique », Dunod, 1970.

- * **La méthode des coûts complets.** Elle part des charges effectives. Elle prend en compte les charges directes affectées, les charges indirectes affectées et les charges indirectes réparties à des centres d'analyse ou d'activité, et naturellement les cessions de prestations entre centres d'activité. Toute la mécanique repose sur la détermination d'unités d'œuvre ou de taux de frais ou clés de répartitions. L'une des questions centrale posée par cette méthode, est la prise en compte de la variabilité des coûts.
- * **La méthode du « direct costing »,** qui s'attache uniquement à l'analyse des coûts variables, la marge sur coût variable contribuant à la couverture des charges variables. Le terme de direct costing est le terme américain, les anglais préférant celui de **marginal costing**. En réalité il s'agit bien d'une prise en compte des seuls coûts variables. Le raisonnement du direct costing était fortement présent dans le domaine ferroviaire. Des variantes de cette méthode existent prenant en compte dans le direct costing, les frais fixes directs.
- * **Les méthodes d'imputation rationnelle,** qui consistent – à partir d'une analyse de type « coût complet » à construire un référentiel de coûts fondés sur des « standards » ou normes correspondant à des niveaux d'activité « normaux », ou optimaux. Ces méthodes vont donc déterminer des « écarts » entre coûts complets et ceux tirés de l'imputation rationnelle.

D'autres méthodes ou variantes de méthodes existent, le but principal étant de mieux prendre en compte d'une part la question des stocks, et l'évolution des modes de production. Par ailleurs, la question de la qualité (et de la non qualité) apparaissent de plus en plus dans les travaux portant sur l'analyse comptable.

Il reste que dans une logique d'estimation des coûts économiques de production des activités ferroviaires, l'un des problèmes complexes est **de passer du coût des centres, à celui des prestations finales**. Des questions comme : « Combien coûte un voyageur.km », ou « combien coûte une tonne.km » n'ont de réponses que si l'on sait répartir et affecter les coûts des « centres ». Dans le cas d'une entreprise comme la SNCF, il convient donc d'être en mesure **de répartir ou d'affecter les coûts** de ce que l'entreprise appelle des domaines comme : les gares, le matériel, la traction, et les fonctions transverses. En amont, les coûts répercutés sur RFF en qualité de gestionnaire d'infrastructures doivent pouvoir être non pas seulement facturés (option du prix de vente, du tarif), mais s'agissant d'une analyse de coûts, être répartis ou affectés, ce qui est d'autant plus complexe que l'entreprise est intégrée.. et que la mesure directe des unités d'œuvre n'est pas réalisée en continu sur le réseau.

Notre problématique est ici plus complexe puisqu'elle requiert de la comptabilité analytique qu'elle estime ou approche le mieux possible de que l'on sait de la **variabilité de ces coûts**. En effet, notre problème n'est pas tant de connaître les coûts que d'en estimer la variabilité en fonction d'un certain nombre de paramètres techniques ou organisationnels.

Or, il nous semble que le système ferroviaire n'est pas, généralement porté à se pencher sur cette variabilité. Il s'est longtemps contenté de réfléchir en termes de « direct costing », et, finalement, d'efficacité globale.

De ce point de vue, on peut considérer comme Bernard Graal⁵ qu'avec la comptabilité ferroviaire se réalise au XIX^{ème} siècle une véritable « **liquéfaction** » des forces et des volumes qui étaient les concepts fondamentaux de l'étude économique et technique des transports terrestres jusque là. En effet, dans les grandes compagnies intégrées, le problème dominant n'est plus un problème de **rendement mécanique**, mais de **rendement économique**.

Du coup, les « lois de variation » des coûts perdent leur caractère mécanique pour devenir des

⁵ Bernard Graal, « Economie de forces et production d'utilités. L'émergence du calcul économique chez les ingénieurs des ponts et chaussées (1831-1891) », Presses Universitaires de Rennes, 2003

mécanismes économiques, dont l'approche, dans une entreprise intégrée, se fera le plus souvent par l'expérience et l'analyse statistique. Bien au-delà, en présence de réseaux en situation de monopoles nationaux, le problème essentiel devient très vite de définir le tarif optimal, et non plus d'approfondir les structures de coût.

Comme le souligne justement Walras : « Cette industrie étant un monopole, il y a deux prix à considérer: un prix correspondant au prix de revient du voyageur ou de la tonne kilométrique, et un prix différent correspondant au produit net maximum»⁶. Le prix correspondant au produit net maximum, qui correspond finalement à la disposition à payer de la clientèle dans un contexte de concurrence donné sur le marché, intéressera prioritairement les compagnies, même si elles ne le firent pas toujours avec grande scientificité.

Le problème est d'un côté de répartir et d'affecter le mieux possible les coûts, et de l'autre de tarifier les prestations de manière optimale. La première logique est, dans une entreprise intégrée verticalement et monopoliste, relativement formelle. Une certaine standardisation de la production rend d'ailleurs les choses aisées. Il s'agit finalement, de prendre en compte, le mieux possible les disparités productives dans la formation des coûts. Or, fondamentalement, ces disparités renvoient assez largement au produit vendu. Un wagon isolé, un colis, un voyageur, et un train complet de minerai n'ont pas, la même nature commerciale et physique. Ils nécessitent des opérations différentes, mobilisent des matériels différents, des centres d'activité différents. On peut donc affecter certains coûts à certains produits. En revanche, les coûts non affectables directement sont difficiles à répartir de manière précise. A ce stade, la connaissance et la mesure des unités d'œuvre et de la variabilité des coûts qui y sont associés n'est pas perçue comme une priorité. Le direct costing s'est donc imposé.

Au fond, chaque entreprise met en œuvre, à ce niveau, en fonction de son organisation, du degré d'externalisation de certaines tâches, un système comptable qui « produit » des indicateurs de coûts lui permettant de se représenter son activité et de définir des indicateurs d'efficacité. Ces méthodes, dans les compagnies ferroviaires, conduisent à des coûts – le plus souvent confidentiels – qui sont au cœur des réflexions sur le système ferroviaire.

Pour autant, les disparités de résultat suivant les méthodes ne doivent pas évacuer la différence fondamentale existant entre les coûts d'infrastructure, les coûts de structure ou transversaux et les autres coûts.

- **Deux familles de coûts, deux approches**

L'exploitation ferroviaire repose fondamentalement sur deux grandes familles d'activité. Une activité de gestion d'infrastructure, et une activité d'exploitation de services de transport ferroviaires.

Ces deux familles sont fondamentalement distinctes :

En Europe les infrastructures sont rarement dédiées à un type d'utilisation et un seul. Une affectation pure et simple des coûts est donc généralement impossible.

Pour autant, même s'ils étaient affectables à un type de services particuliers, les coûts d'infrastructure sont difficilement mesurables directement. En effet, la construction – et donc l'amortissement économique des voies – l'entretien et la maintenance, résultent d'un usage dont l'impact sur les coûts n'est généralement pas directement mesurable.

Au contraire, il est plus aisé – même si les choses ne sont pas toujours faites – d'affecter un ensemble de charges d'exploitation à tel ou tel type de transport – les wagons de marchandise ne servent pas à transporter des voyageurs -. Et il est théoriquement possible de répartir les autres avec une bonne fiabilité.

⁶ Mémoire sur l'Etat et les Chemins de fer, Leon Walras, 1875.

Restent les charges de structure ou transversales, dont la répartition peut reposer sur des clefs de nature très différente, suivant la conception même que l'on a de l'imputation des charges générales.

Nous avons donc deux grandes familles de coûts – si l'on met de côté les charges communes générales -.

Si on considère que notre problématique est de mener une analyse raisonnée de ces coûts dans la perspective d'en étudier la variabilité sous différentes hypothèses, il nous semble que la question des infrastructures ne relève pas de la même problématique que celle de l'exploitation.

D'un côté, en effet, les infrastructures posent à notre sens un réel problème de connaissance analytique,

De l'autre l'exploitation peut plus largement faire appel à une simulation des conditions d'exploitation à partir de coûts unitaires estimés, tant pour le matériel que pour le personnel. La question la plus complexe étant d'estimer le coût d'un certain nombre de nouveaux matériels ou de l'incorporation de nouvelles technologies .

- **Connaître les fonctions de coût.. plus que les coûts eux-mêmes**

Le problème central qui nous est posé est en effet beaucoup plus de comprendre la variabilité des coûts que d'en mesurer in-abstracto l'ampleur actuelle.

Prenons un cas d'école pour illustrer notre propos. Imaginons que le coût actuel de déplacement par rail d'un EPL (Equivalent Poids Lourd) – y compris les maintenances dans les chantiers de transport combiné – soit de X €. Nous avons fixé un certain nombre de contraintes (cahier des charges), et imaginé qu'il fallait s'assigner par exemple un objectif à terme de X/2 €.

Le coût X est décomposable en composantes élémentaires, par exemple

où :

A est l'amortissement de la voie ; M sa maintenance et son entretien, E l'énergie de traction, L le coût de la locomotive (lui-même décomposable) ; W le coût du wagon (ibid), Pt le personnel de traction, C le coût du chantier combiné ; G le coût de l'engin de manutention, Pg le personnel de manutention, S le coût de structure. Chacun des 10 coûts composant X peut être évalué ou estimé de manière à retrouver X. Reste à savoir comment atteindre l'objectif de X/2. Notre sentiment est que le problème de la forme des fonctions de coût de chacune des composantes, suivant les hypothèses prises en compte, l'emporte largement sur l'évaluation précise de chacun des coûts actuels (où, pour qui ??, en moyenne ?).

Il importe en fait de déterminer des ordres de grandeur, des intervalles de variation, des variabilités, et surtout de mieux connaître la forme des fonctions de coût. Au total X nous importe moins que comment et en fonction de quoi évolue X.

□ Les méthodes d'évaluation des coûts : le cas des infrastructures

Nous l'avons dit, le problème le plus complexe de répartition de coûts concerne les infrastructures, et la compréhension de leur variabilité. Cette question est centrale et stratégique dès lors qu'il s'agit d'évaluer des transformations non marginales du système de transport. Elle a été par exemple au cœur des discussions préalables à l'introduction du « double-stack » aux Usa pour le transport de conteneur. En l'absence de données comptables publiques ou publiables dans le cas des grands monopoles intégrés, mais tout autant en l'absence de comptabilités permettant d'affiner les coûts d'infrastructure et leur répartition, des approches ont pu être menées par des chercheurs, des compagnies ferroviaires non intégrées ou les instances de régulation.

Deux grandes familles de méthode sont développées. Les unes reposent sur l'utilisation des statistiques et de l'économétrie. Les autres reposent sur l'observation et des approches expérimentales débouchant sur des méthodes dites bottom-up.

•1. Les méthodes liées à la « liquéfaction des forces et des volumes » : l'économétrie

Nous avons pu analyser deux grandes familles d'études. La première est due à M. Gaudry et E. Quinet⁷, qui mettent à profit, en l'appliquant à la France, des approches menées aux Usa et citées dans leur bibliographie (étude Martland par exemple).

La seconde est représentée par les travaux menés au Royaume Uni.

Nous devons également citer les travaux spécifiques menés par Michel Lamboley⁸ sur les consommations d'énergie.

• L'étude Gaudry-Quinet

L'étude de Marc Gaudry et Emile Quinet, traite d'une partie seulement des coûts, et en l'espèce de « l'allocation des coûts d'entretien de l'infrastructure ferroviaire, entendus au sens de coûts à périodicité annuelle ». Il ne traite donc pas des coûts de renouvellement ou de régénération. Ce choix – non global – est bien entendu discutable dans la mesure où l'on sait que ces coûts ne sont pas indépendants mais partiellement substituables.

Ce travail n'en a pas moins le mérite de reposer sur l'exploitation de données relatives à 1500 « segments » du réseau ferroviaire français. La conclusion principale de ce travail est « que le coût dépend des caractéristiques techniques telles que la vitesse maximale autorisée sur le segment de ligne, le nombre de croisements de voies, ce qui permet de considérer que les coûts marginaux déduits des ajustements sont des coûts de court terme ; en outre dépend de la composition du trafic. »

Différents résultats peuvent être tirés de cette étude en ce qui concerne la variabilité des coûts.

Selon l'étude le poids à l'essieu – en fait le poids des trains - a un effet proportionnel pour les trains de passagers, mais plus que proportionnel pour les trains de fret. La vitesse autorisée sur la ligne est au contraire un facteur qui jouerait en faveur de coûts de maintenance plus modérés – la

⁷ Marc Gaudry, Emile Quinet – Rail Track Wear-and-Tear Costs by Traffic Class in France Agora Jules Dupuit, Enpc et Inrets, 2003

⁸ Michel Lamboley Influence de la masse et de la distance sur la consommation d'énergie sur le fret « train entier » SNCF de 1980 à 2002 : Pour une tarification plus adaptée de l'énergie électrique dans le cadre de la libéralisation du fret ferroviaire en France. Mémoire de maîtrise, Université Paris 12, 2005

vitesse tolérée étant liée à la qualité des voies -. Au total, l'étude fournit des coûts marginaux d'entretien selon le type de service transitant pas le segment de ligne. Ce coût marginal a une élasticité qui varie en fonction du type de train.

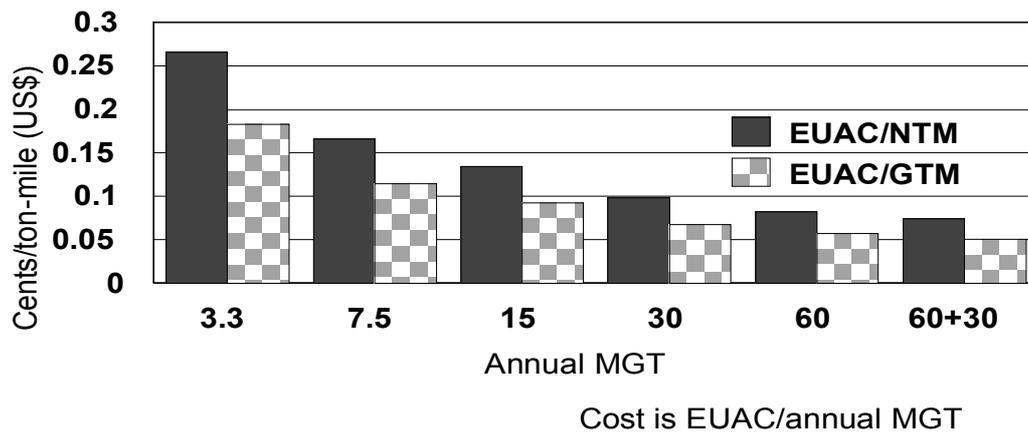
Coût marginal relatif selon le type de service et par tonne et type de service selon l'étude Gaudry-Quinet (op.cit.)

	Grandes lignes	TER	Ile de France	Fret
Coût marginal relatif par type de service	100	222	142	81
Coût marginal par tonne selon le type de service	100	558	194	41

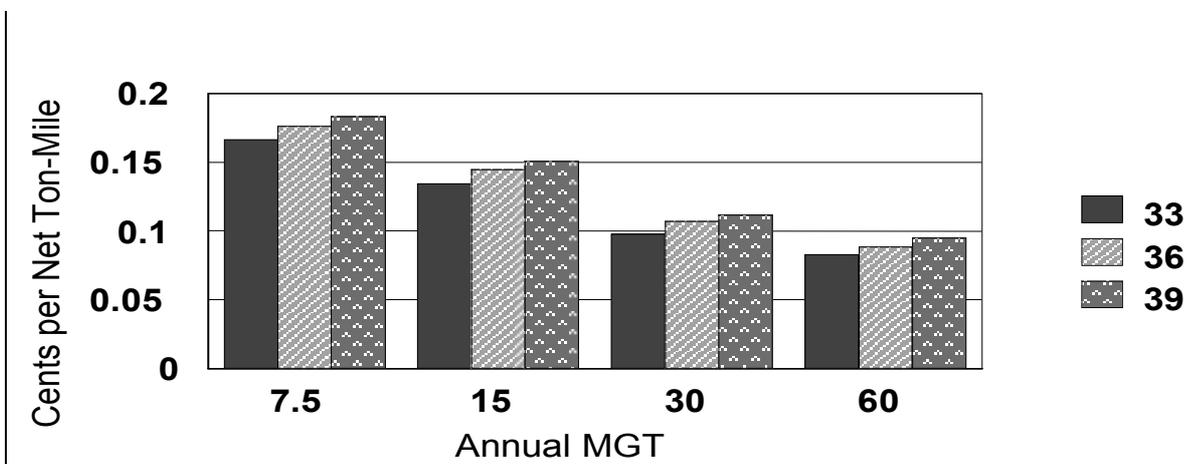
- Les résultats publiés par Martland**

D'autres études, comme les études américaines citées par Gaudry et Quinet mettent en évidence des résultats intéressants les uns soulignant une dégressivité des coûts en fonction du volume de trafic des lignes, les autres une faible progressivité de ces coûts en fonction du poids à l'essieu.

Décroissance du coût en fonction de la densité de trafic (source : Carl D. Martland, op.cit)



Croissance du coût unitaire en fonction du poids à l'essieu (33, 36 ou 39 tonnes) - (source : Carl D. Martland, op.cit)



- **Les études britanniques**

En Grande Bretagne deux philosophies contraires de l'analyse des coûts s'opposent. La première, soutenue par Railtrack, consiste à s'appuyer sur des approches dites « bottom-up ». Autrement dit, Railtrack se fonde essentiellement sur l'extrapolation de données tirées de coûts élémentaires ou de relations physiques observées pour ensuite les agréger. Au contraire l'approche Top-Down développée par Booz-Allen-Hamilton (BAH), cherche à déterminer la variabilité des coûts globaux observés par catégorie d'actif, et répartit les coûts variables en utilisant les relations tirées de l'approche physique des coûts.

Encadré :

The usage charging model used in Britain (source : « EU Task Force on Rail Infrastructure

charging: summary findings on best practice in marginal cost pricing » John Thomas Head of Regulatory Economics at the Office of the Rail Regulator in Britain)

At the last periodic review of Railtrack's access charges, there was considerable debate about the level of usage costs and how they should be estimated. Railtrack developed a detailed bottom-up engineering model to estimate marginal usage costs. This starts from detailed engineering relationships and adds up individual elements of cost caused by additional trains where they can be identified. Railtrack then "calibrated" the resulting sum of individual cost elements to the total expected cost derived from its Asset Maintenance Plans. These plans calculate the total level of costs for different types of asset using statistical methods.

The Regulator's consultants Booz Allen & Hamilton (BAH) developed an alternative top-down model⁶ based on the engineering relationships used by Railtrack in its model. This model assesses the total costs to the infrastructure manager of operating, maintaining and renewing the network and estimates the variability of these costs by asset category. It then allocates the variable costs across all vehicles on the network by using engineering relationships describing the relative damage caused to the infrastructure for different vehicle characteristics. It is a network-wide model and therefore the costs produced by the model are not differentiated by type of track, etc.

The Railtrack bottom-up approach had more detailed engineering accuracy, but this was spurious given the need for the Railtrack model to be calibrated to the asset lives produced by the asset maintenance plans. Further, some of the maintenance predictions from the model have required calibration to Railtrack's expectation of actual levels of activity. In terms of generating actual charges, the Regulator concluded that the detail of the bottom up model was not therefore warranted.

Ces deux approches font l'objet de rapports discutant les méthodes et confrontant les résultats, et qui s'opposent en particulier sur la question – pour nous fondamentale – de la variabilité des coûts.

L'étude de BAH met en lumière les éléments suivants (résultats de régressions) :

Pour le poids à l'essieu, une relation de type :

Poids à l'essieu ^{0,49}

Pour la vitesse , une relation du type :

Vitesse ^{0,64}

Par ailleurs BAH met en lumière divers coefficients permettant de tenir compte des spécificités du train.

Un document récent du régulateur présente ses conclusions en octobre 2005⁹ et intègre un certain nombre de remarques de BAH. Pour autant la conclusion du régulateur est très prudente sur la précision de l'outil de mesure ainsi adopté. Il indique en effet qu'il est difficile d'affecter dans le détail les coûts.

- **L'étude spécifique à l'énergie de traction de Michel Lamboley**

Michel Lamboley, dans son mémoire à l'université Paris 12, s'est livré à une approche à la fois raisonnée et économétrique de la consommation d'énergie des trains.

En effet, comme on a pu le voir, l'un des éléments étudiés à travers le monde, consiste à faire évoluer les poids à l'essieu, longueur et gabarit des trains, ce qui in fine débouche sur des trains logiquement plus lourds. Les approches fondées au contraire sur la recherche d'une fragmentation accrue des trains (systèmes de wagons automoteurs, trains virtuels etc...) n'excluent pas par ailleurs le recours à des gabarits plus importants et des poids à l'essieu plus importants.

Il est donc évident que la compréhension de la variabilité des coûts énergétiques est au centre de toute réflexion économique.

