

**LA VALEUR DE LA FIABILITÉ
DES DURÉES D'ACHEMINEMENT
DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE DE FRET**

SEGHIR ZERGUINI
DÉPT ECONOMIE ET GESTION
ENS CACHAN

MICHEL SAVY
IUP
UNIVERSITÉ PARIS XII

INTRODUCTION

Le succès d'un service de transport de marchandises se mesure de plus en plus au respect des engagements conclus avec le client en termes de « qualité ». Cette qualité de service, nous pouvons l'exprimer comme le bon respect des horaires d'arrivée convenus, entre le transporteur et le chargeur, de la marchandise au lieu de sa destination. De nombreuses enquêtes et études ont déjà mis en évidence l'importance pour le chargeur du caractère « fiable » d'un mode de transport. La régularité ou la fiabilité des temps de parcours sont les principales qualités attendues par les chargeurs : l'acheminement en temps et en heure doit être en effet la qualité première d'une entreprise de transport.

Le but du projet de recherche d'où est issu cet article¹ est de définir des indicateurs caractérisant la fiabilité des durées de trajet, de les quantifier à partir des données disponibles et de mettre au point une méthodologie permettant d'évaluer les gains engendrés par des actions, des stratégies ou des investissements œuvrant à l'amélioration de la fiabilité du transport ferroviaire. Par ailleurs, ce cadre méthodologique permettra au chargeur de réduire l'incertitude sur la durée d'acheminement de sa marchandise, au transporteur d'optimiser son service, au gestionnaire d'infrastructure d'optimiser le fonctionnement du système ferroviaire et à la collectivité (Pouvoirs publics) d'optimiser ses investissements en matière de transport. Il convient donc de noter que notre recherche porte sur une analyse intégrée transporteur/chargeur.

Cet article s'articule selon trois phases successives. La première a pour but l'analyse de la littérature scientifique, la collecte de données, la définition des concepts et l'analyse des performances actuelles du système ferroviaire. La seconde phase consiste à formuler un modèle du coût du temps qui prend en compte la variabilité des temps de transport des marchandises et la marge de temps de précaution (temps de sécurité que rajoute le chargeur ou le transporteur au temps moyen de transport pour faire face aux éventuels aléas). La dernière phase a pour but de déterminer la marge de précaution optimale qui minimise le coût du temps et d'évaluer les conséquences sur le calcul de la rentabilité économique lorsqu'on prend en compte la variabilité des temps de transport.

1. ETAT DE L'ART

La revue de la littérature nous a permis de nous rendre compte de la diversité des travaux traitant de l'estimation de la valeur de la fiabilité dans le transport de fret ferroviaire ou routier.

Outre le prix et la durée de transport, un service de transport peut être caractérisé par sa fiabilité. Cette fiabilité, mesurée comme la variabilité des durées de transport de ce service et leur conformité aux horaires prévus par le transporteur et annoncées comme tels au chargeur, devient de plus en plus un facteur déterminant dans la prise de décision des chargeurs quant à savoir quel mode utiliser pour effectuer un transport de marchandises. L'importance de la fiabilité est désormais montrée au travers de nombreuses études (à la fois transport de *voyageurs* ou transport de *marchandises*) :

- . des enquêtes de préférences déclarées ou révélées ont mis en évidence l'importance de la fiabilité dans le choix modal. Il est clair qu'un service fiable sera préféré des chargeurs ;

¹ Cet article est issu des travaux du projet de recherche réalisé (2005-2006) par Laetitia LEGRAIN, Michel SAVY et Seghir ZERGUINI (Université de Paris 12) et financé par la DGMT, RFF et la SNCF dans le cadre du programme PREDIT.

. et jusqu'il y a peu encore ignorée, la fiabilité fait également son apparition dans des analyses coût-bénéfice qui cherchent à étudier les gains apportés par un certain type d'investissement.

A l'instar du temps de transport, une valeur de la fiabilité peut être calculée. Cette valorisation représente la diminution des coûts suite à une amélioration du facteur « fiabilité ». Dans l'approche coût-bénéfice, peut par exemple être étudiée la situation où l'opérateur de transport (ou le gestionnaire d'infrastructure) souhaite améliorer ses services pour garantir à ses clients de meilleurs temps de transport, une plus grande fiabilité ou encore une plus grande sécurité des biens transportés. Ces améliorations représentent un coût non négligeable pour le transporteur (ou le gestionnaire d'infrastructure), il faut donc évaluer à quel prix le chargeur souhaite bénéficier de ce nouveau service.

La « fiabilité » d'un moyen de transport se mesure à ses respects des horaires de livraison c'est-à-dire, le plus souvent, au retard de livraison (*a priori* une avance étant à la fois plus rare et moins déplaisante). Le respect des horaires se mesure à partir des *prédictions* des heures d'arrivées (*horaire théorique*). Le retard est la différence de temps entre l'heure *prévue* et l'heure *réelle* d'arrivée.

Les différentes études mettent en évidence plusieurs façons de *qualifier* la « fiabilité », on peut citer :

- . La probabilité de retard ou le pourcentage de retards observés ou encore la proportion de camions ou trains arrivant en retard.
- . Le risque d'arriver en retard : avec combien de jour(s), d'heure(s) ou de minute(s) de retard une livraison peut-elle arriver ?
- . La dispersion des heures d'arrivée : à quelle heure 98 % des trains sont espérés arriver à destination? Cela correspond typiquement à une mesure de la variabilité de l'heure d'arrivée à destination d'un jour à l'autre pour un service régulier.
- . La variance du temps de transport ou l'écart-type du temps de transport.
- . Le coefficient de variation : rapport entre l'écart-type du temps de transport et le temps de transport moyen.

Nous remarquons donc que la littérature examinée se concentre en effet sur les **retards** au lieu de destination, et néglige par conséquent le fait qu'une livraison puisse arriver à l'avance.

Il convient de noter que de plus en plus, la fiabilité trouve sa place dans les analyses coût-bénéfice dans l'évaluation de projets d'investissement dans le domaine des transports. La littérature que nous avons consultée à ce sujet en est la preuve. En effet, la fiabilité des transports a été abordée lors des débats de la Conférence Européenne des Ministres des Transports « Le Temps et les Transports » (CEMT, Table ronde 127, 2005) ; elle est évaluée dans le projet du PREDIT « QUALIFFER » ou dans les travaux de DE JONG et al. (2004) et

elle était déjà considérée dans quelques études menées par ALLEN et al. (1985) et BAUMOL et VINOD (1970).

En guise de conclusion, cette revue de la littérature montre bien le besoin d'introduire la fiabilité pour valoriser la qualité d'un service de transport. Car, jusqu'à présent, celui-ci se reflétait uniquement dans la valeur associée à un gain de temps (de transport). Nous avons pu nous rendre compte de la diversité des pratiques de valorisation du temps et de la fiabilité ainsi que celle des résultats.

2. COLLECTE DE DONNÉES ET CARACTÉRISATION DE LA FIABILITÉ

Parallèlement à l'examen de la littérature traitant de la fiabilité dans le transport de marchandises en particulier par le mode ferroviaire, nous nous sommes fixés comme objectif dans le cadre de ce projet d'aboutir à des recommandations de valorisation de la fiabilité compatibles avec les données disponibles. Ainsi, la tâche de collecte et de traitements des données est l'occasion de réaliser un état des lieux sur les données disponibles et de caractériser la fiabilité dans le transport ferroviaire de marchandises.

2.1. COLLECTE DES DONNÉES

L'objectif de cette tâche est de procéder à la collecte de données permettant de mesurer les phénomènes liés à la fiabilité des durées de trajet dans le transport ferroviaire de marchandises. Pour ce faire, nous avons, dans un premier temps, sélectionné avec les partenaires du projet sept couples Origine-Destination (OD) présentés sur la Figure 1.