Le point de départ de la réflexion de Michel Lamboley était partiellement motivé par le fait qu'il n'existait pas de distinction dans la comptabilisation des dépenses d'énergie entre fret et voyageurs à la SnCF.

L'analyse de l'auteur est fondée sur l'idée que la consommation d'énergie dépend de trois facteurs :

- La consommation du train
- Les phénomènes liés à l'infrastructure
- Des phénomènes aléatoires.

Une évaluation théorique des consommations a été faite par la SnCF sous la forme d'une formule reliant le nombre de Tonnes Kilométriques Brutes Remorquées (TKBR) à la consommation en kWh.

L'estimation de 1996 donne les résultats suivants :

Formule SNCF de consommation par trains « IN/MT 1996 ». Consommation en kWh des trains électriques par kilomètre avec t=tonnage remorqué. (tonnes brutes)

Engins Categories de trains	Locomotives		Automotrices
	Sous 1500 v	Sous 25000 v	Sous 750 v
Fret 1400 T	3,2 + 0,026 t	3,2 + 0,021 t	
1000 T < fret < 1400 T	2,9 + 0,024 t	2,9 + 0,019 t	
1000T et loc hlp	2,9 + 0,015 t	2,9 + 0,012 t	0,0615 t
Fret desserte	3,7 + 0,020 t	3,7 + 0,019 t	

Les données de 1987 étaient établies suivant une autre logique, distinguant les trains entiers, les trains spécialisés, etc...

⁹ « Structure of costs and charges review: conclusions », Office of Rail Regulation. Octobre 2005

Par ailleurs, s'agissant des « phénomènes liés aux infrastructures », il apparaît que les consommations mesurées intègrent les « pertes joules » dues au réseau, celles-ci dépendant d'un ensemble de facteurs (taille des câbles, forme du courant, distance...). Michel Lamboley estime ces pertes à 6,7 % de la facture transport de RFF.

Une analyse « bottom-up » est, selon l'auteur impossible dans la mesure où actuellement la connaissance des données de circulation est insuffisante. Il est impossible par exemple, de « distinguer les consommations de plusieurs trains situées en même temps dans la zone d'alimentation de la sous-station ».

D'où une approche permettant de reconstituer statistiquement des consommations ramenées à la tonne.km. (8,7 gep/t.km en 2002), puis de tenter de les relier à la masse et à la distance parcourue.

In fine, l'auteur propose la formule suivante :

$$C_{eq(distance)} = 10.2 \text{ Kwh/km et } C_{eq(masse)} = 5.2 \text{ Kwh/t}$$

Des formules linéaires, strictement proportionnelles donc.

- **Baumgartner :**

Le tableau fourni par Baumgartner, ci-après, permet de prendre en compte à la fois les paramètres de pente, de vitesse et d'espacement des arrêts.

Tableau des consommations d'électricité de traction de Baumgartner (op.cit)

Distance between two successive stops [km]	Maximum running speed [km/h]	Gradient [% or mm/m]	Unit consumption [Wh/TKBC] ¹⁾
100	140	0 to 5	40 (35 to 50)
100	120	0 to 5	30 (25 to 35)
100	100	0 to 5	22 (17 to 27)
100	80	0 to 5	15 (10 to 20)
50	60	0 to 5	15 (10 to 30)
50	60 to 80	25	45 (45 to 50)
5	80	0 to 5	25 (20 to 30)
5	60	25	50 (45 to 55)

¹⁾ TKBC = total gross tonne-kilometre (including the mass of the locomotive(s))

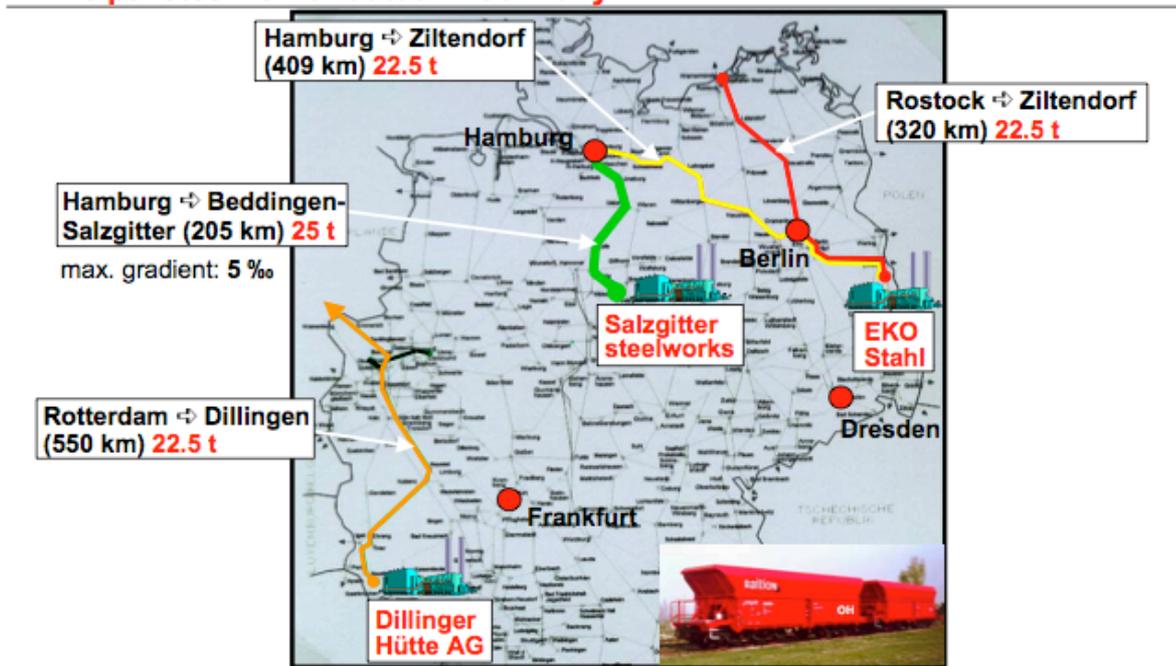
●2. Les autres approches

● Les études allemandes, suédoises et australiennes sur le poids à l’essieu

Les Allemands sont en train de mener des analyses permettant en particulier de mesurer l’incidence du poids à l’essieu. Leur approche – qui concerne l’axe Hambourg-Saltzgitter – repose sur la comparaison des deux sens de trafic qui sont fondamentalement chargés de manière très différente (déséquilibre de trafic), et l’utilisation de trains acceptant un poids à l’essieu de 25 tonnes (train de minerais).

Routes ferroviaires du minerai de fer- Source DB (2004)

Principal steelworks routes in Germany



L’avantage économique du recours à des poids à l’essieu de 25 tonnes est significatif pour des trains de minerais, mais il est, bien entendu, nécessaire de mesurer la variabilité corrélative des coûts. Selon les contacts que nous avons pu avoir avec DB-Netz, il semble que l’étude ne permette pas de trancher sur ce point.

Les suédois ont développé une liaison (trains de minerais) exploitée avec des poids à l’essieu de 30 tonnes au lieu de 25 tonnes dans le nord de la Suède (Banverket Case Study). Les trains passent ici de 5200 à 8160 tonnes. Un ensemble de travaux de renforcement a été effectué sur la ligne, touchant aussi bien à la voie qu’à un certain nombre d’ouvrages (comme les ponts). Il est prévu d’étendre progressivement – ligne par ligne- le réseau « lourd » suédois. La conclusion des travaux actuels indique les « coûts de maintenance seront probablement les mêmes en raison des meilleurs pratiques, du matériel et des nouvelles technologies ». Autrement dit, seuls les investissements sont à prendre en compte, or ils permettent une augmentation très substantielle de la productivité (15 % d’énergie de traction en moins, 50 % de locomotive en moins, ratio charge/tare en hausse de 20 %, nombre de wagons en baisse de 37 %, etc..).

La compagnie Australienne BHP-Billiton, leader mondial des mines de fer, exploite des trains miniers entre ses sites et Port Hedland. Elle exploite des trains composés de 300 à 336 wagons (moyenne de 312 contre 131 en 1972) tirés par des locomotives reliées les unes aux autres par radio. Ces trains sont présentés comme les plus longs et les plus lourds du monde (ils peuvent atteindre 682 wagons, soit 7,353 km, et 99732 tonnes, soit un chargement utile de 82262 tonnes de minerai). Les poids à l'essieu sont passés de 28,5 tonnes en 1970 à 37,5 tonnes depuis 1999. Dans le même temps, les durées de vie des voies et des roues ont considérablement augmenté. Selon la firme, une roue peut actuellement « vivre » 1858 millions de tonnes.km contre 340 millions de tonnes.km en 1980. La durée de vie des rails a évolué dans l'exacte même proportion en passant de 350 millions de tonnes à 2 milliards de tonnes (Selon nos informations, les normes actuellement retenues par RFF seraient de 700 millions de tonnes pour des rails UIC-60). Les progrès réalisés ont permis de faire progresser considérablement tous les indicateurs de productivité. Ainsi, la tonne transportée génère une consommation de 0,68 litre de gazole contre 1,45 en 1978.

Types de rails selon Jindal (Inde)

S. No.	Rail Sections	Sectional Weight (kg/m)	Specification*	
1.	P-75	74.41	GOST	
2.	UIC-60	60.34	UIC	
3.	UIC-54 E	53.823	UIC	
4.	IRS-52	51.89	IRS	
5.	UIC-50	50.88	UIC	UIC Union of International Railways UIC-860
6.	TCDD-49	46.303	S-49	IRS Indian Railway Specification T-12/96
7.	48 Kg SAS	47.60	SAS	GOST GOST Russian Specification
8.	BS-90R	44.65	BS	S-49 Turkey National Railway Specification
9.	BS-75R	37.1	BS	SAS South African Railway Specification
				BS British Railway Specification BS-11

- **Les études américaines**

La firme Zeta-Tech Associates a mené de nombreuses études relatives à l'évaluations des coûts (BNSF, CN, Conrail, CSX, Southern Pacific..) et a créé un logiciel d'allocation de coûts d'infrastructure (TrackShare). Allan M. Zarembski, et James Blaze dans leur article sur les avantages et inconvénients des poids à l'essieu élevés, étudient ce qu'il appellent le facteur de dommage, c'est à dire le rapport entre le dommage « nominal » considéré pour des poids à l'essieu de 30 tonnes (P₀), et un « nouveau poids à l'essieu » P.

Ils fournissent des indications relatives à l'exposant du facteur de dommage (que nous appellerons ici n).

Soit le dommage = **(P/ P₀)ⁿ**

Les auteurs fournissent les résultats suivants :

Exposants des facteurs de dommage selon le poids à l'essieu (source Zarembski & Blaze, Zeta-Tech Associates)

	Exposant du facteur de dommage (n)
Usure du rail	1,0
Fatigue interne du rail	3,0
Fatigue de surface du rail	1,8
Joints des rails	3,3
Fixations	1,5
Bon ballast	1,0
Mauvais ballast	5,6
Aiguillages	3,0

Ces données confirment partiellement les indications données par les autres approches, mais en contredisent certaines. Elles permettent d'affiner la variabilité des coûts en mettant en évidence finalement un changement dans leur structure (déformation due aux différences entre les exposants).

Il reste bien entendu à traduire cela en coûts. L'article donne des résultats tirés des études faites sur les compagnies américaines.

Par exemple, on observe pour BNSF que l'augmentation du poids à l'essieu de 30 à 33 tonnes, sans changement de la longueur du train permettait une économie globale de 3,3 %, ce chiffre passant à 4,2 % pour un passage de 30 à 36 tonnes. Ces résultats globaux sont obtenus en dépit d'une augmentation corrélative des coûts de maintenance de la voie respectivement de 12,5 et 30 %.

Les auteurs reviennent sur l'expérience Suédoise (Banverket Case Study). Des résultats détaillés par poste permettent de confirmer le fait que, globalement, les coûts de maintenance de la voie demeurent très proches de ce qu'ils étaient avant l'augmentation du poids à l'essieu (+8 %), mais que les autres coûts déclinaient tous (- 30 % au total environ).

- **Les points de vue d'ingénieurs**

Ces différentes questions concernant l'usage de l'infrastructure, c'est-à-dire son entretien et sa maintenance (ou le dual qu'est l'usure au sens large), et la consommation d'énergie de traction peuvent être abordées d'un point qui ne serait ni expérimental ni statistique, mais fondé sur le raisonnement théorique. C'est la raison pour laquelle nous avons interrogé plusieurs chercheurs et ingénieurs impliqués dans des travaux relatifs au chemin de fer, ou spécialistes de la résistance des matériaux mais aucunement impliqués dans des études sur la variabilité des coûts.

Notre première surprise a été de noter que ceux-ci avaient du mal à « entrer » dans cette hypothèse de variabilité. En fait, les problématiques sont décalées. Elles concernent la forme des tracés, les sols, la lubrification, la nature du ballast etc...

●3. Premières conclusions et problématiques

La confrontation de ces différentes études et la prise en compte de travaux comme ceux de J.P. Baumgartner tendant à compiler des prix et des coûts ferroviaires, doit permettre de caractériser des hypothèses de variabilité de coût.

En réalité, elle permet surtout de mesurer la difficulté qu'il y a de tirer de travaux de nature et d'inspiration différente des « courbes de comportement » permettant de simuler l'incidence combinée de différentes modifications du système ferroviaire.

Ainsi, par exemple, imaginons que nous cherchions à obtenir une augmentation de la productivité par l'entremise d'une variation de vitesse, d'une augmentation du poids à l'essieu, et d'une augmentation de la longueur des trains (et donc du poids global). Nous-nous trouvons alors en face d'une équation connue sur le plan de l'exploitation des matériels et de l'utilisation du personnel.

Pour autant il nous est difficile d'anticiper de manière précise les ordres de grandeur probables de variation des coûts de maintenance et d'énergie électrique. L'amélioration du ratio charge utile/tare semblerait dans la plupart des cas observés dépasser l'accroissement des charges de maintenance. L'économie de matériel de traction semble sensible.... Et les investissements consentis, par leur qualité ont, in fine, une durée de vie plus longue.

Il est donc possible de prétendre que des scénarios reposant sur une augmentation de la dimension des trains et de leur poids à l'essieu sont de nature à « aller dans le bon sens » (nous reviendrons sur ce point)

On peut pour autant s'interroger sur le modèle d'exploitation lui-même en ce qu'il repose sur la formation de trains. En effet, la constitution de trains reposait sur une économie de personnel de conduite (massification) et sur les technologies de traction.

Or s'il est possible d'exploiter des trains automatiques, il est de même possible d'exploiter des automoteurs.

Reste le problème des technologies de traction.

Selon certains chercheurs (André Hans, projet Vam), : « Une motorisation répartie permet de se libérer des questions d'adhérence avec une locomotive et de n'avoir que la masse strictement nécessaire à la motricité, soit environ 0,28 T par wagon de 50T (Le Mitrac de Bombardier à un facteur de puissance de 0,55 KW /kg) ».

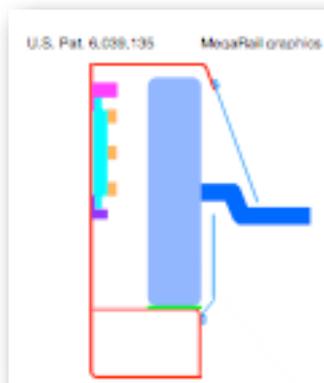
Ce concept est aussi celui développé par Siemens sous la marque « Cargomover ». C'est aussi l'un des éléments sur lequel se fondent des projets plus novateurs comme Cargorail (Megarail), et dans une certaine mesure BladeRunner, développé au Royaume Uni, qui n'est en fait qu'un poids lourd disposant de « roues ferroviaires » lui permettant de rouler en site propre.

Concept BladeRunner de Silvertip Design



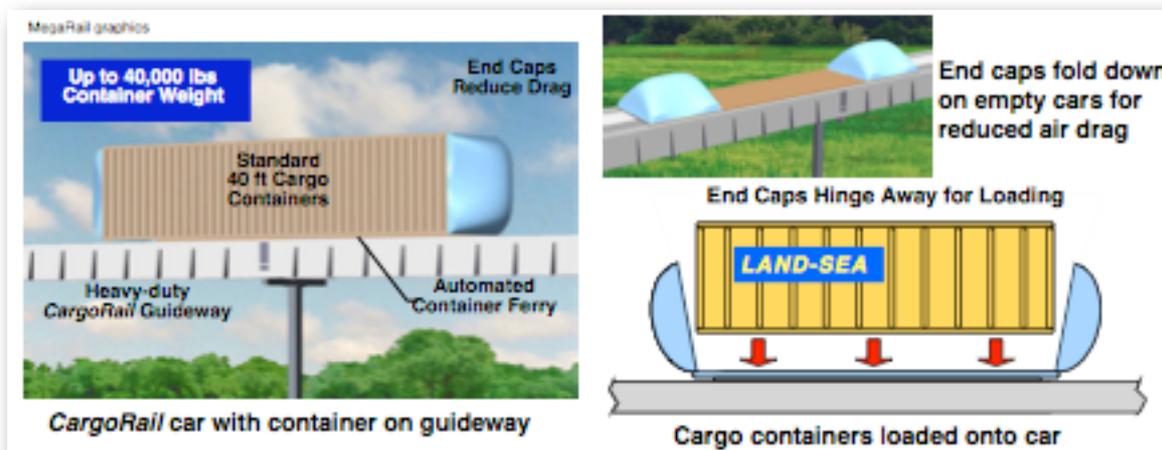
Le concept de Cargorail repose sur une innovation autrement importante. En effet, les « véhicules » MegaRail® sont guidés par des roues munies de pneus roulant à l'intérieur de rails.

Principe de fonctionnement des rails MegaRail®



Ce système qui est décliné aussi bien pour le transport de voyageurs avec le WhisperLiner™ ou le SkyCoach™, repose sur l'utilisation de wagons automoteurs spécifiques sur lesquels on charge des conteneurs (ou des véhicules).

Système CargoRail



Dans ce cas, comme dans les autres cas évoqués (Vam, Cargomover, BaldeRunner.), l'idée est bien d'échapper à la contrainte de la formation des trains, tout en tirant partie de l'alimentation électrique et du site propre. Au surplus, des techniques MegaRail et BladeRunner insistent sur le rendement de la technique utilisant des pneus.

Pour ces projets, il y aurait un avantage à ne plus former de trains tractés par des locomotives. Cet avantage ne résulterait pas uniquement de la modification de la nature de l'offre – moins rigide –, mais aussi de la moindre consommation d'énergie de traction. De même, le recours à une répartition dans la rame des éléments motorisés est considéré comme pouvant être – à certaines conditions – plus avantageux. Sans aller jusqu'à une motorisation entièrement répartie (de type R-Shift-R), la série M250 des japonais de JR Freight repose sur la composition de trains de 730 tonnes, roulant à 130 km/h, et comprenant 2 éléments motorisés (à chaque bout du train).

Mc 250-1 de JR Freight.



Series 250 EMU with two powered cars at each end and 12 intermediate trailing flat wagons

(JR Freight)

Cependant ce sont bien les problématiques des projets Vam, Cargomover, MegaRail et du projet R-Shift-R qui sont les plus intéressantes.

En effet, ces concepts « ouvrent » ou posent différemment la question des handicaps du rail en permettant une offre plus souple, des logiques d'exploitation très différentes, et une gestion des interfaces avec la route sur des bases fondamentalement différentes. On touche ici en effet à deux paramètres fondamentaux : la rigidité du système (Vam, Cargomover) et les contraintes organisationnelles du chargement et du déchargement des trains en dissociant la formation du train de toute manutention de caisses mobiles ou de poids lourds (préparation en « back-office, puis confection du train dans le cas de R-Shift-R). Du coup cela transforme radicalement les fonctions de coût.

En effet, le fractionnement des chargements permet de lisser certains coûts et de travailler en continu au lieu de travailler en « paquets » (Vam). De son côté R-Shift-R permet de changer les per-

performances globales du système en diminuant les temps d'arrêt en gare, et donc en augmentant l'accessibilité au rail. Il reste bien sûr à évaluer l'avantage éventuel de la massification en regard des avantages de la fragmentation des envois ferroviaires, et d'un meilleur lissage de l'utilisation des équipements.

□ Les autres coûts :

Les autres familles de coûts sont de notre point de vue, de nature différente.

Les coûts de d'exploitation peuvent assez simplement recomposés à partir de barèmes de coûts de matériels, des coûts des personnels affectés directement, et d'une définition des conditions d'exploitation.

Ainsi, on peut parfaitement prendre en compte – dans le cas d'un transport traditionnel prendre en compte :

- **le coût des locomotives** : Il est possible de se référer d'une part aux contrats annoncés, et aux travaux comme ceux de Baumgartner. Ils permettent de déterminer des ordres de grandeur assez convergents. Pour les machines électriques bi-courant, les prix relevés sont compris entre 2 et 2,8 millions €, et peuvent monter à plus de 4 millions € pour les quadri-courants.

Un surcoût est à prévoir pour que les locomotives soient compatibles avec les systèmes ERTMS. Ce surcoût est de l'ordre de 100 000 €/machine.

Baumgartner donne pour les machines électriques une formule pour une mono-courant¹⁰ :

Prix (en millions €) = $(W/3)+1$ où : **W est la puissance en MW** de la locomotive.

Les durées de vie sont considérées égales à 30 années, ou 10 millions de km.

On peut donc ramener le coût à :

$$P/\text{km (en €)} = \{(W/3)+1\}/10$$

soit pour une 5MW un coût kilométrique de 0,267 €/km à + ou – 20 %

Il reste donc à prendre en compte au surplus les coûts de maintenance. Ces coûts sont évalués par Baumgartner à :

$$\text{Coût de maintenance (en €)} = 0,2 * P/1000000 \text{ au kilomètre.}$$

Soit pour 5 MW

On a donc un coût approximatif kilométrique de locomotive (CTL) de

$$\text{CTL (en €)} = \{(W/3)+1\}/10 + 0,2 * \{(W/3)+1\}$$

Soit pour 5 MW :

$$\text{CTL} = 0,267 + 0,535 = 0,8 \text{ €}$$

¹⁰ Pour les systèmes à motorisation répartie (Electric Multiple Unit), la formule donnerait Prix (en millions €) = 2W+2, ce qui donnerait pour une 5MW : 12 millions €

Le coût des wagons : les wagons ont un coût essentiellement variable en raison de leur nature. S'agissant de wagons destinés à transporter des Unités de Transport Intermodal ou des véhicules, il est possible de déterminer une fourchette qui dépend des performances des matériels et de leur fonctionnalité. On trouve sur le marché des wagons porte-conteneurs européens à 45 000 €, et pouvant atteindre (Modalohr) 350 000 €. Les Wagons de type Novatrans coûtent de l'ordre de 85 000 €. Baumgartner donne une fourchette pour les wagons plats de 50 à 80 000 € et estime le coût des wagons à petites roues à 120 000 à 180 000 € et de 130 000 à 200 000 € pour les double-stack. La durée de vie des wagons serait proche de 15 ans. Sur cette base les coûts kilométriques (non actualisés et hors financement, bien entendu) sont très faibles, de l'ordre de 0,02 à 0,05 €/km. On pourra sans doute faire des hypothèses plus pessimistes sur la durée de vie des wagons. Il faut retenir que les wagons à petite roue ont une durée de vie plutôt plus faible. Les coûts de maintenance sont bien entendu variables et jouent une place essentielle. On trouve des estimations comprises entre 0,05 et 0,13 € et de 0,25 à 0,5 € pour les wagons à petites roues chez Baumgartner. Ces coûts sont variables en fonction de la vitesse. Ils seraient multipliés par 4 lorsque l'on passe d'une utilisation à 80 km/h à 120 km/h selon une observation faite en Italie. Par ailleurs nous avons pu déterminer que les essieux devaient être changés 3 fois plus souvent lorsque l'on passe de 120 km/h à 140 km/h. Cette indication permet de considérer que l'augmentation corrélative des coûts annuels serait de plus de 40 %. Les coûts observés des wagons américains ne sont pas très sensiblement différents (entre 0 et + 25 %). Leur plus grande capacité, leur plus importante charge à l'essieu permet donc probablement un coût à la tonne.km utile plus faible. Pour les wagons double-Stack on aurait des coûts de maintenance de l'ordre de 0,15 €/km. On peut également signaler le coût des équipements de type Road-Railer.

Equipement Road-Railer



Une compagnie US a acheté récemment 200 semi-remorques Road-Railer et 130 bogies pour 13 millions de \$11. Si on considère qu'une semi-remorque « normale » représente un coût de 25 à 30 000 €, cela ramène le bogie Road-Railer à environ 50 000 €, chiffre auquel about également Baumgartner. Il convient de noter ici que la composition d'un train demande un nombre de bogies égal à N+1 semi-remorques... ce qui ramène le prix du train à un niveau faible.

¹¹ Les trains Road-Railer aux USA sont composés d'environ 125 semi-remorques.

• le coût des systèmes de manutention et de transbordement :

Dans un système de transport combiné, le maillon du transbordement joue un rôle central. Son coût est grossièrement décomposable en trois grandes composantes :

Les coûts d'infrastructures du « chantier » ou centre de transport combiné. Ce coût comprend le coût du foncier, celui des voies de chemin de fer, et de la « cour » proprement dite, c'est-à-dire des voies de circulation, de stationnement, de stockage éventuel, et dans les systèmes plus évolués (R-Shift-R) de préparation des praticables. Il comprend également des équipements spécifiques (verrouillage Modalohr par exemple). Les coûts observés sont ici très variables et ne sont pas toujours complets. Un chantier construit dans le sud de la France a été évalué à 10 millions € pour moins de 6000 m² utiles sur une emprise de 20 à 40 ha, chiffre qu'on retrouve approximativement pour la plate-forme d'Aiton. Dourges (34 ha pour le combiné avec un faisceau ferroviaire de 10 ha) aurait coûté, selon l'UE, 66,5 millions € et 49,4 millions € selon la Datar. Le coût de l'extension du chantier de Perpignan est estimé à 35 millions €. Le centre de transport combiné de Clesud (60 ha) était estimé à 22 millions €. Aux Usa, le port intérieur de Virginie aurait coûté une dizaine de million € il y a une quinzaine d'années. Baumgartner estime le coût d'une plate-forme continentale compris entre 50 et 200 millions €.

Les coûts relatifs aux équipements de manutention comme les grues, portiques et autres engins sur roue ou sur rail, ainsi que les éventuels automates assurant le déplacement des unités de chargement ou des praticables. Les coûts actuels varient d'environ 500 000 € pour les engins de manutention routiers, à 1 à 3 millions € pour les portiques sur rail. Ces matériels peuvent avoir une durée de vie de 10 ans en moyenne (5 ans en cas d'usage intensif).

Enfin les coûts d'exploitation (énergie en particulier), de gestion (charges fixes et variables administratives nécessitant des charges de bâtiment), et de personnel. L'organisation et le mode d'exploitation du chemin de fer ont ici des conséquences majeures moins sur le coût direct des facteurs que sur leur productivité (massification vs lissage et fragmentation).

•La grille retenue pour l'étude systémique de l'axe

A partir des éléments discutés ci-dessus, il est possible de construire un outil de simulation tendant à restituer les coûts d'exploitation sur un axe dédié, en fonction d'hypothèses relatives au système de transport et au flux d'équivalent poids-lourds (EPL) traités. Nous avons traité le problème par bloc, étant entendu que nous pourrions non seulement compléter et affiner chaque sous-ensemble du simulateur, mais aussi éventuellement complexifier certaines relations dans la seconde phase de notre étude.

Dans un premier temps, nous avons construit un simulateur global sous STELLA® qui est un logiciel de dynamique des systèmes permettant de simuler dans le temps à la fois le calcul des coûts, mais l'organisation concrète de la circulation des trains et de la manipulation des Unités de Transport Intermodales (UTI). Ce travail - voir troisième partie - a servi de base à la réalisation du simulateur de l'Axe dans son ensemble.

Le simulateur global - et donc simplifié - que nous avons réalisé dans un premier temps a permis de faire des calculs de vraisemblance sur une base journalière sur une période d'une dizaine de jours avec une unité de temps d'une heure. Les calculs sont effectués (équations différentielles) sur la base d'un « dt » de 0,01 heure.

Nous n'avons pas repris ici la description du modèle (elle figurait dans le rapport intermédiaire de première phase), celle ci devant de toutes façon être faite dans le cadre du modèle de simulation de l'axe lui-même dans sa complexité.

Etude de faisabilité : la construction d'un simulateur et son utilisation

□ Position du problème

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à concevoir un simulateur permettant de calculer les coûts de transport sur l'axe dédié "Axefret". Ce simulateur pouvait se contenter d'une simulation pendant quelques jours, l'idée étant essentiellement de simuler le fonctionnement physique du système et d'en mesurer le coût; Ces simulations pouvant être extrapolées ensuite.

Dans cette première phase d'étude, et pour simplifier l'approche et la tester, nous avons construit un bloc de calcul "simulation du parcours" qui se contentait de prendre en compte le seul parcours de bout en bout en ne prenant en compte que globalement les arrêts intermédiaires.

L'objectif étant essentiellement de nous plonger sur la simulation des coûts, cette hypothèse simplificatrice avait l'avantage de nous permettre de nous concentrer sur la modélisation des autres blocs (en particulier les calculs de coût), leur calage et de permettre de mener quelques simulations permettant de commencer à ébaucher les problématiques qui seront celles du simulateur définitif. Pour autant, l'un des objectifs du cahier des charges étant de permettre une accessibilité au territoire suffisante, il convenait, dans un second temps de reprendre le bloc "simulation du parcours".

□ Bloc de simulation du parcours

Le bloc conçu initialement reposait sur un modèle simple.

A partir d'un niveau moyen de demande journalière entre les deux points du parcours, le modèle calcule une demande horaire (le pas de calcul du modèle est l'heure) qui est variable selon l'heure de la journée. Sur cette base, des poids lourds arrivent sur site et transitent par un parking. Le processus de manutention (en réalité le processus global de prise en charge et de manutention) s'établit alors en fonction du nombre de voies, du nombre de portiques par voie, et naturellement, de la technologie utilisée (via une variable de temps unitaire de chargement). En pratique, nous engageons alors le processus effectif de formation des trains, en limitant strictement ce processus à ce que permet l'équipement de manutention.

S'engage alors un processus de formation des trains, dont la durée dépend de la nature des trains, de l'équipement (voies, portiques) et des techniques utilisées (via le temps de chargement). Les trains étant prêts à partir, un "top départ" est donné en fonction de l'espacement souhaité des sillons, tout en vérifiant le respect de l'espacement de sécurité. Différentes options pouvaient être retenues en ce qui concerne le départ des trains. On peut parfaitement à ce niveau imposer en effet des taux de remplissage, ou au contraire privilégier le respect des horaires de départ.

ports descendants, mais également les transports montants sur l'axe. Cette méthode a le mérite de bien visualiser la complexité physique du système.

- * Une seconde méthode consiste à proposer une représentation matricielle des choses, les 7 gares fonctionnant finalement de la même manière et ayant à assurer deux sens de trafic. Nous avons donc à simuler le fonctionnement de couples (gare, sens).

Nous avons finalement opté pour la seconde solution qui comporte plusieurs avantages importants, au premier desquels figure la simplicité apparente du modèle. Parmi les autres avantages, il nous est apparu, au cours du travail de formalisation que la recherche de formules génériques conduisait à définir des comportements stratégiques (nombre de voies, nombre de portiques), ce qui finalement permet de mieux finaliser le simulateur.

□ Le modèle retenu pour le bloc de simulation des parcours sur l'axe et la production des gares

• Le modèle : principes

• Les gares

Le modèle retenu utilise donc des variables matricielles. La logique formelle est comparable à celle déjà exposée. Les véhicules arrivent en gare, attendent le chargement et la formation des trains, puis partent au gré du "top départ". Chaque gare est calibrée en fonction du trafic potentiel. Elle reçoit donc des chargements locaux, et réceptionne des trains qu'elle doit décharger puis charger des unités de chargement à expédier. Nous avons opté - pour simplifier les calculs et respecter à tout coup les priorités - une formulation en deux temps. Dans un premier temps les trains arrivent et sont déchargés, puis chargés ensuite. Cette formulation permet en effet de ne pas risquer de faire "tourner en rond" les wagons.

Dans le modèle, on enchaîne donc deux équations :

$$\text{Arrivés_gare[Gares,Sens]}(t) = \text{Arrivés_gare[Gares,Sens]}(t - dt) + (\text{Amont[Gares,Sens]} - \text{Déchargement[Gares,Sens]} - \text{vers_chargement[Gares,Sens]}) * dt$$

$$\text{INIT Arrivés_gare[Gares,Sens]} = 0$$

A ce niveau se gèrent les déchargements, puis les unités vont au chargement

$$\text{Attente_en_Gare[Gares,Sens]}(t) = \text{Attente_en_Gare[Gares,Sens]}(t - dt) + (\text{Chargement_camions[Gares,Sens]} + \text{vers_chargement[Gares,Sens]} - \text{Départ_UTI[Gares,Sens]}) * dt$$

$$\text{INIT Attente_en_Gare[Gares,Sens]} = 0$$

Cette équation est celle qui permet de savoir combien d'Unités de transport, sont, dans chaque gare, prêtes à partir.

Les départs sont donnés par l'équation générique initiale suivante :

$$\text{IF Attente_en_Gare[Gares,Sens]} < (\text{Nombre_Wagons_par_train} * \text{UTI_par_wagon}) \text{ THEN } 0 \text{ else Top_départ} * (\text{Nombre_Wagons_par_train} * \text{UTI_par_wagon})$$

Le principe de l'organisation retenue pour les départs est le suivant : on fait partir à chaque "top de départ" en fonction de l'espacement des trains donné par le graphique et les contraintes de sécurité, un nombre d'unités égal au nombre d'unités composant un train à conditions que l'on

dispose du nombre d'unités permettant de former un train complet. Cette option "maximaliste" est possible dès lors que l'on travaille sur des volumes importants. Pour autant il nous a semblé préférable de retenir la possibilité de moduler cette contrainte dans le modèle à X % près.

Départ_UTI[Gares,Sens] = IF Attente_en__Gare[Gares,Sens]< X%_près*(Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon) THEN 0 else Top_départ*(Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon)

En réalité, la nature même des données exogènes de potentiel de trafic ne garantit pas un fonctionnement parfaitement cohérent d'un système de trains. Le problème est en effet ici de gérer - dans chaque gare, et en réalité pour chaque sens de trafic dans chaque gare - les mouvements de chargement et déchargement. Le modèle gère, rappelons-le, des flux. Il convient pratiquement, à chaque arrêt de train, de gérer les entrées, les sorties et les départs en assurant un "ordre" de traitement donnant la priorité au déchargement "demandé". En effet, chaque gare (pour chaque sens de parcours) "demande" une certaine quantité d'unités devant être déchargées, au même titre qu'elle dispose d'une demande de chargement. Il est donc logique que le système mette un certain temps pour trouver un équilibre. Pour autant, rien n'indique que le plan de transport demandé soit cohérent et viable. Il nous a donc semblé logique de prévoir soit de "réguler" les attentes au chargement, étant entendu qu'un service ne sera pas utilisé si les temps d'attente sont excessifs et des parkings démesurés. La formulation de ce mécanisme de régulation générale, mais mis en oeuvre dans chaque gare et pour chaque sens de trafic, peut être définie de plusieurs façons.

- * Une première logique peut consister à **limiter formellement la taille du parking**. On peut par exemple considérer que l'on limite l'accès au parking en prenant en compte l'occupation du parking (option actuellement retenue)
- * Une seconde logique pourrait **prendre en compte le nombre de wagons chargés en attente** de départ (en ne prenant en compte que les wagons issus de la gare), **ou encore les temps d'attente...**

En fait, cette question ne se pose qu'en cas d'insuffisante capacité - quelle qu'en soit l'origine - et ne vise qu'à calculer une éviction de trafic, et éviter que les temps d'attente ne soient explosifs.

La principale et seule complexité du bloc tient au fait que le flux en amont de la gare (gare i) est constitué du flux arrivé à la gare précédente mais toujours noté gare i-1 :

La forme générique est la suivante :

Amont[Nord,Montant] = Arrivée_Gare_depuis_la_gare[Picardie,Montant]

pour les flux montant ou encore :

Amont[Sud_Idf,Descendant] = Arrivée_Gare_depuis_la_gare[Ouest_Idf,Descendant]

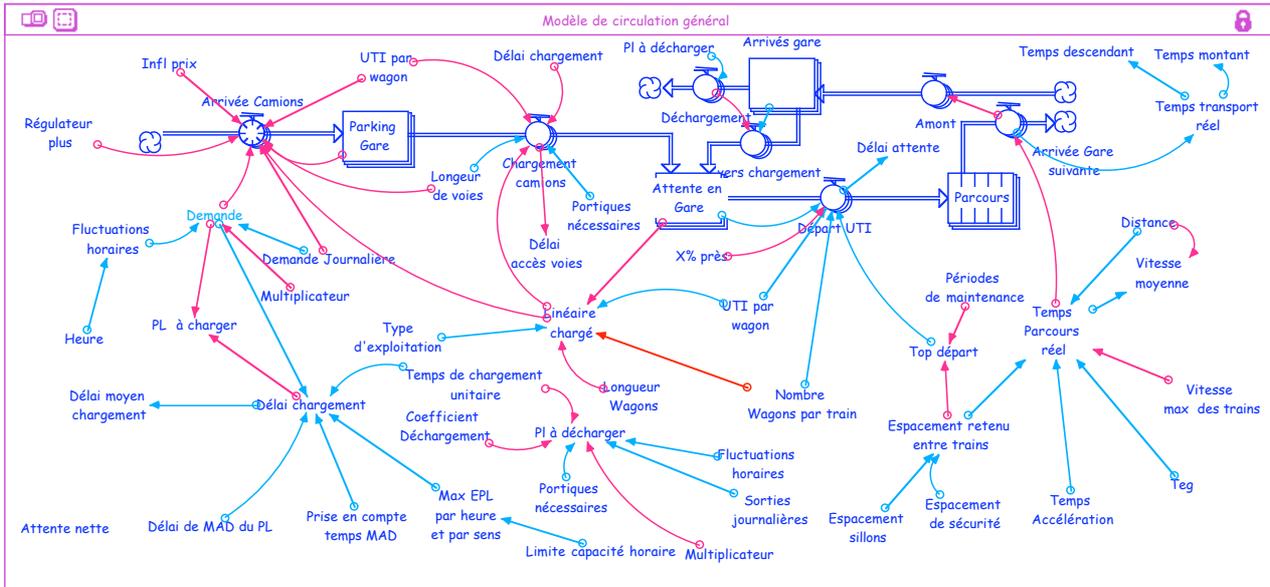
pour les flux descendants.

En pratique nous désignons pour chaque flux amont (gare, sens), la gare située en amont : ainsi un flux montant arrivant à la gare "Nord", provient de Picardie (montant). Un flux descendant arrivant en gare du sud de l'Ile de France, provient de l'ouest de l'Ile de France et est descendant.

Cette représentation simple du fonctionnement des gares va permettre de tester la cohérence globale du système de transport sur l'axe.

C'est à partir de ce bloc que sont calculés différents temps qui peuvent ensuite être sommés, ou dont on peut faire des moyennes. Bien entendu, il est possible de suivre le fonctionnement de chaque gare dans chaque sens.

Bloc de calcul du modèle "détaillé" pour la simulation du parcours



L'utilisation du bloc ci-dessus nécessite que certaines variables soient définies. Outre les variables de demande (un volume journalier est décliné par heure en fonction de coefficients paramétrables) nous avons défini une nouvelle variable de limite de capacité (Max EPL par heure et par sens) qui découle de l'espacement des sillons, et de la "capacité de chaque sillon", ce qui intègre à la fois la longueur des trains et le gabarit de la ligne. Ce calcul ne change rien d'essentiel, mais explicite le résultat plutôt de se limiter finalement à une contrainte implicite. De même, on calcule automatiquement et pour chaque gare (7*2=14 gares*sens) le nombre de voies et de portiques nécessaires.

- **La simulation du départ des trains**

Comme on l'a dit plus haut, un "top départ" est donné aux trains en fonction de l'espacement retenu entre trains. Ce nombre est égal au plus grand des deux espacements pris en compte à savoir l'espacement de sécurité et celui du "graphique théorique". Une utilisation souple de la ligne est possible en neutralisant le "graphique théorique" au profit du seul espacement de sécurité.

Nous avons prévu la possibilité de neutraliser une période de maintenance, par une variable qui prend comme valeur 0 à certains moments.

Il était possible d'imaginer deux types de modélisation distincts de la gestion des départs de trains.

- L'un consiste, comme nous l'avons fait à utiliser **une fonction générant des flux discontinus**. Nous utilisons ici la fonction "pulse". Celle-ci permet à intervalles donnés - ici nos espacements entre trains - de déclencher une action.

L'équation est la suivante :

$$\text{Top_départ} = \text{Périodes_de_maintenance} * \text{PULSE}(1, .05, \text{Espacement_retenu_entre_trains})$$

La fonction Top départ génère, lorsque nous ne sommes pas en période de maintenance, un signal de départ, à intervalle égal à l'espacement entre les trains.

Ce signal est égal à 1 pendant un dt.