Nous avons recueilli auprès de RFF des données relatives aux durées de trajet des sept OD sur deux bases de données de la SNCF : HOUAT² et BREHAT³.

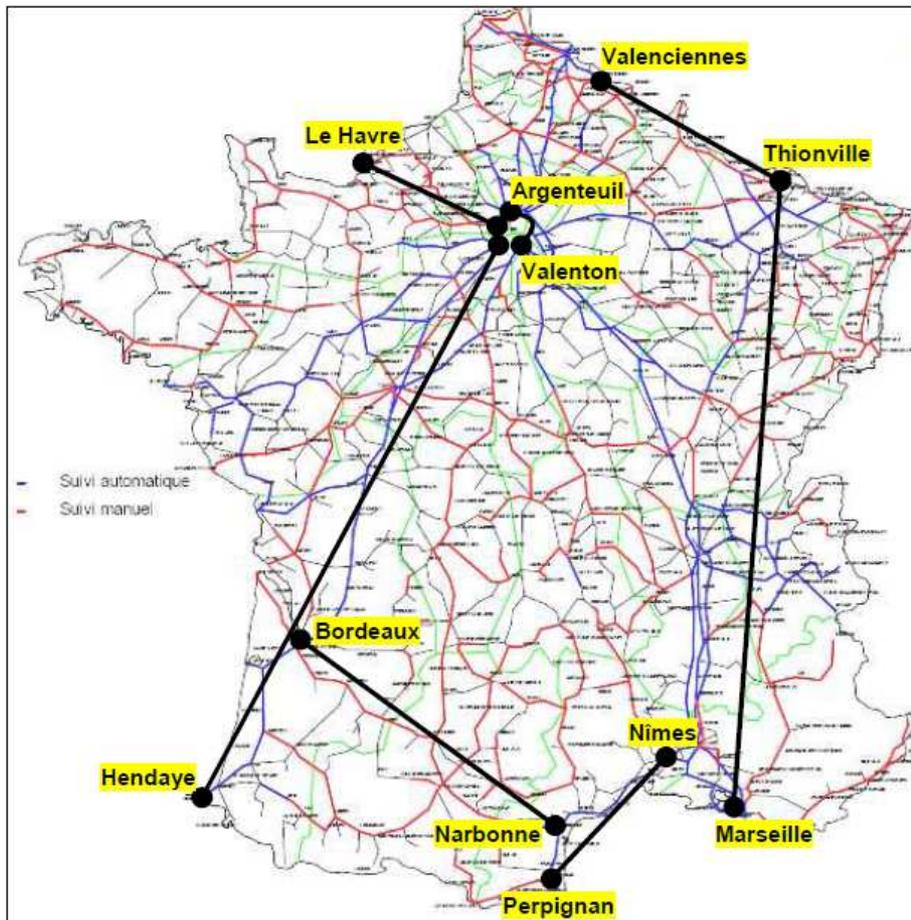
Dans la **base HOUAT** on dispose des données de **planification de trajet** (Marche, heure de départ, durée prévue de trajet, points de passage...) de l'ensemble des trains circulant sur le territoire français (voyageurs et fret). Cet outil est utilisé pour la confection et la diffusion des horaires prévisionnels.

La **base BREHAT** permet de recueillir les données d'**observation des conditions réelles de circulation des trains** (Numéro de l'enregistrement, heure de l'observation, durée de retard (+)/durée d'avance(-), codes CI et CH de la gare d'observation, jour, numéro de circulation, heure de départ de l'origine) à certains points remarquables (PR) du réseau ferroviaire.

² HOUAT : Système d'information utilisé pour identifier et mesurer la réservation des sillons et des trains.

³ BREHAT : Base des Résultats de l'Exploitation Habiles à d'Autres.

Figure 1: OD de transport de fret ferroviaire analysées



2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES

La combinaison des bases HOUAT et BREHAT permet de suivre un train de fret régulier sur un nombre de jours définis. Ainsi, pour chaque OD et pour chaque sens de circulation, nous avons sélectionné 1 à 3 trains de fret réguliers sur HOUAT et nous avons extrait de BREHAT, pour une année complète (du 27 juillet 2004 au 27 juillet 2005), les données caractérisant les durées de trajet effectuées par ces trains sélectionnés.

Dans le Tableau 1 sont présentées les données recueillies pour chacune des OD prises en compte.

Afin de caractériser la variabilité des temps de trajet, nous présentons sur les graphiques qui suivent et sur lesquels sera basée l'analyse des OD de chaque circulation :

- la dispersion des durées d'avance et de retard enregistrées à destination de

l'OD qui peut être caractérisée par :

- . L'évolution chronologique d'un jour à un autre jour
- . Les pourcentages des circulations arrivant en retard, en avance et à l'heure. Pour les arrivées à l'heure, nous avons considéré celles qui arrivent à destination avec un retard ou une avance n'excédant pas 5 minutes.

- La distribution des durées de trajet qui peut être caractérisée par trois variables :

- . Durée de trajet moyenne (DM) observée qu'on comparera à la durée prévue pour le même itinéraire
- . Ecart-type (ET) observé décrivant la dispersion des durées de trajet autour de la moyenne
- . Coefficient de variation qui permet de comparer entre les différentes distributions des OD prises en compte. Ce coefficient de variation ou indice de variabilité relative, noté CV, correspond à $CV=ET/DM$.

Tableau 1: Trains de transport de fret suivis

Origine -> Destination	N° du train	Heure de départ	Durée de trajet prévue	Nombre d'observations / An
Valenton -> Argenteuil	58138	19:20	00:57	223
Valenton -> Argenteuil	57234	02:55	01:11	112
Le Havre -> Paris	73138	05:06	05:15	128
Nîmes -> Perpignan	435629	05:18	03:35	229
Nîmes -> Perpignan	44103	18:04	04:52	204
Nîmes -> Perpignan	44111	02:00	05:47	314
Perpignan -> Nîmes	49254	18:22	03:06	212
Perpignan -> Nîmes	435672	06:26	03:52	277
Perpignan -> Nîmes	435652	13:47	02:55	197
Thionville -> Valenciennes	54084	13:34	03:27	241
Valenciennes -> Thionville	55271	20:02	03:41	241
Narbonne -> Bordeaux	58870	15:31	06:44	214
Thionville -> Marseille	50721	00:35	08:03	88
Paris -> Hendaye	53923	11:21	13:56	213
Hendaye -> Paris	42100	04:30	12:00	354
Hendaye -> Paris	42114	18:22	09:09	300

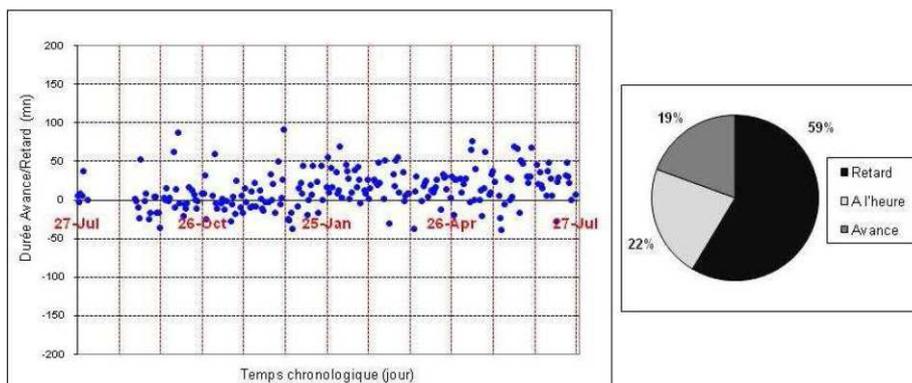
Afin d'illustrer les traitements effectués, nous présentons ci-après les résultats de 2 OD sur les 14 qui sont analysées (Figures 2 à 5).

OD : Valenton-Argenteuil

La Figure 2 montre que le train suivi entre Valenton et Argenteuil (région parisienne) circule toute l'année à l'exception du mois d'août. Elle montre

également que le train considéré est plus souvent en **retard** (59 %) et de façon récurrente sur toute l'année.

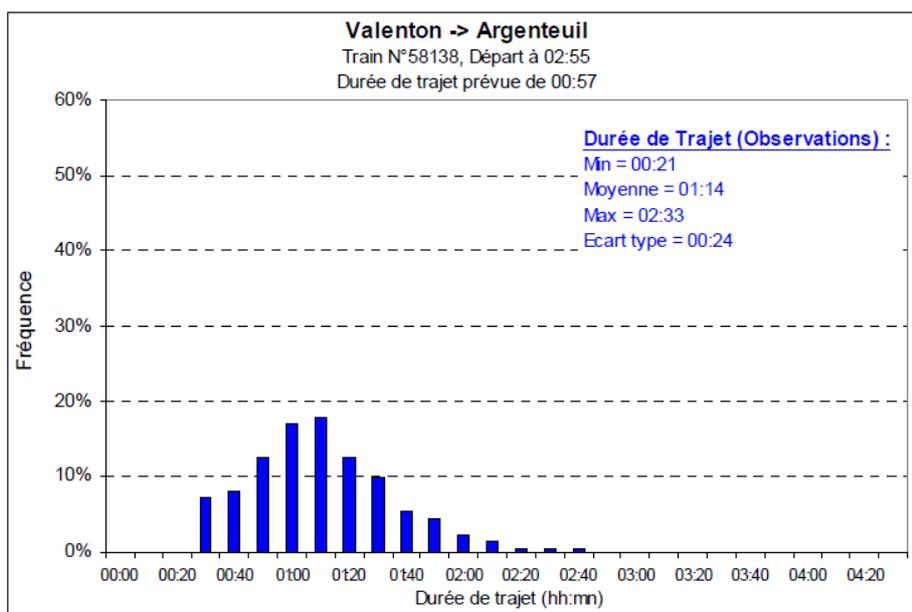
Figure 2 : Évolution des durées d'avance et de retard-Train N° 58138



La Figure 3 permet de visualiser la distribution des durées de trajet qui se caractérise par :

- . Une durée moyenne de 1h14 **supérieure de 17 mn** à la durée de trajet prévue
- . Un coefficient de variation de **32,4 %**.

Figure 3 : Distribution des durées de trajet-Train N° 58138

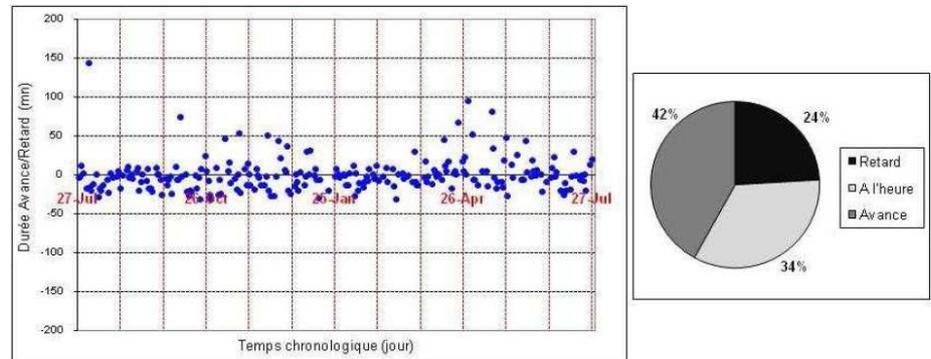


On peut constater que bien que ce train circule la nuit, il est soumis à une forte variabilité des temps de trajet.

OD : Thionville-Valenciennes

La Figure 4 montre que le train suivi entre Thionville et Valenciennes circule toute l'année. Il montre également que le train considéré est souvent en **avance** (42 %) mais par contre il existe des pointes de retard supérieures à 90 mn.

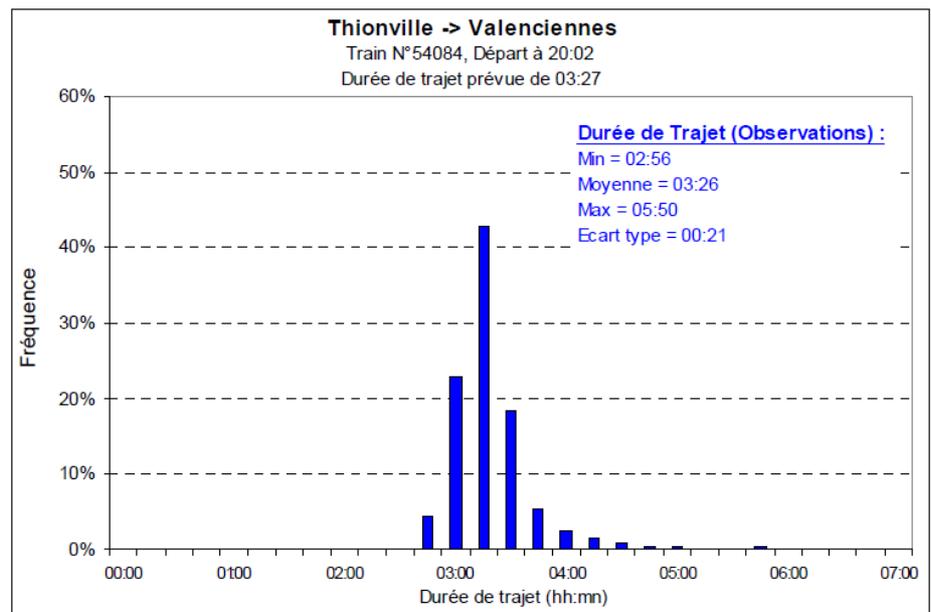
Figure 4 : Evolution des durées d'avance et de retard-Train N° 54084



La Figure 5 permet de visualiser la distribution des durées de trajet qui se caractérise par :

- . Une durée moyenne de 3h26 **inférieure de 1 mn** à la durée de trajet prévue
- . Un coefficient de variation de **10,2 %**.

Figure 5 : Distribution des durées de trajet-Train N° 54084



On peut constater que ce train est soumis à une plus ou moins faible variabilité des temps de trajet.

2.3. ANALYSE DES PERFORMANCES ACTUELLES

Nous évaluons ici les performances actuelles du réseau ferroviaire dans le domaine du transport de fret de manière à apprécier les enjeux que représente la notion de fiabilité dans ce mode de transport. Cette analyse ne prétend pas être exhaustive étant donné que nous avons étudié seulement quelques itinéraires du réseau ferroviaire sur une période d'une année. En revanche, l'évaluation que nous proposons s'appuie sur une analyse détaillée des données disponibles et accessibles, et permet une première quantification des indicateurs caractéristiques de la fiabilité des durées de trajet mis au point dans le cadre de ce projet.