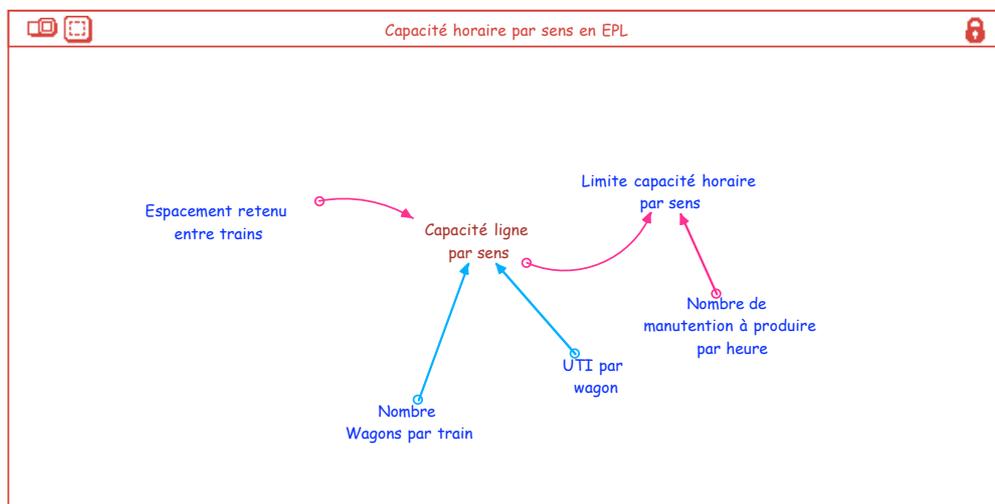
- L'autre formule consiste à considérer que **le mécanisme est comparable à un processus continu** générant un flux proportionnel à l'espacement des trains. Ainsi un espacement de 0,05 un flux égal à 20 fois ce que serait un flux horaire.

L'analyse montre que ces mécanismes sont en pratique numériquement très comparables. Le choix d'une formulation consiste finalement uniquement à respecter le fonctionnement formel du système. L'activation de la prise en compte de "paquets" de wagons "discrets" relève du même soucis, mais ne change rien de fondamental en ce qui concerne les résultats numériques.

Inversement, la simulation "continue" de mécanismes discrets permet de simplifier la modélisation. Elle permet de s'affranchir d'une écriture plus complexe du modèle. Nous ne l'avons pas retenue ici pour la gestion des gares par pur soucis de réalisme du modèle.

- **La capacité de la ligne et détermination des équipements en gare**

Détermination de la capacité maximale de la ligne



La détermination de la capacité de la ligne - déjà signalée ci-dessus - découle d'un calcul élémentaire mettant en oeuvre l'espacement réel entre les trains, et les paramètres techniques des trains. On déduit par ailleurs une limite de capacité horaire. Ce calcul, plus complexe tend en réalité à prendre en compte à la fois les contraintes de la ligne et celle des chantiers de transport combiné. La limite de capacité est considérée ici comme étant la limite la plus contraignante (fonction minimum).

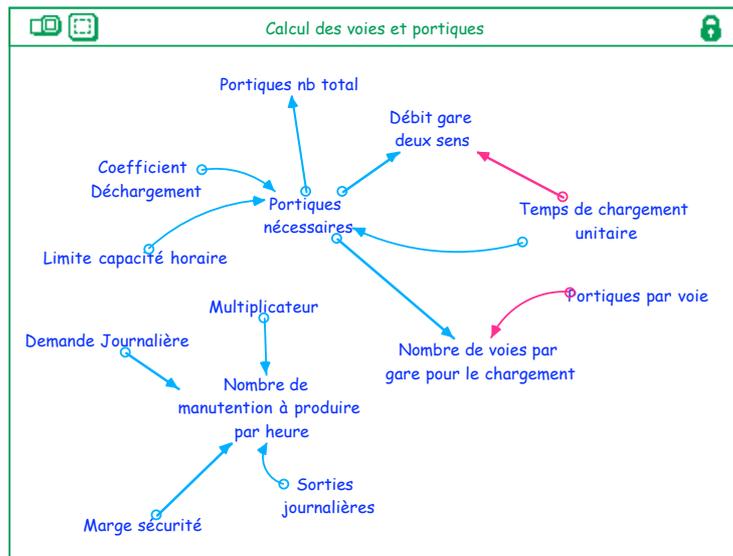
$$\text{Limite_capacité_horaire_par_sens[Gares,Sens]} = \text{Min}(\text{Nombre_de_manutention_à_produire_par_heure[Gares,Sens]}, \text{Capacité_ligne_par_sens})$$

Dans certains cas particuliers, cette formulation peut conduire à "sous-optimiser" le système. Ainsi, si nous avons un espacement important des trains - par exemple un par heure - on diminue alors la capacité de la ligne par sens - telle que nous l'avons définie - ce qui aboutit in fine à opter pour un moindre équipement des gares, équipement qui permet donc moins bien de faire face aux pointes de trafic, même en prenant en compte la variabilité du nombre de poids lourds arrivant en gare.

- **Détermination du nombre de voies et portiques**

La détermination du nombre de voies en gare et de portiques par voie résulte d'un calcul qui d'un côté consiste à déterminer - par chantier - et avec une marge de sécurité, un nombre de manutention à produire par heure. Par ailleurs en fonction de la capacité de la voie, on détermine un nombre de portiques, et en fonction du nombre de portiques retenu par voie, le nombre de voies de chargement pour chaque gare. Le choix d'une marge de sécurité est théoriquement fait pour faire face à des fluctuations de demande dans la journée (per extension, la semaine, le mois etc...). En pratique on peut opter pour différentes stratégies selon qu'on accepte ou non des queues, et l'importance de ces queues. En outre, l'importance des temps d'attente est un facteur de qualité, et génère des coûts (surface de parkings).

Calcul des voies et portiques



- **Quelques spécificités du Modèle**

Le passage d'un modèle ultra simplifié à un simulateur du fonctionnement des gares une à une et pour chaque sens a nécessité par ailleurs un certain nombre de modifications complémentaires.

- **Des régulateurs pour prendre en compte la qualité**

La principale consiste à mettre en place un certain nombre de "régulateurs" - en réalité des boucles de contrôle - permettant, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, de limiter de manière assez stricte les temps d'attente. En réalité, ces régulateurs permettent de prendre en compte directement la qualité de service. Il est d'ailleurs possible de la suivre par relation, par sens et par gare. En pratique un tel régulateur n'a d'intérêt qu'en cas de sous-capacité pour éviter que les files d'attentes n'exploient. Une boucle plus fondamentale pourrait réduire purement et simplement la demande.

- **Péage ou coût ?**

Une seconde option a été introduite. Il s'agit de permettre de distinguer une approche en termes de coût complet - qui est la base du modèle - d'une approche permettant de prendre en compte

d'une part le coût complet d'exploitation du service ferroviaire, et de l'autre un tarif d'infrastructure.

Un tel tarif - dans le cas d'une infrastructure dédiée - et qui plus est dans un contexte de forte hétérogénéité des tarifs en Europe n'a aucune chance de reposer sur une grille comparable à la grille française actuelle, ne serait-ce qu'en raison de son inadéquation à une exploitation dédiée. Les notions habituelles perdent partiellement de leur sens. Il nous semble donc logique d'imaginer qu'un tarif - éventuellement modulé suivant les heures en fonction directe des fluctuations de la demande - serait appliqué au train au prorata de sa longueur. Reste à savoir si le péage est fonction de la réservation, du trafic ou d'une moyenne des deux.

Dans un premier temps nous avons opté par soucis de simplicité pour un péage qui serait une simple fonction du nombre d'UTI acheminées.

Nous sommes partis d'un péage qui aurait pour base 2€/km pour un train de 750 mètres, soit environ **0,05 €/équivalent poids lourds. Il peut bien entendu être modulé.** Dans l'option de base, ce péage varie en fonction du moment de la journée, et donc de la demande¹².

- **Incidence du prix sur la demande**

Il est possible également d'envisager de moduler la demande en fonction du prix pratiqué (ou, pour être plus exact, du coût ou de mix coût d'exploitation et péage d'infrastructures)

Le plus simple est d'imaginer une sensibilité au prix correspondant aux formes habituelles de répartition de la demande en fonction du prix. En prenant pour base un prix considéré comme étant celui du transport de bout en bout, corrigé pour prendre en compte l'incidence des allongements résultant de l'intermodalité (en fait minoré pour être comparable), il est donc possible de tester le modèle en fonction des comportements aux prix.

Pour autant, il convient de bien en mesurer les conséquences. S'agissant d'un modèle dynamique, la boucle des prix conduit inexorablement à une baisse de la demande, qui, au bout d'un certain temps, conduit à une baisse du transport puis une hausse significative (en fait exponentielle) des coûts unitaires complets d'infrastructures, qui incorporent, rappelons-le un amortissement fixe annuel. Le modèle étant fondamentalement fondé sur les coûts et non le marché, cette fonctionnalité est d'un intérêt limité.

- **La question de l'équilibre du système.**

Au total, la forme retenue pour le modèle (un simulateur de l'axe retenu pendant quelques jours, heure par heure) permet de mesurer l'incidence immédiate, qui serait en réalité visible au bout d'une période plus longue, des conditions de fonctionnement et d'exploitation de l'axe.

Le phénomène le plus complexe à traiter convenablement de manière synthétique demeure le mécanisme d'attente au chargement et au déchargement. En pratique, nous butons non seulement sur des problèmes éventuels de gestion de capacité, mais aussi sur la nature même du trafic, puisque nous sommes partis d'une analyse de la demande potentielle, et non d'un trafic a priori équilibré. En effet, nous n'avions pas posé a priori que les flux étaient équilibrés, mais que nous devons nous adapter au mieux à une demande disparate, fluctuante et relativement peu équilibrée dans l'espace.

Pour autant cette hypothèse, pour intéressante qu'elle soit a un intérêt limité. En effet, le fonctionnement d'un système déséquilibré implique un mécanisme de consolidation soit dans le

¹² Nous avons opté pour un tarif directement proportionnel au poids horaire de la demande.

temps (parcours à vide) soit dans l'espace (organisations triangulaires par exemple), qui aboutissent in fine, pour un axe donné, soit à limiter le trafic au niveau du flux minimal, soit au contraire à générer un flux excédentaire, les deux flux étant égaux au flux maximal. Dans ce cas un flux "à vide" ou partiellement à vide est généré.

En pratique la réalité nous est partiellement inconnue, puisque nous avons reconstitué des flux à partir de calculs opérés non sur des véhicules, mais des tonnes transportées à partir d'une matrice origine -destination. Au surplus, les niveaux de saturation des véhicules varient selon les produits, leur densité, leur mode d'emballage, leur forme, etc... Il est donc difficile de donner une image précise de la réalité des déséquilibres réels de flux de véhicules. Nous avons donc finalement considéré comme plus simple et tout aussi rigoureux, de partir de deux vecteurs d'émission et de réception équilibrés. On rappelle en effet, que dans notre système, les flux sont en réalité mesurés sur chaque coupure (entre deux gares). Le modèle finalement retenu repose donc sur des flux équilibrés. Cela évite en outre une modélisation inutile des parcours à vide. En effet, il suffit dès lors de prendre en compte a posteriori le déséquilibre des flux, ce qui revient à majorer les coûts unitaires. Cet artefact permet en pratique d'éviter une modélisation complexe et donne strictement le même résultat, un coefficient permettant de passer du coût et des trafics calculés aux mêmes données prenant en compte les parcours à vide.

Mais revenons à la question de la question fondamentale de la gestion des gares. Celle-ci est d'ailleurs au coeur des réflexions novatrices sur le système ferroviaire (R-Shift-R), le problème étant de gérer en peu de temps un ensemble complexe d'opérations de chargement et de déchargement, les trains étant en gare, ou bien de repousser une partie de ces opérations à des moments où les trains ne sont pas en gare.

Dans le modèle il est possible de décomposer les temps d'attente en gare en deux composantes. L'une concerne l'accès et l'accueil du poids lourd, l'autre les opérations de chargement. Il est possible dans le modèle de ne pas prendre en compte le temps de mise à disposition du véhicule dans le temps global de chargement. Cette option permet de prendre en compte une sorte de préparation en "back-office" du chargement.

Les deux temps (chargement proprement dit, et mise à disposition de l'unité de transport) sont paramétrables. En pratique ces temps permettent de déterminer un délai. Mais le chargement effectif dépendra de la disponibilité des voies, et donc de l'organisation des départs et du chargement des trains après déchargement des wagons. C'est à ce niveau que l'équilibre global de la structure de la demande joue un rôle central.

La forme retenue pour le modèle permet une approche séquentielle qui n'est nullement problématique. En effet, bien que les délais de chargement et de déchargement s'additionnent, la modélisation permet à notre sens de rendre compte une bonne fluidité des opérations. Le délai de déchargement est égal au seul temps de manutention retenu dans le modèle.

- **Intégration de périodes de maintenance**

Le modèle est conçu pour pouvoir intégrer des périodes de maintenance. Ces périodes - dans la version de base - sont fixées de manière uniforme. Il est relativement simple de les rendre variables en fonction des parcours et donc des densités de trafic.

- **Le modèle comme simulateur de coûts**

Le modèle de simulation reprend les fonctionnalités du modèle simplifié. Quelques adaptations permettent en effet de passer d'un modèle à deux chantiers identiques fonctionnant dans un seul sens de parcours, à un modèle généralisé.

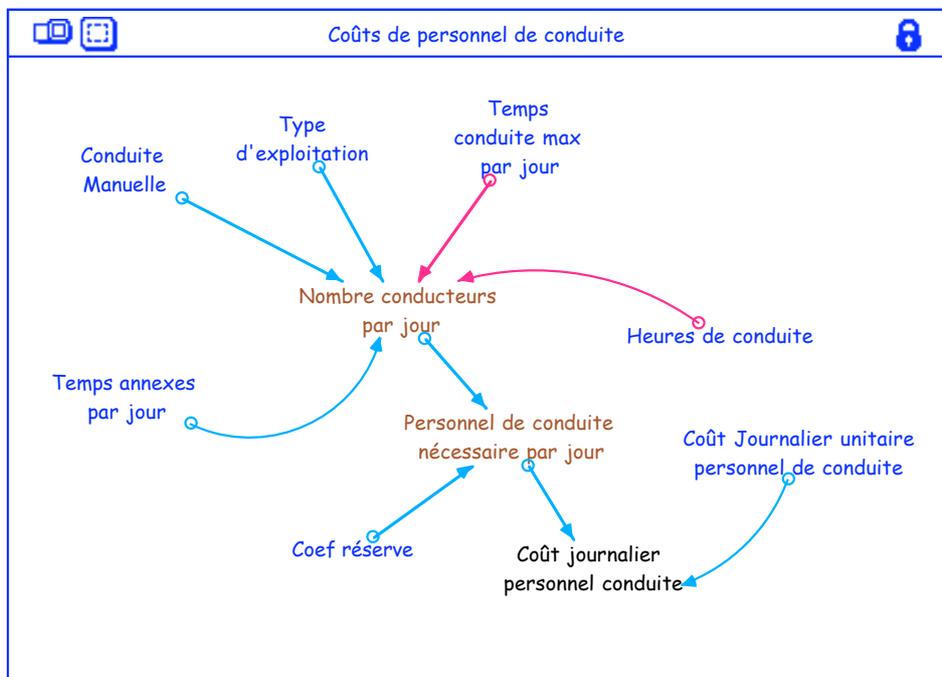
- **Les coûts de personnels de conduite**

Les coûts de personnel de conduite sont établis à partir de coûts unitaires, des normes sociales, et d'une estimation du temps de conduite nécessaire.

Le calcul retenu est très simple puisqu'il consiste à prendre en compte la vitesse moyenne effective et les trains.km produits pour estimer les heures de conduite nécessaires. Bien entendu, ce montant est majoré de temps annexes, et un coefficient de réserve est appliqué pour tenir compte de la nécessité d'avoir en permanence du personnel disponible. Tous les éléments sont paramétrables et ne posent pas de problème technique spécifique... si ce n'est de déterminer l'importance du coefficient de réserve.

On a prévu par ailleurs une option de conduite automatique (variable "conduite manuelle) qui majore un certain nombre de coûts relatifs au matériel de traction.

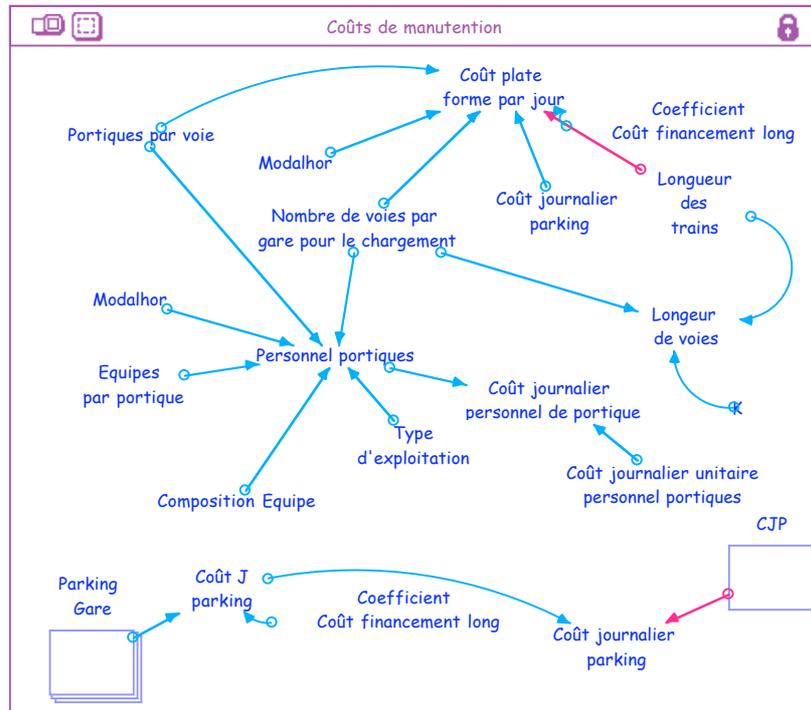
Coûts des personnels de conduite



- **Les coûts de manutention**

Les coûts de manutention sont extrêmement dépendants des options techniques retenues. Pour autant, nous prenons en compte ici la configuration de la plate forme, le nombre de portiques utilisés, et les coûts des personnels de manutention. Ces différents éléments sont largement paramétrés et paramétrables. On considère actuellement des centres fonctionnant en continu. La manutention peut continuer pendant les heures de maintenance des voies. En pratique le niveau modique des manutention au départ au milieu de la nuit permet sans doute de réaliser la maintenance. Pour autant il est possible d'intégrer une période (par exemple journalière) d'arrêt complet de fonctionnement des gares. La question de la maintenance des parkings pourrait également être intégrée si l'on devait faire un modèle de simulation sur une longue période.

Coûts de manutention



Il est bien entendu possible de modifier ces hypothèses d'exploitation des chantiers comme ceux relatifs à l'exploitation ferroviaire (périodes de circulation, etc...)

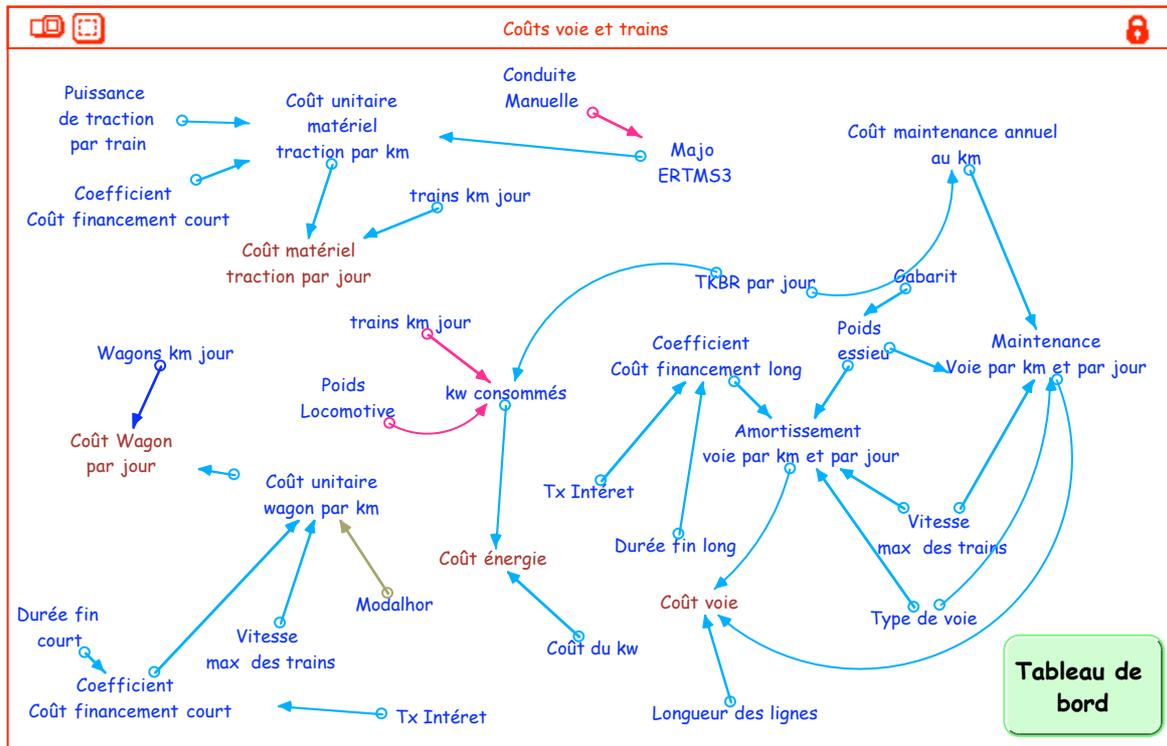
- **Les coûts de voie et les coûts relatifs aux trains**

Ces coûts sont intrinsèquement plus complexes à analyser, dans la mesure où leur connaissance analytique ne permet pas toujours de les bien répartir (encore moins affecter), ni de bien mesurer leur variabilité en fonctions des paramètres d'exploitation. Ce bloc sera donc à la fois le plus difficile à renseigner par des valeurs consensuelles, et bien entendu à confronter à une réalité mesurable. Ceci est d'autant plus « vrai » que l'on suppose une organisation « autonome » utilisant des moyens dédiés.