Les résultats caractérisant les performances des OD sélectionnées sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison des prévisions (plan de transport) et des observations

Origine → Destination	Heure de départ	Durée de trajet prévue (DP)	Durée de trajet moyenne (DM)	Durée de trajet minimale (DMin)	Durée de trajet maximale (Dmax)	Ecart type (ET)	Coefficient de variation (CV)	DM - DP
Le Havre → Paris	05:06	315	339	288	464	18	5,3%	24
Thionville → Valenciennes	20:02	207	206	176	350	21	10,2%	-1
Valenton → Argenteuil	02:55	57	74	21	153	24	32,4%	17
Narbonne → Bordeaux	13:47	404	431	342	553	27	6,3%	27
Valenciennes → Thionville	05:18	221	231	179	417	28	12,1%	10
Perpignan → Nîmes	04:30	306	333	137	315	28	8,4%	27
Nîmes → Perpignan	02:00	215	228	139	490	29	12,7%	13
Valenton → Argenteuil	08:22	71	88	41	263	33	37,5%	17
Perpignan → Nîmes	19:20	175	179	87	369	35	19,6%	4
Perpignan → Nîmes	15:31	232	219	140	401	36	16,4%	-13
Thionville → Marseille	00:35	483	504	465	676	36	7,1%	21
Paris → Hendaye	11:21	836	836	695	973	36	4,3%	0
Hendaye → Paris	18:22	549	571	519	729	43	7,5%	22
Nîmes → Perpignan	18:04	347	315	130	384	47	14,9%	-32
Nîmes → Perpignan	06:26	292	302	196	568	48	15,9%	10
Hendaye → Paris	13:34	720	636	538	854	58	9,1%	-84

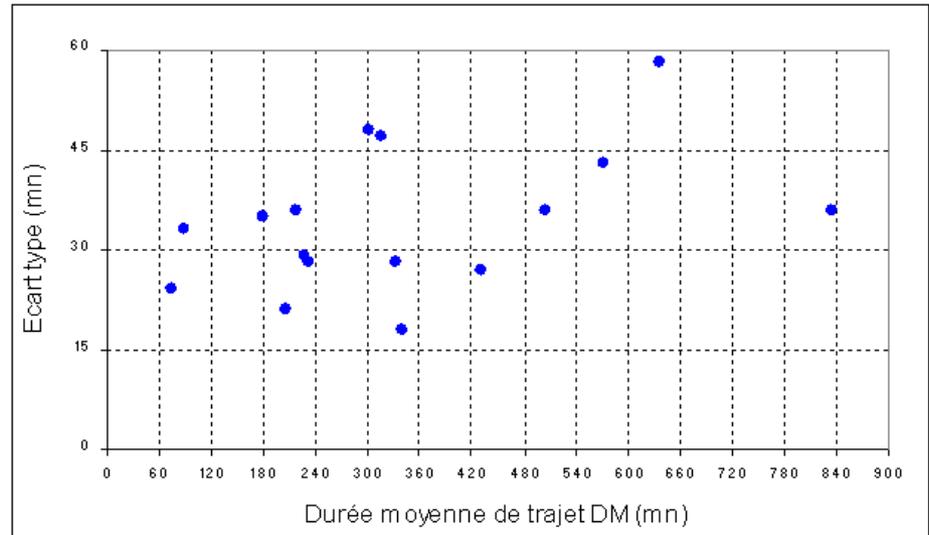
D'une manière générale pour l'ensemble des circulations étudiées, la dernière colonne du Tableau 2 montre que par rapport à leurs horaires d'arrivée prévus :

- . **60 %** des circulations arrivent en *moyenne en retard*
- . **20 %** des circulations arrivent en *moyenne en avance*
- . **20 %** des circulations arrivent en *moyenne à l'heure* (± 5 mn).

Cependant, pour les trois circulations arrivant en moyenne à l'heure, on constate qu'elles sont sujettes à de considérables fluctuations des durées de trajets : leurs écarts-types sont de 21, 35 et 36 mn.

Dans le Tableau 2, les différentes circulations de train sont classées par ordre croissant de l'écart-type. Ce dernier varie entre 18 mn et 58 mn et sa moyenne est de 34 mn. On peut constater que **l'écart-type est indépendant de la durée moyenne de trajet** et donc de la distance (Figure 6).

Figure 6 : Écart-type en fonction de la durée moyenne du trajet



Ce résultat montre qu'à la différence du transport routier où les incidents peuvent se produire en cours de parcours et ont donc une fréquence liée à la longueur du trajet, le transport ferroviaire connaît des incidents avant et en fin des opérations de traction, de transport proprement dit : pendant tous les relais et les articulations de la chaîne de transport.

C'est là que résident la faiblesse et la fragilité du système ferroviaire. D'où la recherche de solutions plus simples. Par exemple, pour le transport combiné rail-route, on constate la disparition de systèmes en *hub* (intelligents mais trop complexes) au profit de simples navettes (rustiques mais robustes).

Du point de vue de la concurrence rail-route, la dernière colonne du Tableau 3 présente pour chaque OD, la différence de durées de trajet entre les modes ferroviaire (durée moyenne) et routier (durée théorique).

La durée de trajet par mode routier est calculée sur la base des distances données par www.viamichelin.fr, en considérant une vitesse moyenne d'un poids lourd de 60 km/h.

Les itinéraires où le transport ferroviaire est plus rapide en moyenne que le transport routier sont :

- . Thionville -> Marseille
- . Hendaye -> Paris
- . Thionville <-> Valenciennes
- . Perpignan -> Nîmes

Cependant pour les itinéraires Thionville-Valenciennes et Perpignan-Nîmes, il n'est pas certain que le mode ferroviaire soit plus avantageux que le mode routier. En effet pour ces itinéraires, on constate une faible différence de

durées moyennes de trajet (entre le routier et le ferroviaire) et une forte variabilité des durées de trajet par le mode ferroviaire.

Tableau 3 : Comparaison du transport ferroviaire et transport par route

Origine → Destination	Heure de départ	Durée de trajet prévue (DP)	Durée de trajet moyenne (DM)	Ecart type (ET)	Coefficient de variation (CV)	Distance par route (Km)	Durée trajet par route (DR)	DM - DR
Le Havre → Paris	05:06	315	339	18	5,3%	171	171	168
Thionville → Valenciennes	20:02	207	206	21	10,2%	301	301	-95
Valenton → Argenteuil	02:55	57	74	24	32,4%	42	42	32
Narbonne → Bordeaux	13:47	404	431	27	6,3%	393	393	38
Valenciennes → Thionville	05:18	221	231	28	12,1%	301	301	-70
Perpignan → Nîmes	04:30	306	333	28	8,4%	202	202	131
Nîmes → Perpignan	02:00	215	228	29	12,7%	202	202	26
Valenton → Argenteuil	08:22	71	88	33	37,5%	42	42	46
Perpignan → Nîmes	19:20	175	179	35	19,6%	202	202	-23
Perpignan → Nîmes	15:31	232	219	36	16,4%	202	202	17
Thionville → Marseille	00:35	483	504	36	7,1%	796	796	-292
Paris → Hendaye	11:21	836	836	36	4,3%	787	787	49
Hendaye → Paris	18:22	549	571	43	7,5%	787	787	-216
Nîmes → Perpignan	18:04	347	315	47	14,9%	202	202	113
Nîmes → Perpignan	06:26	292	302	48	16,9%	202	202	100
Hendaye → Paris	13:34	720	636	58	9,1%	787	787	-151

La revue de la littérature et l'analyse des bases de données BREHAT/HOUAT nous amènent à l'élaboration de la méthodologie suivante pour la mise au point d'un modèle d'évaluation économique des gains de fiabilité. Nous basons notre méthode sur l'exploitation d'une fonction du coût total associée au temps de trajet de la marchandise. Ensuite, nous supposons, tout comme le fait BRUZELIUS (ou encore SMALL et al.) et comme le montre le traitement des données BREHAT dans cette section, que les durées de trajet suivent une certaine loi de distribution. La fonction de coût que nous construisons tient évidemment compte des éléments relatifs à la (non) fiabilité du transport. Cette non-fiabilité, nous l'exprimons en termes de durée d'arrivée en avance et de durée d'arrivée en retard. En effet, à chacun de ses événements peuvent être associés des surcoûts à la fois ressentis directement par le chargeur et indirectement par le transporteur.