Les hypothèses que nous avons retenues découlent des réflexions présentées plus haut. A partir de coûts unitaires « journalisés », nous avons recomposé les différents coûts (équipements, maintenance, énergie, matériel...), que nous avons relié à l'activité (Tkbr) et à des facteurs de coût (comme le poids à l'essieu, la vitesse, etc...).

Les investissements journalisés sont multipliés par un facteur qui prend en compte éventuellement le financement des actifs immobilisés (ou le taux d'actualisation). Ce coefficient, pour un taux d'intérêt annuel de 4 % serait de l'ordre de 1,7 pour une durée de 30 ans, et de 2,1 pour une durée de 10 ans. Les paramètres concernant le financement sont présentés parmi les variables exogènes du modèle.

Coûts des voies et des trains



Ce bloc est particulièrement important. C'est à ce niveau que se déterminent nombre de coûts ferroviaires, coûts qui sont, nous l'avons exposé, difficiles à reconstituer en pratique pour une ligne dédiée. Nous avons retenu une présentation relativement analytique et intégré les variables qui nous semblent agir directement sur le niveau des coûts unitaires.

Certaines équations sont centrales. Celle qui concerne les coûts d'infrastructure est essentielle, elle repose sur des niveaux de coût kilométriques déduits d'un amortissement en 30 années. Nous avons par ailleurs opté pour l'imputation d'un coût de financement, plutôt qu'un calcul d'actualisation (ce qui revient pratiquement au même). Le coût de maintenance dépend de son côté du trafic, du poids à l'essieu et de la vitesse. Les équations correspondantes sont bien entendu discutables, mais découlent du travail bibliographique que nous avons effectué. On peut tester l'incidence de sa formulation sur les coûts. Les équations relatives au coût du matériel sont plus classiques, et bien entendu pourraient être paramétrées. Différentes hypothèses sur les coûts de matériels très innovant pourraient être testées.

Enfin les coûts d'énergie sont proportionnels aux TKBC. Il conviendrait sans doute de les paramétrer pour intégrer un formulation plus complexe.

Encadré : la question du "dt"

Le choix du "dt" - qui est l'intervalle de temps entre deux calculs - est essentiel.

On opte pour un dt qui est compatible avec la nécessité de faire un certain nombre de fois des calculs numériques pendant une unité de temps (ici l'heure). Deux considérations doivent être prises en compte. La première concerne la recherche de la précision des calculs, et le respect de délais définis dans le modèle. La seconde tient à la vitesse à laquelle la simulation est opérée. Le choix d'un petit dt permet en outre de lisser les évolutions et d'éviter les chocs excessifs.

Une règle peut être de prendre comme dt la moitié du plus petit délai du modèle.

Dans notre cas, le délai le plus petit est probablement celui qui résulte de l'espacement de sécurité des trains. Ce délai est donc variable et fonction de la longueur et de la vitesse des trains. Ce délai peut être inférieur à 0,01 heure, et suggère donc un dt de l'ordre de 0,005, ce qui est très petit et ralentit le fonctionnement du modèle. Pour autant cette "finesse" est nécessaire pour obtenir des calculs plus rigoureux sur les délais réels de transport.

□ Utilisation du modèle

L'utilisation du modèle permet d'étudier la cohérence globale du fonctionnement du système, et, éventuellement, de mettre en évidence certains problèmes.

Le principe retenu pour nos tests, au delà du calage du modèle, toujours long à effectuer, a consisté à prendre comme base des trains classiques roulant à 33,3 m/s entre gares, et chargés sur un seul niveau. On peut des lors, par rapport à cette référence, étudier les potentialités et les coûts du système sous différentes hypothèses contrastées d'exploitation.

Les différents calculs discutés ci-après ont été établis - sauf indication contraire - à la 36ème heure de simulation. Une simulation de 36 heures est en effet nécessaire le plus souvent pour que le modèle se stabilise, et que la ligne fonctionne de manière nominale. Cette durée minimale augmente naturellement si on ralentit la vitesse des trains, ou si on change certains paramètres importants (forme des trains, intervalles etc..).

• Les scénarios

Dans le scénario de référence, il s'agit de traiter de manière cohérente (c'est à dire efficace) un flux de poids lourds correspondant à une demande égale à environ 50 du trafic potentiel de l'axe. Nous sommes partis d'un chiffre d'environ 25 milliards de tonnes.km (24,5 dans nos calculs). Ce chiffre, que nous estimons - valeur 2000 - à 50 % du potentiel correspond donc à un trafic de référence de 50 milliards de tonnes.km environ, à comparer au potentiel retenu de 68 pour l'auto-route automatique poids lourds. La différence est due au fait que nous avons retenu un maillage moins dense, et supposé par conséquent qu'un certain nombre de transport ne pourront pas se reporter sur l'axe ferroviaire. Rappelons ici que 50 % de part de marché correspond à l'hypothèse d'une stricte équivalence à l'offre routière. Nous reviendrons sur cette hypothèse plus bas.

Un scénario de référence a été défini. Il permet de tester en fait ce que signifie l'utilisation d'une infrastructure dédiée - et par extension partiellement dédiée - avec un mode d'exploitation traditionnel. Les chiffres annualisés sont fondés sur une année égale à 300 jours simulés.

• Scénario de référence (Trains traditionnels cadencés de 750 mètres de long)

Premier constat, le simulateur met en lumière qu'il est possible de "passer" sur l'axe avec des trains conventionnels et pour une demande donnée (structure journalière et géographique imposée), environ 25 milliards de tonnes.km par an, ce qui représente plus de 6000 unités de chargement traitées par jour. On arrive donc à traiter convenablement la demande adressée, avec des délais d'attente modérés (inférieurs à 1/2 heure). Le transport de bout en bout en desserte omnibus classique permet d'obtenir une desserte de l'axe en 14 heures de délai de bout en bout (y compris accès en gare). Cette performance n'est possible qu'avec un niveau d'équipement en gare calibré sur les pointes de trafic.

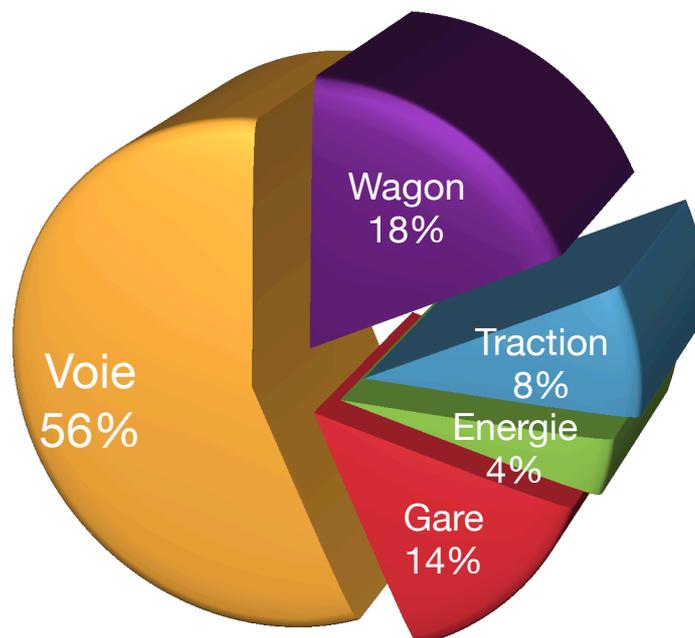
Le coût complet de transport ferroviaire combiné (y compris les manutention) serait de l'ordre de **0,71 €/équivalent semi-remorque au kilomètre** avec charges d'infrastructures, et de **0,70 €/km hors infrastructures**. Le coût avec un péage d'infrastructure de 0,055€/UTI/km ressortirait donc alors à **0,71 €/km** environ.

Un tel système classique combiné avec un dimensionnement des gares de manière à éviter toute attente, conduit à la mise en place d'un service relativement complexe reposant sur une "entre-

prise dédiée" de près de 1400 personnes, et mobilise un système de 193 portiques. Une telle structure requiert sans doute un management et des coûts de structure majorant notre estimation. Mais on peut considérer que l'utilisation d'un voie dédiée sur un axe comme celui que nous étudions est quasiment rentabilisable, puisqu'elle n'est pas éloignée des coûts marginaux routiers.

Il convient cependant de souligner que **pour un volume d'activité sensiblement inférieur** - de l'ordre de 8 milliards de tonnes.km par exemple - le prix de revient atteindrait (en respectant le cahier des charges) **1,6€/km**, le surcoût étant quasi exclusivement lié à l'amortissement de l'infrastructure sur un moindre volume d'activité. En outre, les **délais d'attente** pourraient devenir considérables (**triplement**) dès lors que l'on contraint les trains à partir remplis. On revient donc dans ce cas au cas où le système requiert une programmation des arrivées, ne peut tirer parti d'un système cadencé en continu, et où, naturellement, les gestionnaires chercheront à diminuer les amplitudes de travail, les moyens de manutention et les personnels travaillant en gare, ce qui pèsera en retour sur l'attractivité du transport combiné.

Structure des coûts dans le cadre du scénario de référence



- **Problème particulier des gares**

Dans le simulateur nous avons considéré que les délais de chargement et de déchargement pouvaient être identiques. Cette hypothèse nous semble relativement forte. Il nous semble en effet plus difficile de décharger en continu que de charger en continu.

Le processus de chargement peut en effet, en cas de technique classique, être organisé comme un processus quasi continu. Le routier arrive en gare, après un échange de données numériques (par un procédé non filaire quelconque), il est dirigé vers une voie et une place. Le principe est ici de diriger le véhicule "vers le premier wagon vide prêt à partir". Ce processus permet de limiter le temps global de chargement et assurer une bonne fluidité des opérations.

A l'arrivée dans la gare de destination, les choses sont plus complexes. Ou bien, le véhicule peut être prépositionné à l'endroit du déchargement du wagon le concernant (selon le même processus d'échange de données numériques), et alors, le processus peut être fluide. Dans le cas où le véhi-

cule n'est pas strictement "à l'heure", le système le plus efficace peut être de passer par une zone de stockage annexe, où le véhicule routier viendra prendre possession de son unité de chargement. Un système d'adressage extrêmement précis permettrait alors de désigner, comme pour le chargement des trains, une voie et une place précise. L'incidence de la création de cette zone tampon (ou buffer), devrait être de doubler l'espace, les moyens et les temps de déchargement.

Le coût des gares, qui représente dans le scénario de référence 14 % des coûts globaux, pourrait ainsi être sensiblement majoré.

Nous avons simulé cependant la double incidence de cette modification des processus de déchargement sur les coûts et le temps de transport et délais d'attente, le problème étant de savoir si la manutention dans la gare de destination pouvait sensiblement remettre en cause la faisabilité d'une exploitation "classique".

Le résultat que nous trouvons porte à 0,8 €/km le coût complet de transport d'un équivalent poids lourd, ce qui atteint voire dépasse selon nous "l'objectif de coût" que nous souhaitons nous donner. Pour autant les délais globaux de transport ne changeraient pas dans des proportions significatives.

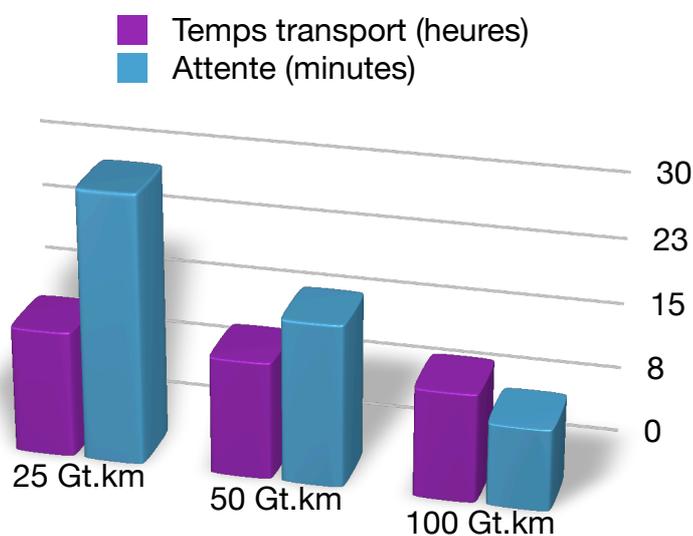
Il semble important ici de souligner que la ressource indispensable à la fluidification de l'interface entre la route et le rail est l'espace de travail et le suréquipement en moyens de manutention dans le cas de manutentions verticales.

La modélisation précise - avec un outil de modélisation "multi-agent" - des gares selon les systèmes retenus nous semble une priorité pour les travaux ultérieurs, l'une des questions étant de vérifier la faisabilité de grandes gares suréquipées gérant de manière dynamique la formation de trains en continu.

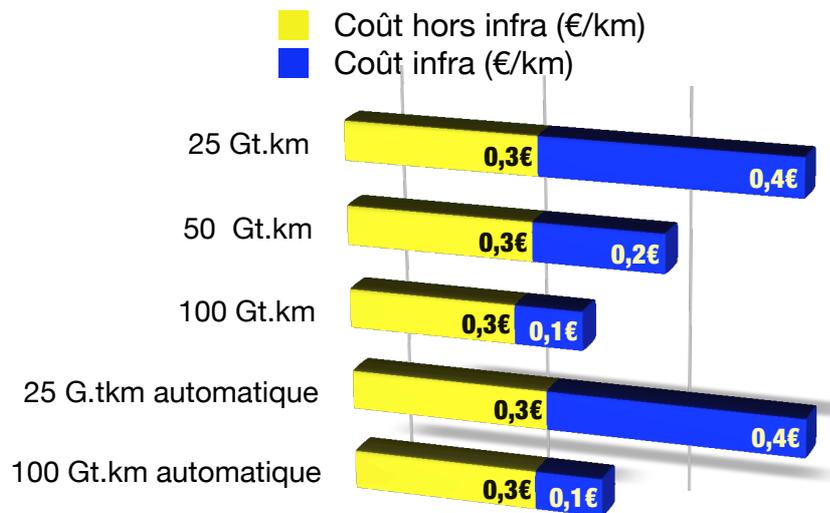
- **Capacité de croissance dans le cas d'un système dédié classique**

Les résultats du scénario de référence sont relativement robustes. Une augmentation significative des trafics est possible ; au surplus, celle-ci conduirait à une amélioration globale des temps de transport, des délais d'attente et des coûts. Le gain sur les temps de transport est d'une heure pour chaque doublement de trafic, et le gains sur les temps d'attente de 9 à 12 minutes à chaque fois.

Temps de transport et d'attente en fonction du volume de transport



Coûts de transport selon les hypothèses



Physiquement, un axe dédié acheminant sensiblement plus de 100 milliards de tonnes.km serait sans doute assez proche de la saturation avec un système d'exploitation classique. Bien entendu ces calculs reposent sur les équations génériques du modèle. Leur robustesse pour des niveaux d'activité très différents peut bien entendu être discutée, mais les résultats semblent assez bien cadrer le débat de la rentabilisation possible d'un axe dédié en fonction de l'environnement concurrentiel actuel ou futur du transport de fret.

Des volumes de trafic très importants posent en outre de réels problèmes de management de gares qui devraient être très grandes et utiliser un nombre excessivement important de voies.

Dans l'état actuel de nos travaux ces simulations conduisent à considérer que le système peut fonctionner de manière efficace comme un système de transport à la demande sans que les temps d'attente et de parcours de bout en bout ne soient prohibitifs.

Ce système semblerait donc durable, sans subvention importante au combiné, dans la mesure où le coût de gare à gare peut paraître "dans le marché", et l'offre permet une accessibilité importante, tant géographique que temporelle.

Rappelons que dans le cadre du scénario de référence, les trains de 750 mètres partent, en respectant des sillons pré-établis espacés de 3 minutes et tous strictement cadencés sur l'axe "pour peu que les trains soient complets" (à X % près, comme indiqué plus haut). Ce dispositif suffit ici à assurer un nombre suffisant de circulations. L'ensemble du système est ainsi cadencé sur des espacements de 3 minutes et de multiples de 3 minutes.

- **L'automatisme**

L'introduction d'un automatisme intégral de conduite des trains à espacement de sécurité, conduit alors à pouvoir faire partir, si le besoin s'en fait sentir, des trains avec une fréquence plus élevée. **Cette solution ne met pas en évidence de modification significative des coûts ni des délais d'attente, sauf dans le cas d'un trafic beaucoup plus important (4 fois plus important), avec un gain de 3 minutes sur les temps d'attente.** Le recours aux automatismes et à une gestion dynamique des sillons permet d'augmenter sensiblement la

capacité globale de l'axe (les chiffres théoriques sont très importants...). Pour autant, le problème est alors celui de la gestion des gares, leur dimension et l'aménagement des accès.

Les scénarios principaux étudiés (1)

Nom	Gtkm annuel	Type de train	Longueur du train(m)	Hauteur	Vitesse (m/s)	Sillons	Portiques	Personnel	Temps de bout en bout en heures	Attente moyenne en heures, minutes	Avec infra €/km	Sans infra €/km
Référence	24,5	Classique	750	simple	33,3	3 minutes	193	1400	14	25 à 30 minutes	0,71	0,31
Référence automatique	24,5	Automatique	750	Simple	33,3	sécurité	193	900	14	25 à 30 minutes	0,71	0,31
RéférenceX2	49	Classique	750	simple	33,3	3 minutes	353	2500	13	18 minutes	0,5	0,3
RéférenceX4	97	Classique	750	simple	33,3	3 minutes	447	3300	12	9 minutes	0,37	0,27
RéférenceX4 auto	97	Automatique	750	simple	33,3	3 minutes	762	4620	12	6 minutes	0,4	0,3

L'introduction de la maintenance

L'introduction de périodes de maintenance - deux heures par jour à des heures de faible demande - ne détériore pas l'équilibre général du système (encore que l'organisation de la maintenance soit complexe pour la synchroniser parfaitement avec les trafics réels). Il n'impacte pas les délais moyens d'attente, les gares demeurant ouvertes 24 heures sur 24. les temps de transport moyens restent comparables.

Ce résultat tient également à la gestion - quasi continue - des sillons, l'incidence de la maintenance devenant forte dès lors que les trains sont espacés (1 train par heure par exemple).

Ce résultat fait ressortir l'intérêt pratique qu'il y a à mettre en place un système le plus continu possible.

- **Les trains longs et les trains sur double hauteur (double stack)**

L'introduction de trains longs ou de trains en double hauteur répond généralement à des soucis de massification et à la recherche d'une économie de sillon. Dans le cas d'une infrastructure dédiée, le recours à des trains de 1500 mètres, ou la disposition de trains "double stack" peut permettre des économies significatives.

L'incidence est importante pour des trains longs double-stack (**0,42€/km** avec infrastructure, **0,22€/km** sans), mais cela provoque un **allongement significatif des délais moyens d'attente** (qui doublent presque) et des **temps de transports (+3 heures** sur la totalité de l'axe).

Il nous semble donc que ces techniques - ce qui est intuitif - sont à réserver à des relations longues, et s'adaptent sans doute mal ou moins bien à des dessertes omnibus cadencées. En outre le gerbage des caisses requiert une gestion très fine des chargements sur les wagons pour éviter des doubles manutentions dans les gares de destination, et une immobilisation plus importante des trains.

Scénarios étudiés (2)

Nom	Gtkm annuel	Type de train	Longueur du train(m)	Hauteur	Vitesse (m/s)	Sillons	Portiques	Personnel	Temps de bout en bout en heures	Attente moyenne en heures, minutes	Avec infra €/km	Sans infra €/km
Train long	24,5	Classique	1500	simple	33,3	3 minutes	67	550	16 à 17	45 minutes	0,64	0,24
Double S	24,5	Classique	750	double	33,3	3 minutes	67	540	16 à 17	50 minutes	0,57	0,16
Long doubleX2	49	Classique	1500	double	33,3	3 minutes	384	2500	17	50 minutes	0,42	0,22

- **L'hypothèse du recours à la manutention horizontale.**

Les systèmes reposant sur une manutention horizontale visent en fait deux objectifs.