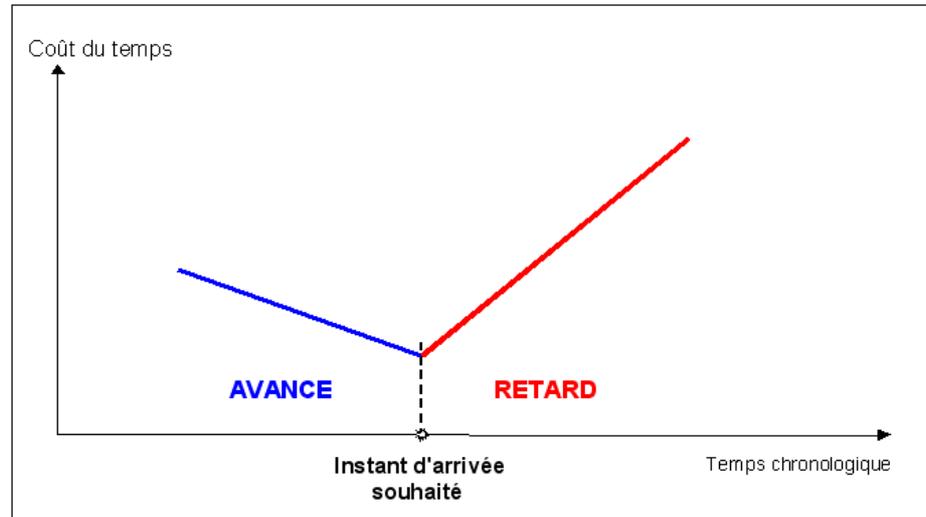
3. MODÉLISATION MICROÉCONOMIQUE

3.1. MISE AU POINT DU MODÈLE

La variation du coût du temps consacré au transport d'une marchandise en fonction des instants d'arrivées à destination est illustrée par la Figure 7. *A priori* et d'une façon intuitive, si on considère que le client (chargeur) prévoit un horaire fixe d'arrivée à destination et que les surcoûts unitaires liés aux arrivées en avance et en retard sont constants dans le temps alors la forme du graphique est de type « courbe en V ». Ce raisonnement est basé sur l'idée avancée par VIKREY à la fin des années 60 puis reprise ces dernières années par ARNOTT et al. dans le cadre du transport de voyageurs. Cette idée postule

le fait que l'utilisateur souhaitant arriver à un certain horaire est amené, en période de congestion, à arbitrer entre son temps de trajet et son temps ou de retard à l'arrivée s'il décale son départ. L'objectif est donc d'adapter l'idée de VIKREY au transport de fret.

Figure 7 : Variation du coût du temps en fonction des instants d'arrivées à destination



Nous supposons dans ce cadre que le client/chargeur ne peut pas ajuster l'horaire de livraison de sa marchandise à destination selon ses préférences, ce qui signifie que cet horaire est donné à l'avance au transporteur. Cette contrainte d'arrivée à un certain horaire est conforme à la réalité ; elle lui est conforme surtout dans les cas des flux tendus où la marchandise doit être livrée à l'heure prévue.

La forme de la courbe de la Figure 7 peut être justifiée par le fait qu'à l'instant d'arrivée souhaité le coût du temps est à son minimum, et que dans les cas où la marchandise arrive en retard ou en avance, en plus du coût du temps minimal prévu, il existe un surcoût associé au retard ou à l'avance.

Le surcoût d'avance peut être lié aux aspects suivants : surveillance de la marchandise par le transporteur ou par un prestataire en attendant que le client la réceptionne, contrepartie du fait de la réorganisation si le client accepte toutefois de réceptionner dès son arrivée même en avance, etc.

Le surcoût de retard correspond aux aspects suivants :

- . surveillance/gardiennage,
- . entreposage,
- . monopolisation des moyens de manutention (humains et matériels) pour charger/décharger,
- . manque à gagner du fait de l'arrivée en retard à destination de la

- marchandise (usage d'un mode alternatif),
- gestion de stock de sécurité,
- etc.

Par ailleurs, on peut noter que la pente de la courbe dans le cas du retard est plus importante que dans le cas d'avance. En effet, il est vraisemblable qu'une heure de retard est plus pénalisante et coûte plus chère qu'une heure d'avance, et d'autre part, on peut penser que le coût unitaire du retard croît avec sa durée. Cependant, pour simplifier la formulation du problème et sa résolution, on considère que les coûts unitaires sont constants en fonction du temps.

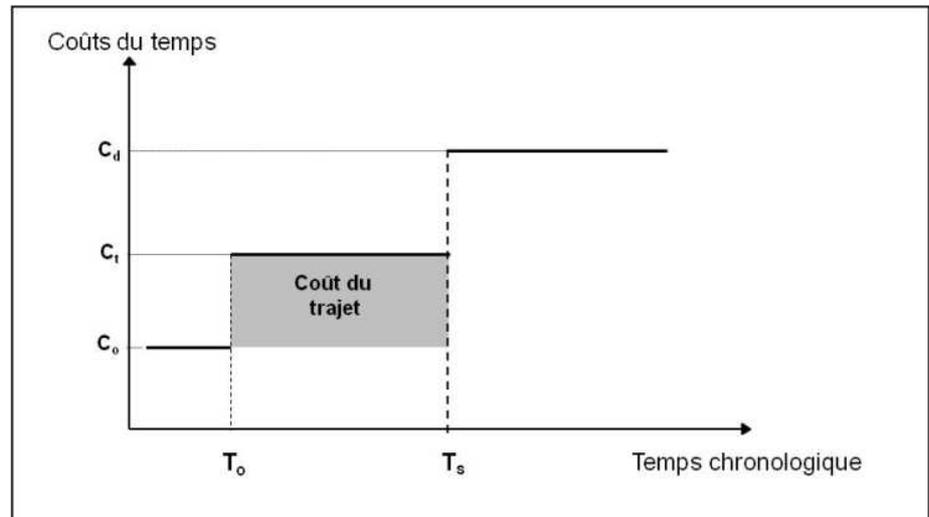
En admettant les considérations ci-dessus, et aussi pour être conforme avec la présentation du coût du temps selon la Figure 7, nous proposons une analyse plus fine du coût du temps de transport. Ainsi, la valorisation du temps de transport complet (porte-à-porte) peut être déclinée en plusieurs coûts qui caractérisent les activités encadrant l'acheminement de la marchandise (Tableau 4).

Tableau 4 : Coûts encadrant l'acheminement de la marchandise (avant, pendant et après le transport)

Coût unitaire	Définition	Propriétés
C_o	Coût de stockage relatif au temps d'immobilisation de la marchandise à l' origine avant l'acheminement (entreposage/stockage dans le dépôt, usine, locaux du chargeur,...)	
C_t	Coût de stockage relatif au temps passé par la marchandise durant le trajet (train, camion,...).	$C_o < C_t$ (<i>sinon il serait plus rentable pour le chargeur de stocker la marchandise dans les moyens de transport</i>)
C_a	Coût (ou surcoût) du temps d'arrivée de la marchandise en avance (surcoûts liés au stockage dans les zones de fret, plates-formes, aires de livraison,...)	$C_o < C_a$ (<i>sinon on pourrait prendre une marge de précaution infinie</i>)
C_d	Coût (ou surcoût) du temps d'arrivée de la marchandise en retard (pénalités de retard, manque à gagner,...)	$C_o < C_d$ (<i>sinon le transport de la marchandise ne se justifie pas sur le plan économique</i>)

La Figure 8 illustre le cas où la marchandise part à T_o (instant de départ du lieu d'origine) et arrive à T_s (horaire souhaité d'arrivée à destination). Dans ce cas, qui caractérise l'approche traditionnelle de calcul des gains de temps, le coût du temps associé au trajet effectué (sans retard ni avance) est égal à : $(C_t - C_o) \cdot (T_s - T_o)$, ce qui correspond à l'aire grisée définie par le produit de la durée de trajet et le différentiel entre le coût unitaire relatif au stockage de la marchandise pendant l'acheminement et le coût unitaire de stockage de la marchandise à l'origine.

Figure 8 : Coût du temps d'un acheminement sans aléas

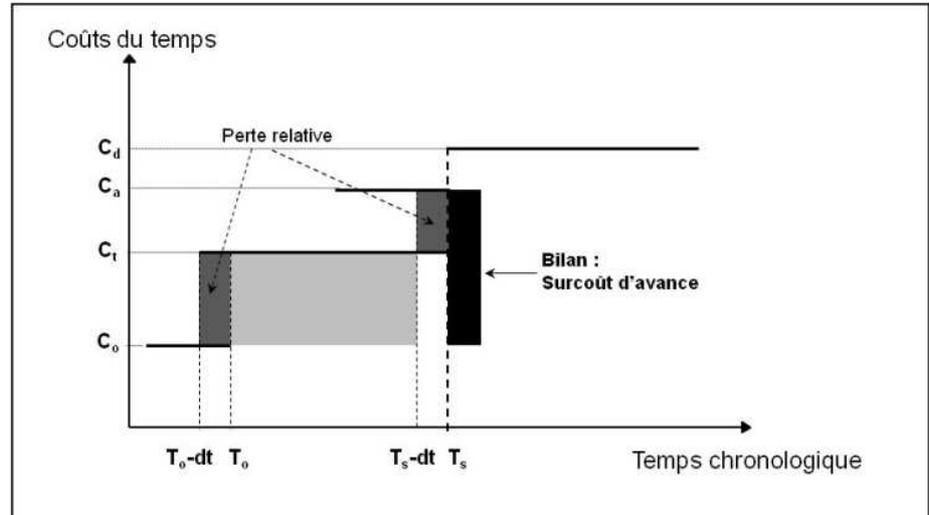


L'approche de calcul du coût du temps de transport illustrée par la Figure 8 représente le cas d'un acheminement « parfait » (départ à un horaire donné et arrivée à l'horaire souhaité) ; on peut néanmoins imaginer deux situations plus proches de la réalité.

Situation 1 :

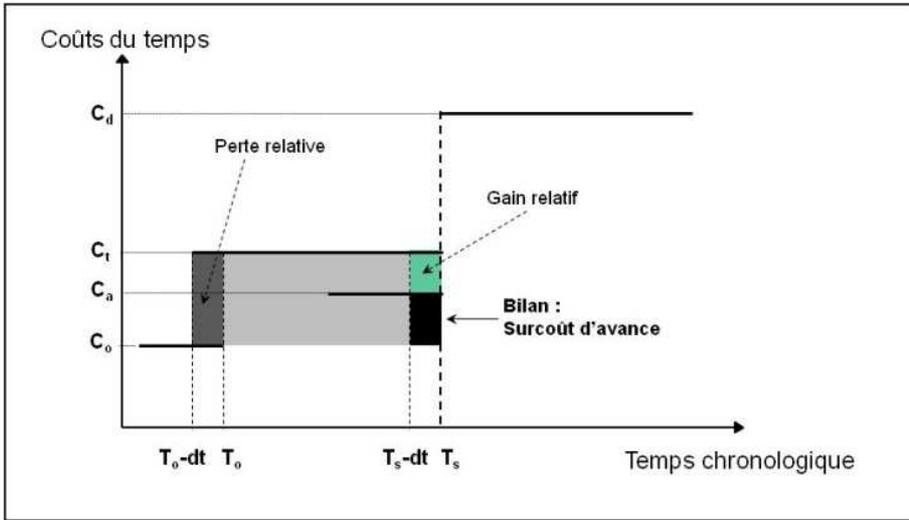
Si la marchandise est acheminée en avance avec une durée dt en partant à l'horaire $(T_o - dt)$, et si on considère aussi qu'elle arrive à sa destination avec une même avance dt , il en résulte par conséquent un surcoût lié à cette avance, en plus du coût du temps de trajet, égal à $(C_a - C_o)dt$.

Figure 9 : Surcoût du temps d'un acheminement arrivant en avance avec $C_a < C_t$



On peut constater également que ce surcoût est indépendant du fait que le coût unitaire d'avance est supérieur ou inférieur au coût unitaire de stockage de la marchandise durant le trajet (Figures 9 et 10).

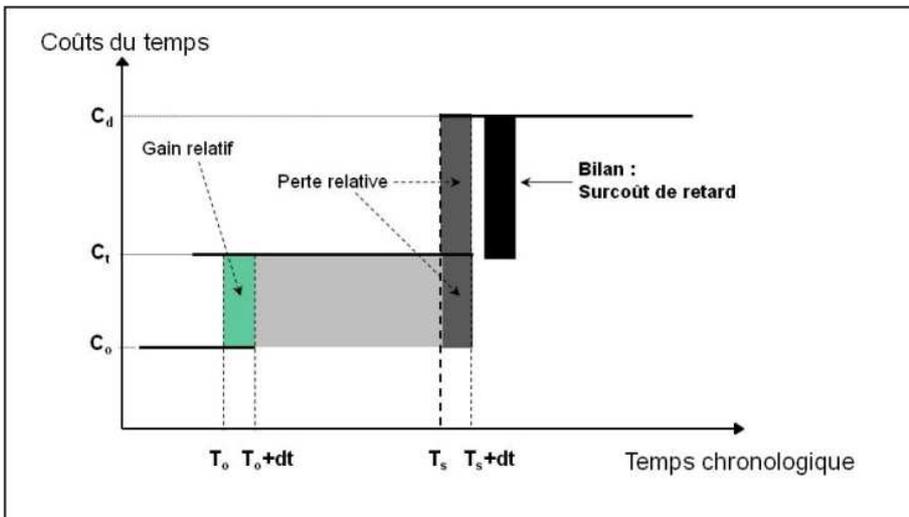
Figure 10 : Surcoût du temps d'un acheminement arrivant en avance avec $C_a > C_t$



Situation 2 :

Si la marchandise est acheminée en retard de son horaire de départ d'une durée dt en partant à l'instant $(T_0 + dt)$, et si on considère aussi qu'elle arrive à sa destination avec un même retard dt , il en résulte par conséquent un surcoût lié à ce retard égal à $(C_d - C_t)dt$.

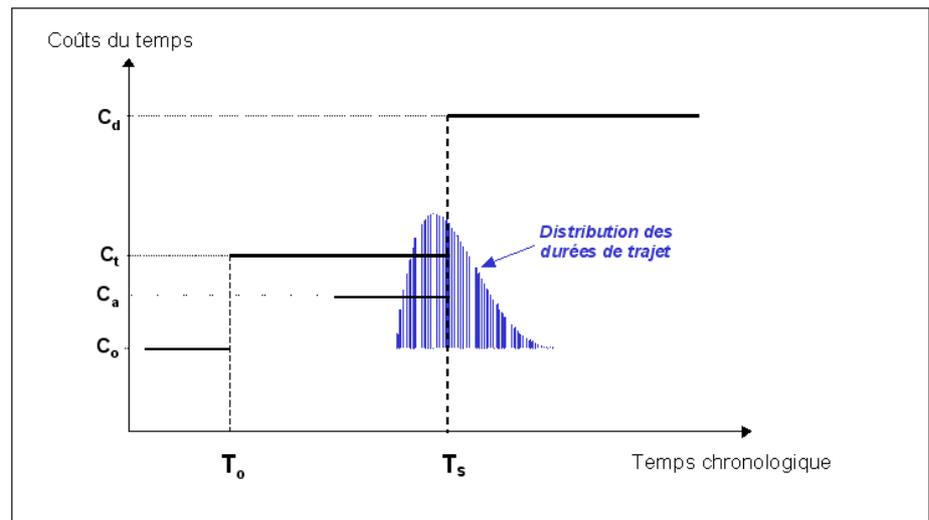
Figure 11 : Surcoût du temps d'un acheminement arrivant en retard



Les situations 1 et 2 mettent en évidence l'approche qu'on peut adopter pour valoriser les surcoûts liés au fait d'arriver en retard ou en avance par rapport à l'horaire d'arrivée souhaité.