- Le premier est de pouvoir charger des semi-remorques ordinaires sans surcoût d'équipement (pas de plaque de prise par pince par exemple).
- Le second est de ne pas avoir de portiques, et donc de simplifier la circulation des trains électriques et leur formation sur des voies destinées au chargement et déchargement des trains.

La contrepartie de la manutention horizontale était de devoir charger et surtout de décharger en séquence les véhicules. Avec des wagons à plateau rotatif, ces handicaps sont éliminés.

Il est possible également de procéder à des transferts horizontaux grâce à des véhicules routiers et des wagons spécifiquement équipés.

Les simulations opérées en prenant en compte des wagons de type Modalohr permettent d'estimer à **0,3 €/km** le surcoût du système par rapport à un système classique. Ce surcoût résulte pour l'essentiel de l'augmentation des coûts de wagons, qui n'est pas compensé par les économies de matériel et de personnel des gares. Pour autant, les délais d'attente, et donc de transport de bout en bout, pourraient sans doute baisser (mais de manière très faible et donc sans réelle incidence).

Un niveau de demande double permettrait de gagner **0,2 €/km** comme c'était le cas pour le scénario de référence.

Le problème posé est donc clairement celui du coût du wagon. Il est clair que sa production en série devrait permettre d'en baisser le prix, mais on peut estimer qu'une baisse pourrait également être obtenue dans le cas du développement de transports combinés massifs en Europe. La question du **rapport de coût** entre les wagons traditionnels et les wagons à plateau tournant est donc ici centrale, et devrait être explorée.

- **Les scénarios novateurs**

Quels peuvent être les scénarios novateurs ?

Deux idées sont développées.

* La première consiste à **limiter au strict minimum le temps d'immobilisation des trains**, c'est à dire le temps nécessaire au chargement. C'est l'idée développée par **R-shift-R** qui consiste à gagner le maximum de temps en faisant le maximum d'opérations avant que le train ne soit en gare. Cette formule peut-être très grossièrement simulée en ne prenant en compte que le temps de manutention de l'unité de chargement, ce temps pouvant être réduit grâce à des automatismes. R-shift-R va plus loin en utilisant des pratiques automatiques sur lesquels les véhicules ou caisses sont chargées à l'avance. Dans ce cas, le temps de chargement est strictement limité. On peut le simuler en prenant en compte un temps très court, ou en concevant un modèle reproduisant la réalité du processus R-shift-R . Il nous semble que cette problématique des gares - même avec des techniques traditionnelles - doit être étudiée en particulier dans l'optique d'une **automatisation des opérations de manutention**. Il est facile de montrer en effet que la programmation et la gestion en temps réel des opérations de chargement et déchargement, même en maintenant une circulation "manuelle" des véhicules routiers dans l'enceinte de la gare, permet d'**améliorer la fluidité des opérations**. Il semble que ce volet est sans doute aussi important que le volet relatif aux trains eux-mêmes. L'examen de l'incidence de la variation des temps de manutention sur la performance globale du système à partir du scénario de référence montre que - si l'on reste dans des proportions acceptables (comme le doublement du temps de manutention) - celle-ci est négligeable même sur les délais d'attente. A partir du moment où nous avons une fréquence forte des trains, l'intérêt d'un gain important sur les temps de manutention est secondaire. Il semble en revanche indispensable de limiter l'importance des temps d'accès aux voies (ou à l'aire de prise en charge de l'unité de chargement). L'analyse des chantiers de transport combiné actuels montre en effet que le ratio existant entre le temps passé dans le chantier et la durée du chargement est fort. Il nous semble que cela est inhérent à une situation où les fréquences (donc les trafics) sont faibles, et donc les équipements limités en raison même de leur faible utilisation. **Le problème classique de synchronisation entre des flux discrets et continus aboutit donc nécessairement, dès lors que les équipements sont peu importants à la fois à des coûts élevés et des performances faibles (délais, productivité).**

* La seconde consiste à **utiliser des wagons automoteurs au lieu de trains**, de manière à strictement adapter les départs au rythme des arrivées. Ce processus ne neutraliser pas complètement le temps de chargement, mais permet idéalement de faire partir des wagons en continu. Cette idée est celle de projets divers. Elle implique un système entièrement automatique de circulation des wagons. L'intérêt est de pouvoir relativement bien synchroniser les flux de véhicules ferroviaires et routiers.. tout en devant supporter des temps de chargement et de déchargement. A vitesse nominale identique, un tel système achemine la même demande (24,5 milliards de tonnes.km dans le cas du scénario de référence) avec un gain significatif en temps (**10 heures 3/4 au lieu de 14 heures**) et en délai (l'attente serait limitée à 2 minutes). S'agissant des coûts, il apparaît que le coût kilométrique dépasserait **1€/km (0,66 hors infrastructures)**. Ces ordres de grandeur découlent directement de l'estimation du coût d'un wagon automoteur et de sa motorisation, et dans une moindre mesure du coût de l'automatisme. C'est l'un des points qu'il conviendrait d'**affiner avec les constructeurs et dans le cadre de recherches techniques** plus approfondies. Il reste que si ces prix étaient plus modérés, l'intérêt du système serait patent. En effet, il est possible de changer quelque peu les bases de l'économie ferroviaire :

- Un système d'automoteur permet de "tendre" vers une exploitation continue, fluide, et donc de mieux synchroniser les flux ferroviaires et routiers.
- La manutention est favorisée. En étendant les linéaires de voies de chargement et de déchargement, il est possible de simplifier l'organisation de chantiers à haut niveau de trafic, du fait de l'indépendance de chaque wagon.
- Un système de gestion en temps réel permet de mieux adresser - de manière plus fine - les wagons au déchargement.

Conclusions et recommandations

Le travail d'étude de faisabilité d'AxeFret" portait sur le fonctionnement même de l'infrastructure dédiée, et visait à donner des éléments d'appréciation relatifs à l'économie même d'un axe ferroviaire dédié au fret.

Diverses hypothèses ont été testées, parmi lesquelles une exploitation cadencée à haute fréquence en technique classique, mais également des trains longs ou en double-stack, de même que le recours à des wagons automoteurs automatiques.

1. Il nous semble d'abord important de souligner que si dans le cadre de notre scénario de référence, la rentabilité d'un axe dédié au fret est crédible, celle-ci est très dépendante du niveau de trafic. En effet, avec un volume d'activité de 25 milliards de tonnes.km, le système est à la fois attractif (délais de transport et délais d'attente convenables), et permet d'obtenir une bonne couverture territoriale (thématique de l'accessibilité).
2. A contrario, pour des niveaux d'activité plus faibles, le système devient moins compétitif, tant en coût qu'en délais. Cette concomitance des phénomènes est importante. En dessous d'un certain niveau de trafic - grossièrement celui du scénario de référence - le péage pratiqué ne peut en aucun cas permettre d'amortir l'infrastructure, ou si l'on préfère, le coût de l'infrastructure ne peut être répercuté sur le client. Le tableau ci-après met en lumière ces caractéristiques.

Sensibilité des performances par rapport au niveau d'activité (On teste ici le modèle pour des niveaux différents de trafic)

	Milliards de t.km	Temps de transport de bout en bout	Délai moyen d'attente	Coût complet €/km	Coût hors infrastructures €/km
Cas 1	2,5	35 h	3 h 30	4,46	0,37
Cas 2	5,0	24 h	1 h 50	2,26	0,33
Cas 3	13,0	17 h	0 h 50	1,10	0,32
Référence	24,5	14 h	0 h 30	0,71	0,31

3. On peut tirer de ces considérations que - sous contrainte d'équilibre budgétaire - un partage de la voie implique sans aucun doute des subventions croisées avec les autres types de trafic, mais ne règle aucunement la question de l'adaptation aux flux réels de l'économie, caractérisés actuellement par un relatif étalement des flux. Il implique alors de revenir à un système de programmation très rigoureux.
4. Le recours à des formules de transport plus massif (trains longs par exemple) permet sans doute d'améliorer la compétitivité "prix", mais peut détériorer celle des délais de transport et d'attente.
5. A l'inverse, un système de wagons automoteurs automatiques est très efficace sur le terrain de la qualité de service, mais nous semble actuellement trop cher, dans l'attente d'une vérification plus précise des coûts possibles de fabrication de tels wagons.
6. L'un des problèmes essentiels réside dans la gestion des gares. Cependant si l'on dimensionne convenablement les voies et les équipements de manutention, le recours à une gestion dynamique des chargements-déchargements, peut, dans un contexte de grande fluidité des départs-arrivées (hautes fréquences), permettre de faire face dans de bonnes conditions. Il

reste que cela est largement théorique et mérite une modélisation "multi-agents" discrète. Outre les problèmes de gestion optimale des circulations et des manutentions, le problème de la forme et de la nature des voies, celle de l'alimentation électrique des wagons ou des trains doit être prise en compte de manière approfondie.

7. Il semble que la perspective de gares automatisées doive être précisément étudiée. Leur conception et leur mode de fonctionnement doit faire l'objet d'une analyse approfondie.
8. De ce point de vue, le recours à des formes nouvelles de trains - y compris des modes nouveaux de chargement-déchargement - doit être considéré en lien avec l'organisation des gares. La dissociation des opérations (préparation du "wagon", constitution du train (R-Shift-R) nous semble pertinente dès lors que l'on ne sait pas gérer un ensemble complexe et important de véhicules dans un chantier classique. Cet aspect doit faire l'objet d'études techniques approfondies comparatives.
9. Notre raisonnement économique repose sur des équations de coût découlant d'une étude de la littérature (première partie) portant sur le sujet. Certaines évaluations sont bien entendu discutables et peuvent être modulées dans le modèle. Il semble important de se souvenir pour autant, que - dans le cadre du scénario de référence - le premier poste de dépense demeure l'infrastructure, devant les dépenses de wagons et de gares. Cette situation est encore plus déséquilibrée lorsqu'il y a un niveau d'activité plus faible. Il nous semble donc logique de rechercher non pas des moyens d'économiser des sillons par la massification - ce qui ne permet pas d'espérer une part de marché importante mais réduit quelque peu les coûts - mais d'utiliser de manière intensive les voies, et donc de produire des transports cadencés à haute fréquence. Ce constat nous semble déboucher naturellement sur deux thématiques :
 - 9.1. Quel est le meilleur système de transport ferroviaire cadencé à haute fréquence ? Où peut-on attendre le plus de baisse de coûts unitaires ? Quel sera le coût réel d'automoteurs produits en série ?
 - 9.2. Quel est le meilleur système de manutention à haute fréquence dans les gares selon qu'on utilise des trains ou des automoteurs ? Comment concevoir les automatismes ? Sur quels principes ?
10. Au delà, il convient de s'interroger sur l'évolution de l'énergie de traction et son adéquation avec les formes prises par le transport ferroviaire (nature des trains, automoteurs, etc..)

Nous déduisons de cette analyse trois recommandations principales :

- * Il est nécessaire d'approfondir techniquement la question du fonctionnement de chantiers de transport combiné à haute fréquence.
- * Il est possible de rentabiliser un axe dédié - sous réserve d'une solution crédible pour le fonctionnement des chantiers à haute fréquence -, comportant un nombre suffisants de gares. Cette rentabilisation est crédible à partir d'un volume d'activité supérieur à 20 milliards de tonnes.km par an.
- * Il est souhaitable de mener une étude technique globale de fonctionnement et d'optimisation d'axes dédiés à haute fréquence, et haute vitesse, tout en ouvrant la réflexion sur les caractéristiques techniques d'un tel axe.

Annexe : les modèles, ses interfaces, ses équations.

☐ Interfaces

Le modèle AxeFret, développé sous Stella® dispose d'une interface graphique. Celle-ci permet non seulement de disposer de graphes de résultats, mais aussi de modifier des paramètres ou des variables importantes du modèle¹⁴.

Deux "pages" principales sont accessibles.

La première intitulée "tableau de bord" permet de définir les valeurs retenues pour un ensemble de paramètres et variables essentielles, concernant tant l'exploitation des trains, leurs paramètres, que les coûts unitaires.

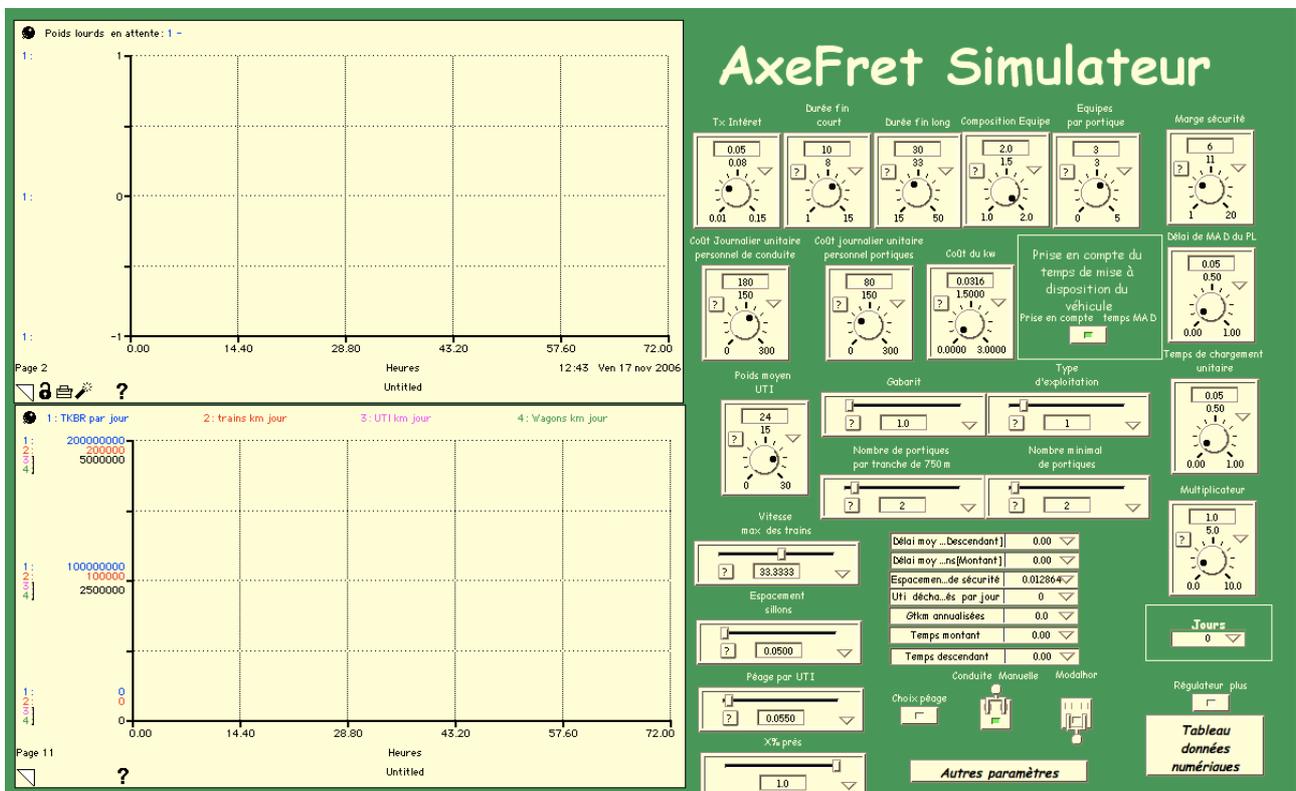
La seconde intitulée "paramètres" permet d'avoir accès à des options secondaires et à modifier certaines valeurs de calage (trafic, fluctuations horaires, prise en compte de la maintenance).

Ces différentes pages comprennent des boutons et curseurs de forme différente, ainsi que des boutons adressables permettant d'aller vers d'autres pages.

Un bouton spécifique permet d'aller sur une page où sont reproduites des données numériques sous forme de tableaux.

Il est possible d'exporter tout ou partie des résultats sous Excel, avec un niveau de détail allant jusqu'au "dt" de calcul.

Tableau de bord



¹⁴ Il est important de limiter ces possibilités de manière à ce que le modèle soit "pilotable" de manière simple (trop de variables rend difficilement "lisible", le tableau de bord).

Paramètres

Fluctuations horair...



Prix de base routier

Périodes de mainte...



?

Prix de base routier

0.8

Prise en compte prix

Tableau de bord

Mise en ouvre de l'option de maintenance

Blanc maintenance

Coefficient Déchargement

1

Version équilibrée

Entrées journalières par gare et par sens		
Demande Journalière[Nord,Montant]		0
Demande Journalière[Nord,Descendant]		1745
Demande Journalière[Picardie,Montant]		718
Demande Journalière[Picardie,Descendant]		373
Demande Journalière[Ouest Idf,Montant]		731
Demande Journalière[Ouest Idf,Descendant]		503
Demande Journalière[Sud Idf,Montant]		356
Demande Journalière[Sud Idf,Descendant]		309
Demande Journalière[Poitou,Montant]		106
Demande Journalière[Poitou,Descendant]		115
Demande Journalière[Bordeaux,Montant]		287
Demande Journalière[Bordeaux,Descendant]		575
Demande Journalière[Sud,Montant]		1745
Demande Journalière[Sud,Descendant]		0

Sorties journalières par gare et par sens		
Sorties journalières[Nord,Montant]		1745
Sorties journalières[Nord,Descendant]		0
Sorties journalières[Picardie,Montant]		718
Sorties journalières[Picardie,Descendant]		373
Sorties journalières[Ouest Idf,Montant]		751
Sorties journalières[Ouest Idf,Descendant]		503
Sorties journalières[Sud Idf,Montant]		356
Sorties journalières[Sud Idf,Descendant]		309
Sorties journalières[Poitou,Montant]		106
Sorties journalières[Poitou,Descendant]		115
Sorties journalières[Bordeaux,Montant]		287
Sorties journalières[Bordeaux,Descendant]		575
Sorties journalières[Sud,Montant]		0
Sorties journalières[Sud,Descendant]		1745

Les équations

Modalhor

Modalhor = 0

DOCUMENT: Si le bouton est enclenché, la technique modalhor se substitue à la technique verticale

Calcul des voies et portiques

$\text{Débit_gare_deux_sens[Gares]} = \text{Portiques_nécessaires[Gares]} / \text{Temps_de_chargement_unitaire}$

DOCUMENT: Le débit de la gare est égal au nombre de portiques divisé par le temps de chargement.

Ainsi 4 portiques pour un temps de chargement de 0,05 font un débit de 80.

Marge_sécurité = 6

DOCUMENT: Coefficient permettant de prendre en compte la variabilité du trafic pendant la journée.

Ici on estime que le trafic être égal à N fois le volume journalier ramené à l'heure (1/24ème)

Cette variable est importante pour la détermination de la capacité de manutention retenue.

Multiplicateur = 1

DOCUMENT: Coefficient permettant de mesurer la robustesse des résultats en fonction des niveaux de trafic

$\text{Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[Gares]} = \text{Int}(\text{Portiques_nécessaires[Gares]} / \text{Portiques_par_voie}) + 1$

DOCUMENT: On calcule ici le nombre de voies nécessaires. Le principe retenu est de considéré qu'une voie peut accueillir au maximum un certain nombre de portiques (nombre de portiques par voie). On prend donc la partie entière du ratio entre le nombre de portiques et le nombre de portique par voie, et on ajoute une voie.

$\text{Nombre_de_manutention_à_produire_par_heure[Gares,Sens]} = \text{Multiplicateur} * \text{Marge_sécurité} * (\text{Demande_Journalière[Gares,Sens]} + \text{Sorties_journalières[Gares,Sens]}) / 24$

DOCUMENT: On estime ici le nombre de manutention à produire par jour et par gare pour un sens de trafic.

On applique au trafic moyen journalier - chargé et déchargé - ramené à l'heure un coefficient permettant de prendre en compte la variabilité du trafic horaire.

Portiques_nb_total = ARRAYSUM(Portiques__nécessaires[*])

DOCUMENT: Nombre total de portiques nécessaire

Portiques__nécessaires[Gares] = Int(ARRAYSUM(Limite_capacité_horaire[Gares,*])
Temps_de_chargement__unitaire)(1+(Coefficient__Déchargement-1)/2)+1

DOCUMENT: Le calcul du nombre de portiques est établi en prenant le volume d'activité considéré comme la limite de capacité horaire multiplié par le temps de chargement unitaire. Ainsi si on a une capacité maximale de 50 et un temps de chargement de 0,05, on a donc $50 * 0,05 = 2,5$ portiques. On prend la partie entière de ce résultat (2) et on ajoute 1. On retiendra donc 3 portiques dans ce cas.

Temps_de_chargement__unitaire = 0.05

Calculs coûts par km et par UTI

Choix_péage = 0

Coût_km_par_UTI__hors_voie = IF time > 6 then Coût_par_UTI_km-((1-Choix_péage)*Coût_voie/
UTI_km_jour) -Péage_retenu else 0

Coût_par_UTI_km = IF time > 6 then ((Coût_énergie+Coût_matériel_traction_par_jour
+Coût_voie*(1-Choix_péage)+Coût_Wagon_par_jour+Coût_journalier__personnel_conduite
+Coût_journalier_personnel_de_portique+Coût_plate__forme_par_jour)/UTI_km_jour)
+Péage_retenu else 0

Pct_Energie = If time > 24 then pct((Coût_énergie/UTI_km_jour)/Coût_par_UTI_km) else 1

DOCUMENT: Part de l'énergie dans les coûts

Pct_Plate_forme = If Time > 24 then PCT(((Coût_journalier_personnel_de_portique
+Coût_plate__forme_par_jour)/UTI_km_jour)/Coût_par_UTI_km) Else 1

DOCUMENT: Pourcentage des coûts de plate forme

Pct_Traction = if time > 24 then PCT(((Coût_matériel_traction_par_jour
+Coût_journalier__personnel_conduite)/UTI_km_jour)/Coût_par_UTI_km) else 1

DOCUMENT: Pourcentage coûts de traction

Pct_Voie = IF Time > 24 then PCT(((1-Choix_péage)*(Coût_voie/UTI_km_jour)+Péage_retenu)/
Coût_par_UTI_km) Else 1

DOCUMENT: Pourcentage des coûts de voie

Pct_Wagon = IF Time >24 then pct((Coût_Wagon_par_jour/UTI_km_jour)/Coût_par_UTI_km)
Else 1

DOCUMENT: pourcentage coûts de wagon

Péage_par_UTI = 0.055

DOCUMENT: Péage kilométrique de référence par UTI

Péage_retenu = Péage_par_UTI*Choix_péage*Fluctuations__horaires

Calculs techniques

Camions_déchargés__à_destination(t) = Camions_déchargés__à_destination(t - dt) + (In_livrés) * dt

INIT Camions_déchargés__à_destination = 0

INFLOWS:

In_livrés = Livrés

Camions_partis__en_train(t) = Camions_partis__en_train(t - dt) + (In_partis) * dt

INIT Camions_partis__en_train = 0

INFLOWS:

In_partis = Départs

CJP(t) = CJP(t - dt) + (In_4 - Out_3) * dt

INIT CJP = Coût_J_parking

DOCUMENT: Calcul du coût maximal sur la période.

INFLOWS:

In_4 = Max(CJP,Coût_J_parking)

OUTFLOWS:

Out_3 = Min(Remise_à_zéro,delay(In_4,1))+Vidage

Déchargés_par_jour[Gares,Sens](t) = Déchargés_par_jour[Gares,Sens](t - dt) + (Déchargés [Gares,Sens] - Out_4[Gares,Sens]) * dt

INIT Déchargés_par_jour[Gares,Sens] = 0

DOCUMENT: Nombre d'UTI déchargées par gare et par sens

INFLOWS:

Déchargés[Gares,Sens] = Déchargement[Gares,Sens]

OUTFLOWS:

Out_4[Gares,Sens] = delay(Déchargés[Gares,Sens],24)

Poids_engin__traction(t) = Poids_engin__traction(t - dt) + (PD_loc) * dt

INIT Poids_engin__traction = Poids_initial

INFLOWS:

PD_loc = DERIVN(Poids__Locomotive,1)

Somme__demande(t) = Somme__demande(t - dt) + (In_Somme_demande) * dt

INIT Somme__demande = 0

INFLOWS:

In_Somme_demande = En_gare

Uti_partis_par_jour(t) = Uti_partis_par_jour(t - dt) + (UTI_in - Uti_Out) * dt

INIT Uti_partis_par_jour = Uti_partis_par_heure*24

INFLOWS:

UTI_in = Uti_partis_par_heure

OUTFLOWS:

Uti_Out = delay(UTI_in,24)

Attentes_en_gare = ARRAYSUM(Attente_en__gare[*,*])

DOCUMENT: Nombre d'UTI stationnant en gare par unité de temps

Attente_nettes[Gares,Sens] = Attente_en__Gare[Gares,Sens]-vers_chargement[Gares,Sens]

Blanc__maintenance = 0

DOCUMENT: Bouton mettant en oeuvre le principe de sillons neutralisés pour la maintenance

délai_du_top_départ[Gares,Sens] = Délai_attente[Gares,Sens]-Délai__accès_voies[Gares,Sens]

Délai_moy_par_sens[Sens] = ARRAYMEAN(Délai_attente[*,Sens])

Départs = ARRAYSUM(Départ_UTI[*,*])

En_cours_de_transport = ARRAYSUM(Parcours[*,*])

En_gare = ARRAYSUM(Arrivée_Camions[*,*])

DOCUMENT: Somme des véhicules arrivés en gare pour le départ

Equivalent_trains_par_jour = Arraysum(Déchargés_par_jour[*,*])/
(Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon)

Gtkm_annualisées = (tkm_par_jour*300)/1000000000

DOCUMENT: L'annualisation repose ici simplement sur la multiplication du chiffre journalier par 300. cela est cohérent avec la prise en compte du trafic journalier égal au trafic annuel divisé par 300

On exprime de nombre en milliards de t.km

Heures = counter(0,24)

DOCUMENT: Heures de la journée

Infl_prix = IF time>24 then If Prise_en_compte_prix=1 then Infl_du_rapport_des_prix else 1 else 1

DOCUMENT: Influence du niveau des prix sur la demande

Jours = TIME/24

Livrés = ARRAYSUM(Déchargés[*,*])

DOCUMENT: Somme des véhicules déchargés à destination

Nombre_de_portiques_par_tranche_de_750_m = 2

DOCUMENT: Nombre de portiques par tranche de 750 mètres de voie.

Nombre_minimal__de_portiques = 2

DOCUMENT: Nombre minimal de portique par voie

Nombre_variable__de_portiques = ABS(Type_d'exploitation-1)
*Nombre_de_portiques_par_tranche_de_750_m

Poids_initial = IF Type_d'exploitation>1 then 90 else 10

Poids_lourds__en_attente = ARRAYSUM(Parking__Gare[*,*])

DOCUMENT: Nombre de camions en attente chaque heure

Portiques_par_voie = Nombre_minimal__de_portiques+Nombre_variable__de_portiques

DOCUMENT: Nombre de portique effectif par voie selon la longueur des trains. Avec un minimum par voie

Prise_en_compte_prix = 0

DOCUMENT: Prise en compte de l'influence des prix sur la demande

Prix_de_base__routier = .8

DOCUMENT: Prix de base routier pris comme référence. Il s'agit en fait du prix minoré d'une certaine proportion qui reflète l'incidence de l'allongement de distance.

Rapport_coût_sur_prix_routier = Smth3((Coût_par_UTI_km/Prix_de_base__routier),24)

DOCUMENT: Rapport (lissé sur 24 heures) du coût du combiné au prix routier.

Remise_à_zéro = If heure = 0 then CJP else 1000000000000000000

DOCUMENT: Calcul technique de remise à zéro des coûts toutes les 24 heures

Tare_moyenne_par_UTI = 5

DOCUMENT: On retire ici la tare de la caisse. Il n'est pas utile de retirer celle éventuelle du chassis qui est comptée par ailleurs dans le poids brut du train.

tkm_par_jour = (Poids_moyen__UTI-Tare_moyenne_par_UTI)*UTI_km_jour

DOCUMENT: Tonnage kilométrique de marchandises transportées par jour

Uti_attendant_chargées[Gares,Sens] = Linéaire__chargé[Gares,Sens]/
(UTI_par__wagon*Longueur__Wagons)

Uti_partis_par_heure = ARRAYsum(Départ_UTI[*,*])

DOCUMENT: Nombre total de départs d'UTI (ce nombre comptabilise les UTI lors de chaque passage en, gare. Les Uti sont donc comptées plusieurs fois si elles poursuivent leur parcours le long de l'axe.

Uti__déchargés__par_jour = ARRAYSUM(Déchargés_par_jour[*,*])

DOCUMENT: Nombre total journalier d'unité intermodales (ou de semi) déchargés.

Cet indicateur donne une idée assez précise du volume d'activité généré en UTI par journée d'activité.

UTI__par_train = Nombre__Wagons_par_train*UTI__par__wagon

Vidage = IF Heure = 0 then CJP else 0

Influence__délai[Gares,Sens] = GRAPH(Délai_attente[Gares,Sens])

(0.00, 1.00), (0.3, 1.00), (0.6, 1.00), (0.9, 1.00), (1.20, 0.995), (1.50, 0.985), (1.80, 0.94), (2.10, 0.81), (2.40, 0.635), (2.70, 0.39), (3.00, 0.00)

DOCUMENT: En fonction du délai d'attente les camions sont de moins en moins nombreux à venir sur le chantier.

Infl__du_rapport_des_prix = GRAPH(Rapport_coût_sur_prix_routier)

(1.00, 1.00), (1.02, 0.86), (1.04, 0.685), (1.06, 0.505), (1.08, 0.365), (1.10, 0.27), (1.12, 0.195), (1.14, 0.13), (1.16, 0.085), (1.18, 0.04), (1.20, 0.00)

Périodes__de_maintenance = GRAPH(Heures*Blanc__maintenance)

(0.00, 1.00), (1.00, 1.00), (2.00, 1.00), (3.00, 1.00), (4.00, 1.00), (5.00, 1.00), (6.00, 1.00), (7.00, 1.00), (8.00, 1.00), (9.00, 1.00), (10.0, 1.00), (11.0, 1.00), (12.0, 1.00), (13.0, 1.00), (14.0, 1.00), (15.0, 1.00), (16.0, 1.00), (17.0, 1.00), (18.0, 1.00), (19.0, 1.00), (20.0, 1.00), (21.0, 1.00), (22.0, 1.00), (23.0, 0.00), (24.0, 0.00)

DOCUMENT: Période de maintenance.

L'utilisateur peut choisir les périodes de maintenance.

Ces périodes sont signalées par un 0. Un 1 indique que le fonctionnement est "normal".

Capacité horaire par sens en EPL

Capacité_ligne__par_sens = (Nombre__Wagons_par_train*UTI__par__wagon)/
Espace__retenu__entre_trains

DOCUMENT: Nombre maximal d'UTI - en fait ici d'équivalents poids lourds (EPL) - pouvant circuler sur la ligne par sens de circulation en une heure.

En d'autres termes, si on peut avoir un train toutes les minutes, c'est à dire 60 trains à l'heure, et que ces trains peuvent emporter 50 wagons double stack cela ferait 60*100 = 6000 UTI par heure.

Limite__capacité__horaire[Gares,Sens] = Min((Nombre_de__manutention__à__produire__par__heure
[Gares,Sens]),Capacité_ligne__par_sens)

DOCUMENT: Peut s'analyser comme un maximum ou un minimum. Théoriquement on devrait s'aligner sur le plus petit. Mais cela crée des files d'attente éventuelles.

Coûts de manutention

Composition_Equipe = 2

DOCUMENT: Nombre de personnes par engin de manutention

Coût_journalier_personnel_de_portique =
Coût_journalier_unitaire_personnel_portiques*Personnel_portiques

Coût_journalier_unitaire_personnel_portiques = 75

DOCUMENT: Coût de base en € de la journée d'un machiniste de portique

Coût_journalier__parking = SMth1(max(CJP,Coût_J_parking),24)*1.4

DOCUMENT: On calcule ici le coût du parking en prenant en compte le nombre maximal observé de poids lourds.

Le coût des parkings est ici majoré de 40 % pour prendre en compte la marge de sécurité nécessaire.

Coût_J_parking = Coefficient__Coût_financement_long*(ARRAYSUM(Parking__Gare[*,*])/50)*
(2000000*1.05)/3650

DOCUMENT: On calcule ici un coût qui tient compte de la dimension des parkings nécessaires pour stationner les Poids lourds attendant le chargement.

Ce coût comprend une maintenance égale à 5% de l'investissement initial.

Coût_plate__forme_par_jour = IF Modalhor = 0 then (IF Longueur_des_trains>20 THEN
((((Portiques_par_voie*2000000*ARRAYSUM(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement
[*])))/3650) + (((Longueur_des_trains/750)*ARRAYSUM
(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])*5000000)/10950))*1.05)
*Coefficient__Coût_financement_long)+Coût_journalier__parking ELSE
((((Portiques_par_voie*2000000*ARRAYSUM(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement
[*])))/3650) + ((ARRAYSUM(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])*5000000)/
10950))*1.05)*Coefficient__Coût_financement_long)+Coût_journalier__parking) Else (IF
Longueur_des_trains>20 THEN (((Longueur_des_trains/750)*ARRAYSUM
(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])*5000000)/10950)
*1.05*Coefficient__Coût_financement_long)+Coût_journalier__parking ELSE (((((ARRAYSUM
(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])*5000000)/10950))*1.05)
*Coefficient__Coût_financement_long)+Coût_journalier__parking))

DOCUMENT: Coût des portiques et des cours ramené à la journée

On a pris un taux de maintenance de 5 % l'an

Le coût du financement est pris en compte

Le coût des parkings est ici majoré de 40 % pour prendre en compte la marge de sécurité nécessaire.

Equipes__par_portique = 3

DOCUMENT: Nombre d'équipes par jour et par engin de manutention en moyenne

K = 1

Longueur__de_voies[Gares,Sens] = IF Longueur_des_trains>700 THEN
 Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[Gares]*Longueur_des_trains*K ELSE
 Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[Gares]*Longueur_des_trains*K*2

DOCUMENT: Longueur des voies utilisées pour le chargement des trains. Le coefficient K permet de disposer de plus d'espace que ce qui semble nécessaire.

Personnel_portiques = IF Modalhor = 0 Then
 Composition_Equipe*Equipes__par_portique*Portiques_par_voie*ARRAYSUM
 (Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*]) else if Type_d'exploitation>0 then
 Composition_Equipe*ARRAYSUM(Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])*
 (Type_d'exploitation) Else Composition_Equipe*ARRAYSUM
 (Nombre_de_voies_par_gare_pour_le_chargement[*])

Coûts de personnel de conduite

Coef_réserve = 1.1

DOCUMENT: Coefficient prenant en compte la disponibilité d'une réserve.

Conduite__Manuelle = 1

DOCUMENT: Bouton actionnant un système de conduite automatique sur l'ensemble de la ligne.

Ce bouton supprime tout personnel de conduite.

A la place un surcoût intervient sur les locomotives

La conduite automatique correspond à la valeur 0

La valeur par défaut 1 actionne une conduite traditionnelle manuelle à 1 conducteur par locomotive

Coût_Journalier_unitaire_personnel_de_conduite = 180

DOCUMENT: Coût de base en € d'une heure de travail d'un conducteur de train

Coût_journalier__personnel_conduite =
Personnel_de_conduite__nécessaire_par_jour*Coût_Journalier_unitaire_personnel_de_conduite

DOCUMENT: Coût journalier du personnel de conduite

Nombre_conducteurs__par_jour = Int((IF Type_d'exploitation>0 then Heures_de_conduite/
(Temps__conduite_max__par_jour+Temps_annexes__par_jour) else 0)*Conduite__Manuelle)

DOCUMENT: Nombre de conducteurs nécessaires

Personnel_de_conduite__nécessaire_par_jour = Nombre_conducteurs__par_jour*Coef_réserve

DOCUMENT: Nombre de conducteurs nécessaire.

Ce chiffre peut être majoré d'une réserve

Temps_annexes__par_jour = 1

Temps__conduite_max__par_jour = 7

Coûts voie et trains

Amortissement__voie_par_km_et_par_jour = 270*((Poids__essieu/25)^.5)*
((Vitesse__max__des_trains/33.33)^2)*Type_de_voie*Coefficient__Coût_financement_long

DOCUMENT: Dépend tu type de voie qui détermine le coût de base. Ensuite on ajoute l'incidence du poids à l'essieu, la vitesse des trains. La base est prise égale à 3 millions € le km, ce qui revient à environ 270 € par km et par an (chiffre non actualisé et sans coût de financement). Ce nombre est alors multiplié par le coefficient reflétant le coût de financement

Coefficient__Coût_financement_court = -PMT(Tx_Intéret,Durée_fin__court,Durée_fin__court,0)

DOCUMENT: Coefficient multiplicateur pour prendre en compte le coût de financement

Ici on prend un financement "court" par défaut de 10 ans

Coefficient__Coût_financement_long = -PMT(Tx_Intéret,Durée_fin_long,Durée_fin_long,0)

DOCUMENT: Coefficient multiplicateur pour prendre en compte le coût de financement

Ici on prend par défaut un financement "long" de 30 ans

$$\text{Coût_du_kw} = 0.02875 * 1.10$$

DOCUMENT: Coût du kwh en € observé en 2004 majoré de 10 %

$$\text{Coût_énergie} = \text{Coût_du_kw} * \text{kw_consommés}$$

$$\text{Coût_matériel_traction_par_jour} = \text{Coût_unitaire_matériel_traction_par_km} * \text{trains_km_jour}$$

DOCUMENT: Coût du matériel de traction par jour

$$\text{Coût_unitaire_wagon_par_km} = \text{IF Modalhor} = 0 \text{ then } ((0.05 + 0.05 * (\text{Vitesse_max_des_trains} / (120000 / 3600))^2) * \text{Coefficient_Coût_financement_court}) \text{ else } 4 * ((0.05 + 0.05 * (\text{Vitesse_max_des_trains} / (120000 / 3600))^2) * \text{Coefficient_Coût_financement_court})$$

DOCUMENT: Le coût unitaire des wagons dépend de la vitesse des trains.

On multiplie ce coût par un coefficient pour prendre en compte le coût de financement. On considère que le coût d'un wagon modalhor est de 4 fois celui d'un wagon normal

$$\text{Coût_unitaire_matériel_traction_par_km} = (((0.001 * \text{Puissance_de_traction_par_train} / 3) + 1) / 10) + 0.2 * ((0.001 * \text{Puissance_de_traction_par_train} / 3) + 1) * \text{Coefficient_Coût_financement_court} * \text{Majo_ERTMS3}$$

DOCUMENT: Coût du matériel de traction.

Il dépend de la puissance de traction du train. On prend en compte le coût de financement par un coefficient

$$\text{Coût_voie} = (\text{Amortissement_voie_par_km_et_par_jour} + \text{Maintenance_Voie_par_km_et_par_jour}) * \text{Longueur_des_lignes}$$

DOCUMENT: Coût journalier des voies.

$$\text{Coût_Wagon_par_jour} = \text{Coût_unitaire_wagon_par_km} * \text{Wagons_km_jour}$$

DOCUMENT: Calcul du coût des wagons en fonction du coût unitaire au km et du nombre de wagons.km

$$\text{Durée_fin_long} = 30$$

DOCUMENT: Durée en année du financement retenu pour les infrastructures

Ici on prend par défaut un financement "long" de 30 ans

$$\text{Durée_fin_court} = 10$$

DOCUMENT: Durée en année du financement retenu pour le matériel

Ici on prend un financement "court" par défaut de 10 ans

$$kw_consommés = 20*(TKBR_par_jour-Poids_Locomotive*trains_km_jour)/1000$$

DOCUMENT: On prend comme base de consommation 20 Wh par TKBC, ce qui revient à diminuer les TKBR compte tenu du poids des locomotives

$$\text{Maintenance_Voie_par_km_et_par_jour} = \text{Type_de_voie} * ((\text{Poids_essieu}/25)^{.5}) * ((\text{Vitesse_max_des_trains}/33.33)^{.5}) * \text{Coût_maintenance_annuel_au_km}/365$$

DOCUMENT: Maintenance de la voie. Dépend tu type de voie qui détermine le coût de base. Ensuite on ajoute l'incidence du poids à l'essieu, la vitesse des trains

$$\text{Majo_ERTMS3} = \text{IF Conduite_Manuelle} = 0 \text{ then } 1.05 \text{ else } 1$$

DOCUMENT: Coefficient de majoration du coût des locomotives du à l'équipement ERTMS (selon le mémo de Bruxelles sur le sujet en date du 4 juillet 2005)

$$\text{Poids_essieu} = 25 + (\text{Gabarit} - 1) * 3$$

DOCUMENT: Poids à l'essieu admis sur l'axe. On considère que si on passe en double stack, ce poids est majoré de 0 à 7 tonnes (ici on prendra 3 tonnes) par rapport à la base de 25 retenue dans ce modèle.

$$\text{Tx_Intéret} = .045$$

$$\text{Type_de_voie} = 1$$

DOCUMENT: Type de voie : permet de faire varier le coût kilométrique de construction

Au total, on prend ici globalement en compte les spécificités.

Par exemple les protections, les voies enterrées, le type de signalisation, etc..