En pratique, la durée d'un acheminement est variable selon les conditions de circulation durant le trajet. Il en résulte (par référence à la situation 1) que, même si on prend une marge de précaution (au sens de l'anticipation de l'heure de départ de la marchandise ou de prévision d'un temps de trajet plus long que la moyenne/médiane), il subsiste néanmoins un risque d'arriver en retard illustré par la situation 2. Ceci nous conduit à étudier le problème d'une façon dynamique, c'est-à-dire en combinant les situations 1 et 2 grâce à une distribution statistique des durées de trajet qui a été observée dans les traitements statistiques de la section 2.

Figure 12 : Distribution du temps d'acheminement des marchandises



Soit un trajet de durée médiane D_M et supposons que les temps d'arrivée à destination suivent une loi de distribution statistique asymétrique quelconque (Cf. Figure 12 et distributions des durées de trajet mises en évidence dans la section 2). Soient respectivement D_a et D_r les durées éventuelles d'arrivées en avance et en retard. Ces durées D_a et D_r ont respectivement des probabilités d'occurrence cumulées F qui est la probabilité de ne pas arriver en retard et $(1-F)$, la probabilité d'arriver en retard. L'espérance mathématique associée au temps d'avance est FD_a et celle associée au retard est $(1-F)D_r$.

Ainsi, on peut exprimer le coût total du temps consacré à l'acheminement d'une marchandise selon ce modèle :

$$C_{tot} = (C_t - C_0)D_M + \underbrace{(C_a - C_0)FD_a}_{\text{Terme lié à l'avance}} + \underbrace{(C_t - C_0)(1-F)D_r}_{\text{Terme lié au retard}} \quad (1)$$

Ce modèle tente de traduire l'arbitrage qu'opère le chargeur/transporteur entre les durées éventuelles d'arrivée en avance ou d'arrivée en retard, et la durée de trajet médiane, moyennant une différenciation des coûts unitaires associés à chacune des activités (origine, trajet, destination).

A partir de ce modèle dédié à la valorisation du temps de transport de fret prenant en compte la variabilité des durées de trajet, la suite de l'analyse consiste à :

- . étudier comment minimiser la fonction du coût total de temps alloué au trajet ;
- . évaluer les conséquences sur le calcul économique.

3.2. ANALYSE DU MODÈLE : DÉTERMINATION DE LA MARGE DE PRÉCAUTION OPTIMALE

Supposons que la répartition des temps de transport pour un trajet donné suit une certaine loi de distribution bornée à droite et à gauche. En général (Figure 13), une loi de distribution peut être caractérisée par une durée de trajet médiane (D_M), un écart type (σ), une durée de trajet minimale (D_{min}) et une durée de trajet maximale (D_{max}). On suppose que l'opérateur de transport connaît la durée de trajet médiane D_M et qu'il prend une marge de précaution M positive pour faire arriver la marchandise à l'heure souhaitée T_s de façon à minimiser la part du temps de retard qui coûte plus cher que le temps d'avance.

Du fait de l'irrégularité des trajets, on peut en effet considérer que l'opérateur de transport rajoute systématiquement au temps médian, un temps de sécurité lié au risque de retard qu'on désignera par la marge de précaution. Le temps d'acheminement « vendu » par le transporteur au chargeur est ainsi systématiquement supérieur au temps médian. En effet, on considère que le temps d'acheminement d'une marchandise est déterminé par le transporteur qui s'engage auprès du chargeur (son client) pour le bon respect des horaires d'arrivée convenues entre les deux parties.

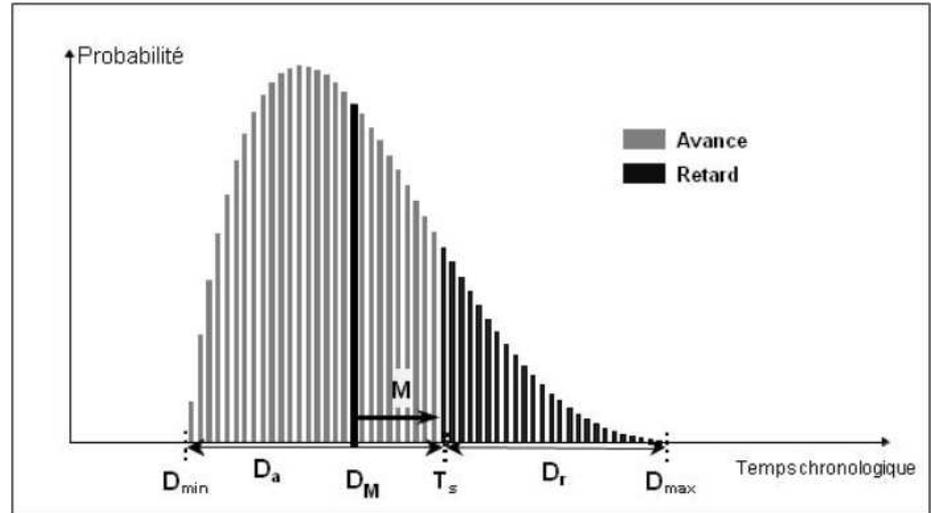
Soit M la marge de précaution prise en compte.

On peut noter, conformément à la Figure 13, que la marge de précaution M est comprise entre 0 et $(D_{max} - D_M)$, et pour ces valeurs extrêmes de M les probabilités cumulées F sont respectivement $\frac{1}{2}$ et 1. Par ailleurs, la probabilité cumulée de ne pas arriver en retard est, par construction, est une fonction bijective de la marge de précaution, $F=f(M)$.

Les durées d'avance et de retard peuvent alors être ré-exprimées en fonction de la marge de précaution de sorte que :

$$D_a = D_M + M - D_{min} \quad \text{et} \quad D_r = D_{max} - D_M - M.$$

Figure 13 : Distribution du temps d'acheminement et introduction d'une marge de précaution



L'expression (1) du coût total du temps consacré au transport de marchandises peut alors s'écrire :

$$C_{tot} = (C_t - C_o)D_M + (C_a - C_o)F(D_M + M - D_{min}) + (C_d - C_t)(1 - F)(D_{max} - D_M - M) \quad (2)$$

A partir de ce modèle on peut déterminer la marge de précaution optimale qui minimise le coût total de temps de transport.

Détermination de la marge optimale

Tout d'abord, on pose les paramètres α_i indépendants des variables F et M :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (2C_t - (C_o + C_d)) D_M + (C_d - C_t) D_{max} \\ \alpha_2 &= (D_{max} - D_M)(C_t - C_d) + (D_M - D_{min})(C_a - C_o) \\ \alpha_3 &= (C_t - C_d) \\ \alpha_4 &= C_a - C_o + C_d - C_t \end{aligned} \quad (3)$$

de sorte que l'équation (2) s'écrive :

$$C_{tot} = \alpha_1 + \alpha_2 F + \alpha_3 M + \alpha_4 FM.$$

Pour obtenir la marge optimale, notée M_o , on doit résoudre cette équation :

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial M} = 0 \text{ avec } F = f(M).$$

Ce qui revient à trouver M_o tel que :

$$\alpha_2 F'(M_o) + \alpha_3 + \alpha_4 F(M_o) + \alpha_4 M_o F'(M_o) = 0$$

Si on pose $x = M_o$, $y = F(M_o)$ et $y' = F'(M_o)$, on obtient l'expression d'une équation différentielle de type linéaire à coefficients variables :

$$\alpha_2 y' + \alpha_4 y + \alpha_4 y' x + \alpha_3 = 0 \quad (4)$$

Après développements (la résolution de l'équation différentielle (4) est présentée dans l'Annexe 1), on aboutit à la solution suivante :

$$y = \frac{K - (\alpha_2 + \alpha_4 x)\alpha_3}{\alpha_4(\alpha_2 + \alpha_4 x)} \text{ où } K \text{ est une constante.}$$