La base est prise égale à 3 millions € le km, ce qui revient à environ 270 € par km et par an (chiffre non actualisé et sans coût de financement)

$$\text{Coût_maintenance_annuel_au_km} = \text{GRAPH}(\text{TKBR_par_jour})$$

(10000, 7000), (36364, 17230), (62727, 21880), (89091, 26065), (115455, 30000), (141818, 33970), (168182, 39550), (194545, 43735), (220909, 47455), (247273, 52105), (273636, 55825), (300000, 60000)

DOCUMENT: Coût de maintenance en fonction du trafic

Formation des trains

$$\text{canton} = \text{IF Type_d'exploitation} > 0 \text{ then } (\text{Type_d'exploitation} * 750) \text{ else } \text{Longueur_Wagons}$$

DOCUMENT: Longueur en mètres

Décélération = 0.7

DOCUMENT: Si pour un train Corail normalement freiné la décélération tourne autour de 0,93, il n'en est pas de même pour les trains de messagerie (minimum 0,57) et de marchandises (minimum 0,45).

Le minimum pour un train voyageur apte à circuler à 160 Km/h est 0,79 (avec Fep) et 0,87 (sans Fep il faut freiner plus puisque le frein répond moins vite); 140 Km/h : 0,71 et 120 Km/h : 0,68.

Distance_arrêt_des_Trains = Max(canton,(Vitesse__max__des_trains^2)/(2*Décélération))

DOCUMENT: La distance d'arrêt est égale au rapport de la vitesse au carré et du double de la décélération

Selon : <http://lwdr.free.fr/distances.html>

Si pour un train Corail normalement freiné la décélération tourne autour de 0,93, il n'en est pas de même pour les trains de messagerie (minimum 0,57) et de marchandises (minimum 0,45).

Le minimum pour un train voyageur apte à circuler à 160 Km/h est 0,79 (avec Fep) et 0,87 (sans Fep il faut freiner plus puisque le frein répond moins vite); 140 Km/h : 0,71 et 120 Km/h : 0,68.

Espacement__de_sécurité = ((Distance_arrêt_des_Trains+Longueur_des_trains)/
Vitesse__max__des_trains)/3600

DOCUMENT: Espacement minimal de sécurité des trains exprimé en fraction d'heure (établi comme la distance d'arrêt à la vitesse maximale majorée de la longueur du train)

Gabarit = 1

DOCUMENT: Gabarit =

1 = gabarit C

2 = Double stack

Longueur_des_trains = canton

DOCUMENT: Longueur des trains prise égale à celle des cantons. En mètres

Longueur_UTI = 15

Longueur__Wagons = 20

Nombre__Wagons_par_train = IF Type_d'exploitation>0 then (int((Longueur_des_trains-20)/
Longueur__Wagons)) else 1

DOCUMENT: Nombre de wagons par train. Ce nombre est fonction de la longueur des trains. En cas d'automoteurs, on compte un wagon "par train"

$$\text{Poids_moyen_UTI} = 24$$

DOCUMENT: On prend ici un poids moyen prenant en compte la masse transportée plus la tare de l'UTI (non compris la semi en cas de Lo Lo)

$$\text{Poids_Locomotive} = \text{Puissance_de_traction_par_train} * 0.018$$

DOCUMENT: Nombre de tonnes des engins de traction

$$\text{Puissance_de_traction_par_train} = \text{Tonnage_brut_par_train} * \text{Vitesse_max_des_trains} * 9.81 * 0.02$$

DOCUMENT: Puissance en kw

Cette puissance "nominale" dépend de la vitesse et de la pente maximale retenue. Ici la pente est prise à 2 pour mille.

"La puissance se calculant comme l'effort longitudinal multiplié par la vitesse, on peut calculer la puissance nominale nécessaire pour un train et pour chaque machine :

$P_{\text{train}} = \text{Vitesse (en m/s)} * \text{Masse train} * 9,81 * \text{Pente max} = 26565 \text{ kW}$: puissance nominale d'une rame"

Source : Stef

A vérifier avec Alstom et voir aussi le problème de la motorisation répartie

$$\text{Ratio} = \text{Poids_Locomotive} / (\text{Tonnage_brut_par_train} + \text{Poids_Locomotive})$$

$$\text{Tare} = \text{Longueur_Wagons} * 1.1$$

DOCUMENT: Poids en tonnes du wagon vide hors moteur en cas de wagon automoteur

$$\text{Teg} = 60 + (\text{Longueur_des_trains} / 7)$$

DOCUMENT: Temps d'entrée en gare en secondes

Egal à 1 minute plus le temps mis pour entrer.

En gros, en secondes, la longueur en mètres divisée par 7

$$\text{Temps_Accélération} = \text{Vitesse_max_des_trains} / (0.16 * 9.81 * \text{Ratio})$$

DOCUMENT: $\text{Acc} = \text{coef adhérence} * 9,81 * \text{rapport masse loco/masse train}$

le coefficient d'adhérence retenu est de 0,16

En secondes

$$TKBR_par_jour = trains_km_jour * Tonnage_brut_par_train$$

$$Tonnage_brut_par_train = (UTI_par_wagon * Poids_moyen_UTI + Modalhor * 2.5 + Tare) * Nombre_Wagons_par_train + Poids_engin_traction$$

DOCUMENT: On prend en compte, dans le calcul du tonnage brut, de l'ensemble des paramètres. Dans l'hypothèse d'une technique de type Lo-Lo, on prend en compte une majoration de poids due au transport du châssis.

$$Type_d'exploitation = 1$$

DOCUMENT: Type 1 = 750 mètres

Type 2 = 1500 mètres

Type N multiple de 750 mètres

Type 0 : wagon automoteur automatique (sans conducteur)

$$UTI_par_wagon = Gabarit * Int(Longueur_Wagons / Longueur_UTI)$$

DOCUMENT: Nombre d'unité intermodales par wagon

$$Vitesse_max_des_trains = 120000 / 3600$$

DOCUMENT: Vitesse en mètres.seconde

$$36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$$

$$120 \text{ km/h} = 33,33 \text{ m/s}$$

$$140 \text{ km/h} = 38,88 \text{ m/s}$$

$$180 \text{ km/h} = 50 \text{ m/s}$$

Modèle de circulation général

$$Arrivés_gare[Gares,Sens](t) = Arrivés_gare[Gares,Sens](t - dt) + (Amont[Gares,Sens] - Déchargement[Gares,Sens] - vers_chargement[Gares,Sens]) * dt$$

$$INIT \text{ Arrivés_gare}[Gares,Sens] = 0$$

INFLOWS:

$$Amont[Nord,Montant] = Arrivée_Gare_suivante[Picardie,Montant]$$

$$Amont[Nord,Descendant] = 0 * Arrivée_Gare_suivante[Nord,Montant]$$

$$Amont[Picardie,Montant] = Arrivée_Gare_suivante[Ouest_Idf,Montant]$$

Amont[Picardie,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Nord,Descendant]

Amont[Ouest_Idf,Montant] = Arrivée_Gare__suivante[Sud_Idf,Montant]

Amont[Ouest_Idf,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Picardie,Descendant]

Amont[Sud_Idf,Montant] = Arrivée_Gare__suivante[Poitou,Montant]

Amont[Sud_Idf,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Ouest_Idf,Descendant]

Amont[Poitou,Montant] = Arrivée_Gare__suivante[Bordeaux,Montant]

Amont[Poitou,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Sud_Idf,Descendant]

Amont[Bordeaux,Montant] = Arrivée_Gare__suivante[Sud,Montant]

Amont[Bordeaux,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Poitou,Descendant]

Amont[Sud,Montant] = 0*Arrivée_Gare__suivante[Sud,Descendant]

Amont[Sud,Descendant] = Arrivée_Gare__suivante[Bordeaux,Descendant]

OUTFLOWS:

Déchargement[Gares,Sens] = Pl_à_décharger[Gares,Sens]

vers_chargement[Gares,Sens] = Arrivés_gare[Gares,Sens]-Déchargement[Gares,Sens]

Attente_en__Gare[Gares,Sens](t) = Attente_en__Gare[Gares,Sens](t - dt) +
(Chargement__camions[Gares,Sens] + vers_chargement[Gares,Sens] - Départ_UTI[Gares,Sens])
* dt

INIT Attente_en__Gare[Gares,Sens] = 0

INFLOWS:

Chargement__camions[Gares,Sens] = Min((Longueur__de_voies[Gares,Sens]-Linéaire__chargé
[Gares,Sens]) * UTI_par__wagon, Portiques__nécessaires[Gares]/Délai_chargement[Gares,Sens])

DOCUMENT: Le chargement est fonction du nombre de portiques et du délai de chargement, dans la limite de la place disponible.

vers_chargement[Gares,Sens] = Arrivés_gare[Gares,Sens]-Déchargement[Gares,Sens]

OUTFLOWS:

Départ_UTI[Gares,Sens] = IF Attente_en__Gare[Gares,Sens] < X%_près*
(Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon) THEN 0 else Top_départ*
(Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon)

DOCUMENT: Départ :

Deux options :

1. on fait partir des trains complets
2. on fait partir ce qui est prêt à partir lors de chaque "slot".

Attention si on fait partir ce qu'on peut, il faudrait recalculer la longueur des trains a posteriori.

Ici on retient l'hypothèse de faire partir des trains complets à X % près.

Parcours[Gares,Sens](t) = Parcours[Gares,Sens](t - dt) + (Départ_UTI[Gares,Sens] - Arrivée_Gare__suivante[Gares,Sens]) * dt

INIT Parcours[Gares,Sens] = 0

INFLOWS:

Départ_UTI[Gares,Sens] = IF Attente_en__Gare[Gares,Sens] < X%_près* (Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon) THEN 0 else Top_départ* (Nombre__Wagons_par_train*UTI_par__wagon)

DOCUMENT: Départ :

Deux options :

1. on fait partir des trains complets
2. on fait partir ce qui est prêt à partir lors de chaque "slot".

Attention si on fait partir ce qu'on peut, il faudrait recalculer la longueur des trains a posteriori.

Ici on retient l'hypothèse de faire partir des trains complets à X % près.

OUTFLOWS:

Arrivée_Gare__suivante[Gares,Sens] = CONVEYOR OUTFLOW

TRANSIT TIME = Temps_Parcours__réel[Gares,Sens]

DOCUMENT: Temps_Parcours__réel[Gares,Sens]

Parking__Gare[Gares,Sens](t) = Parking__Gare[Gares,Sens](t - dt) + (Arrivée_Camions [Gares,Sens] - Chargement__camions[Gares,Sens]) * dt

INIT Parking__Gare[Gares,Sens] = 0

INFLOWS:

Arrivée_Camions[Gares,Sens] = If Régulateur__plus=1 then Min(Demande[Gares,Sens] *Infl_prix,Demande_Journalière[Gares,Sens]/12-Parking__Gare[Gares,Sens]) ELSE min ((Longueur__de_voies[Gares,Sens]-Linéaire__chargé[Gares,Sens])*UTI_par__wagon,Demande [Gares,Sens]*Infl_prix)

DOCUMENT: IF ((Parking__Gare[Gares,Sens]/Coef_parking)+Attente_nette[Gares,Sens] *Régulateur__plus) < Max_EPL__par_heure__et_par_sens[Gares,Sens] then Infl_prix*(normal (Demande[Gares,Sens],Demande[Gares,Sens]/20)) else 0

OUTFLOWS:

Chargement__camions[Gares,Sens] = Min((Longueur__de_voies[Gares,Sens]-Linéaire__chargé [Gares,Sens]) * UTI_par__wagon, Portiques__nécessaires[Gares]/Délai_chargement[Gares,Sens])

DOCUMENT: Le chargement est fonction du nombre de portiques et du délai de chargement, dans la limite de la place disponible.

Coefficient__Déchargement = 1

DOCUMENT: Ce coefficient est destiné à tenir compte de la difficulté du déchargement par rapport au chargement. Il vient multiplier le temps de base.

En outre, il vient majorer les coûts de manutention (nombre d'engins nécessaires, etc..)

Délai_attente[Gares,Sens] = CTmean(Départ_UTI[Gares,Sens],0,1)

Délai_chargement[Gares,Sens] = Max(Demande[Gares,Sens]/
(Max_EPL__par_heure__et_par_sens
[Gares,Sens])-1,Délai_de_MAD_du_PL*Prise_en_compte__temps_MAD
+Temps_de_chargement__unitaire)

Délai_de_MAD_du_PL = 0.05

Délai_moyen__chargement = ARRAYMEAN(Délai_chargement[*,*])

Délai__accès_voies[Gares,Sens] = CTMEAN(Chargement__camions[Gares,Sens])

Demande[Gares,Sens] = Multiplicateur*(Demande_Journalière[Gares,Sens]
*Fluctuations__horaires)/24

Demande_Journalière[Nord,Montant] = 0

Demande_Journalière[Nord,Descendant] = 1745

Demande_Journalière[Picardie,Montant] = 718

Demande_Journalière[Picardie,Descendant] = 373

Demande_Journalière[Ouest_Idf,Montant] = 731

Demande_Journalière[Ouest_Idf,Descendant] = 503

Demande_Journalière[Sud_Idf,Montant] = 356

Demande_Journalière[Sud_Idf,Descendant] = 309

Demande_Journalière[Poitou,Montant] = 106

Demande_Journalière[Poitou,Descendant] = 115

Demande_Journalière[Bordeaux,Montant] = 287

Demande_Journalière[Bordeaux,Descendant] = 575

Demande_Journalière[Sud,Montant] = 1745

Demande_Journalière[Sud,Descendant] = 0

Espacement_retenu__entre_trains = max(Espacement__sillons,Espacement__de_sécurité)

DOCUMENT: Espacement retenu

L'espacement retenu est le plus grand des deux nombres, ce qui signifie qu'on respecte à la fois les règles de sécurité et le planning si celui est compatible avec ces règles.

Espacement__sillons = .05

DOCUMENT: Espacement entre les départs de trains (en fraction d'heure)

Heure = counter(0,25)

Linéaire__chargé[Gares,Sens] = IF Type_d'exploitation>0 then (Attente_en__Gare[Gares,Sens]/
UTI_par__wagon)*Longueur__Wagons+ 20*Attente_en__gare[Gares,Sens]/
Nombre__Wagons_par_train else Longueur__Wagons*Attente_en__gare[Gares,Sens]/
UTI_par__wagon

DOCUMENT: Longueur de voies utilisée par les trains en gare

Max_EPL__par_heure__et_par_sens[Gares,Sens] = Limite_capacité_horaire[Gares,Sens]

DOCUMENT: Nombre maximal de poids lourd traitable dans la gare considérée.

Pl_à_décharger[Gares,Sens] = Multiplicateur*DELAY(Fluctuations__horaires*normal
((Sorties__journalières[Gares,Sens]/24),(Sorties__journalières[Gares,Sens]/
480)),Coefficient__Déchargement*Temps_de_chargement__unitaire/Portiques__nécessaires
[Gares])

PL__à_charger[Gares,Sens] = DELAY(normal(Demande[Gares,Sens],Demande[Gares,Sens]/
20),Délai_chargement[Gares,Sens])

Prise_en_compte__temps_MAD = 1

DOCUMENT: Bouton permettant de prendre en compte ou non le temps de mise à disposition des véhicules dans le délai de chargement

Régulateur__plus = 0

DOCUMENT: Ce bouton permet de réguler l'accès au chantier en ajoutant au seul contrôle de l'occupation du parking la prise en compte des wagons chargés.

Sorties__journalières[Nord,Montant] = 1745

Sorties__journalières[Nord,Descendant] = 0

Sorties__journalières[Picardie,Montant] = 718

Sorties__journalières[Picardie,Descendant] = 373

Sorties__journalières[Ouest_Idf,Montant] = 751

Sorties__journalières[Ouest_Idf,Descendant] = 503

Sorties__journalières[Sud_Idf,Montant] = 356

Sorties__journalières[Sud_Idf,Descendant] = 309

Sorties__journalières[Poitou,Montant] = 106

Sorties__journalières[Poitou,Descendant] = 115

Sorties__journalières[Bordeaux,Montant] = 287

Sorties__journalières[Bordeaux,Descendant] = 575

Sorties__journalières[Sud,Montant] = 0

Sorties__journalières[Sud,Descendant] = 1745

Temps_descendant = ARRAYSUM(Temps_transport__réel[* ,Descendant])

Temps_montant = ARRAYSUM(Temps_transport__réel[* ,Montant])

Temps_Parcours__réel[Gares,Sens] = IF Distance[Gares,Sens]>0 then
(Espacelement_retenue__entre_trains+(Teg+Temps__Accélération)/3600)+Distance[Gares,Sens]/(

Vitesse__max__des_trains*3.6) else 0

Temps_transport__réel[Gares,Sens] = Ctmean(Arrivée_Gare__suivante[Gares,Sens],0,1)

Top_départ = Périodes__de_maintenance*PULSE(1,.05,Espacelement_retenue__entre_trains)

DOCUMENT: La fonction Top départ génère, lorsque nous ne sommes pas en période de maintenance, un signal de départ, à intervalle égal à l'espacelement entre les trains.

Ce signal est égal à 1 pendant un dt.

Par conséquent, la valeur instantanée est de 1/dt soit, pour un dt de 0,01, de 100.

Vitesse__moyenne = ARRAYSUM(Distance[* ,*])/ARRAYSUM(Temps_Parcours__réel[* ,*])

DOCUMENT: Calcul de la vitesse moyenne des parcours

X%_près = 1

Fluctuations__horaires = GRAPH(Heure)

(0.00, 0.298), (1.00, 0.289), (2.00, 0.233), (3.00, 0.182), (4.00, 0.235), (5.00, 0.309), (6.00, 0.735), (7.00, 1.67), (8.00, 0.803), (9.00, 0.834), (10.0, 1.54), (11.0, 1.88), (12.0, 1.91), (13.0, 1.68), (14.0, 1.70), (15.0, 1.86), (16.0, 1.78), (17.0, 1.46), (18.0, 1.04), (19.0, 0.837), (20.0, 0.885), (21.0, 0.885), (22.0, 0.584), (23.0, 0.377), (24.0, 0.298)

Parcours des trains

Trains_mètres__par_jour(t) = Trains_mètres__par_jour(t - dt) + (In_trains - Out_trains) * dt

INIT Trains_mètres__par_jour = 0

DOCUMENT: parcours des trains par jour (en mètres)

INFLOWS:

In_trains = Trains_km*1000

OUTFLOWS:

Out_trains = DELAY(In_trains,24)

UTI_km__par_jour(t) = UTI_km__par_jour(t - dt) + (In_UTI - Out_UTI) * dt

INIT UTI_km__par_jour = UTI_km*24

DOCUMENT: parcours des trains par jour (en mètres)

INFLOWS:

In_UTI = UTI_km

OUTFLOWS:

Out_UTI = DELAY(In_UTI,24)

Distance[Nord,Montant] = 0

Distance[Nord,Descendant] = 152

Distance[Picardie,Montant] = 152

Distance[Picardie,Descendant] = 190

Distance[Ouest_Idf,Montant] = 190

Distance[Ouest_Idf,Descendant] = 180

Distance[Sud_Idf,Montant] = 180

DOCUMENT: Distance de gare à gare en km.

Exemple : la distance sud_idf Montant est celle qui relie la gare Sud_idf à celle située au nord de celle-ci.

Distance[Sud_Idf,Descendant] = 290

Distance[Poitou,Montant] = 290

Distance[Poitou,Descendant] = 190

Distance[Bordeaux,Montant] = 190

Distance[Bordeaux,Descendant] = 225

Distance[Sud, Montant] = 225

Distance[Sud, Descendant] = 0

Heures_de_conduite = trains_km_jour/Vitesse__moyenne

DOCUMENT: Nombre de l'heures de conduite et d'attente en gare

Longueur_des_lignes = ARRAYSUM(Distance[*,*])

DOCUMENT: En kilomètres

On fait ici la somme des distances de gare à gare (sens montant et sens descendant)

Parcours_moyen_théorique_par_train = (24*3600-6*(Temps__Accélération+Teg))
*Vitesse__max__des_trains/1000

DOCUMENT: Distance théorique parcourue par un train dans une journée.

Tient compte des 7 gares de la ligne.

Le temps d'arrêt est posé égal à au temps entre sillons

On divise par 1000 pour avoir ce nombre en km.

Trains_km = UTI_km/UTI__par_train

DOCUMENT: Trains km produits par heure

trains_km_jour = Trains_mètres__par_jour/1000

DOCUMENT: Trains km produits par jour

UTI_Kilomètres_par_liaison[Gares,Sens] = Arrivée_Gare__suivante[Gares,Sens]*Distance
[Gares,Sens]

DOCUMENT: UTI.km produites par liaison

UTI_km = ARRAYSUM(UTI_Kilomètres_par_liaison[*,*])

DOCUMENT: Somme des kilomètres parcourus par les UTI sur toutes les liaisons :

UTI.km produites par heure

UTI_km_jour = UTI_km__par_jour

Wagons_km_jour = Nombre__Wagons_par_train*trains_km_jour

DOCUMENT: Nombre de wagons.km produits par jour

Il s'agit ici simplement de multiplier le nombre de trains.km par le nombre moyen de wagons par trains.