La condition initiale fixant la marge maximale à $(D_{\max} - D_M)$ et dont la probabilité cumulée vaut 1 nous permet de fixer la constante d'intégration. La solution peut alors s'écrire :

$$F(M_o) = \frac{(\alpha_3 + \alpha_4)(\alpha_4(D_{\max} - D_M) + \alpha_2)}{\alpha_4(\alpha_2 + \alpha_4 M_o)} - \frac{\alpha_3}{\alpha_4}$$

On déduit alors l'expression suivante de la marge optimale :

$$M_o = \frac{\alpha_2(1 - F_o) + (\alpha_3 + \alpha_4)(D_{\max} - D_M)}{\alpha_4 F_o + \alpha_3}$$

où F_o désigne la probabilité cumulée relative à la marge optimale M_o .

En substituant les α_i par leurs expressions données par les équations (3), la marge optimale s'écrit :

$$M_o = \frac{[(D_{\max} - D_M)(C_t - C_d) + (D_M - D_{\min})(C_a - C_o)](1 - F_o) + (C_a - C_o)(D_{\max} - D_M)}{(C_a - C_o + C_d - C_t)F_o + (C_t - C_d)} \quad (5)$$

L'expression de la marge optimale dépend :

- **des caractéristiques du trajet** définies par la distribution des durées de trajet (durées minimale, médiane et maximale)
- **des caractéristiques de la marchandise** à acheminer (sa nature, sa priorité d'acheminement...) à travers les coûts unitaires
- **de la probabilité de ne pas arriver en retard** que peut se fixer le client selon ses exigences en matière d'acheminement de sa marchandise.

Donc si on connaît l'ensemble de ces paramètres on peut prévoir une marge optimale d'acheminement pour un trajet donné et un type de marchandise.

D'un point de vue pratique, on peut imaginer que l'opérateur de transport ferroviaire détermine et « vend » un temps d'acheminement d'une marchandise après avoir pris connaissance des exigences du client (priorité d'acheminement, probabilité de ne pas arriver en retard...), fixe l'itinéraire (caractéristiques du trajet en terme de temps de parcours et de sa variabilité) et le prix de transport de la marchandise. Le temps de trajet que devrait vendre l'opérateur de transport est donc le temps médian auquel est ajoutée la marge de précaution optimale qui pourrait être déterminée.

On peut noter que dans le cas du transport ferroviaire, l'anticipation de l'horaire de départ n'est pas envisageable vu que les horaires des trains sont planifiés en avance. Ainsi, supposons le cas où un client désire recevoir une marchandise pour 10h00. Le transporteur peut de son côté lui proposer un train au départ à 8h00 qui arriverait à 10h. Or si la marge optimale calculée pour cet acheminement est de 30 mn, le transporteur proposera alors à son

client une livraison pour 10h30 (horaire que le client a le choix d'accepter ou non).

Introduisons à présent la notion de *degré de préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure*. Ce degré de préférence traduit l'importance que le client a de recevoir de manière fiable sa marchandise. Plus ce degré est élevé, plus nous dirons que cette marchandise a une forte priorité d'acheminement.

Nous supposons que le coût C_d (surcoût de temps lié à l'arrivée en retard) peut être un bon indicateur de ce degré de préférence. En effet, il est raisonnable de penser que plus la priorité est importante, plus le coût lié au retard devient grand. Notons que dans le cas du transport de voyageurs cet indicateur correspond au motif du déplacement.

Nous pouvons dès lors exprimer la marge optimale (5) en fonction de C_d :

$$M_0 = \frac{(D_{\max} - D_M)C_d(F_o - 1) + \lambda_1}{C_d(F_o - 1) + \lambda_2} \quad (6)$$

où λ_1 et λ_2 sont des constantes indépendantes de C_d :

$$\lambda_1 = C_t(D_{\max} - D_M)(1 - F_o) + (D_M - D_{\min})(C_a - C_o)(1 - F_o) + (C_a - C_o)(D_{\max} - D_M)$$

$$\lambda_2 = (C_a - C_o - C_t)F_o + C_t$$

Lorsque C_d devient très grand (reflétant un acheminement d'une marchandise avec une priorité importante d'arriver à l'heure), on en déduit à partir de l'expression (6) en faisant tendre C_d vers l'infini que la marge optimale est égale à la marge maximale donnée par $(D_{\max} - D_M)$. Ceci est bien conforme à l'intuition car pour une marchandise qui a une priorité importante d'arriver à l'heure, il est logique au transporteur de convenir avec son client une durée d'acheminement maximale supprimant ainsi toute éventualité d'arriver en retard.

3.3. CONSÉQUENCES DE LA PRISE EN COMPTE DE LA VARIABILITÉ DANS LE CALCUL ÉCONOMIQUE

Nous proposons d'étudier trois catégories de coûts de temps :

. Ω_0 le coût du temps d'acheminement *sans prise en compte de la variabilité* des temps de trajets, ce qui correspond à l'approche actuelle.

. Ω_1 le coût du temps d'acheminement *en considérant la variabilité mais sans prise en compte d'une marge de précaution*.

. Ω_2 le coût du temps d'acheminement *en considérant l'existence à la fois de la variabilité et la prise en compte d'une marge de précaution optimale*.

Soit Ω_0 le coût du temps d'acheminement sans prise en compte de la variabilité des temps de trajets. Ce coût a pour expression :

$$\Omega_0 = (C_t - C_o)D_M$$

Ce coût est positif puisque $C_t > C_o$ et $D_M > 0$.

Soit Ω_1 le coût du temps d'acheminement en considérant la variabilité des temps de trajet mais sans prise en compte d'une marge de précaution. Dans ce cas, la durée de trajet prévue est la durée médiane ($M=0$) et il y a donc autant de chances d'arriver en retard qu'en avance ($F=1/2$).

Ce coût peut s'écrire à partir de l'équation (2) comme :

$$\Omega_1 = \gamma C_d + \beta$$

$$\text{où } \gamma = \frac{1}{2}(D_{\max} - D_M)$$

$$\beta = (C_t - C_o)D_M + \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M)$$

Le paramètre γ représente la pente de la droite exprimant Ω_1 en fonction de C_d . Ce paramètre est positif puisque $D_{\max} > D_M$. Par conséquent, Ω_1 croît linéairement en fonction de C_d .

Nous déduisons aisément que lorsque C_d tend vers l'infini, Ω_1 tend également vers l'infini et que lorsque C_d tend vers 0, le coût Ω_1 tend vers β .

Soit Ω_2 le coût du temps d'acheminement en considérant l'existence de la variabilité des durées de transport et la prise en compte d'une marge de précaution optimale.

Ce coût est donné à partir de l'équation (2) par cette expression :

$$\Omega_2 = (C_t - C_o)D_M + (C_a - C_o)F_o(D_M + M_o - D_{\min}) + (C_d - C_t)(1 - F_o)(D_{\max} - D_M - M_o)$$

Ω_2 peut s'écrire selon cette expression :

$$\Omega_2 = \alpha_1 + \alpha_2 F_o + \alpha_3 M_o + \alpha_4 F_o M_o \quad (7)$$

Que devient Ω_2 lorsque C_d tend vers l'infini (forte priorité d'acheminement de la marchandise à l'heure) ? On a montré précédemment que pour des valeurs de C_d assez élevées, d'une part la marge optimale M_o tend vers la valeur $(D_{\max} - D_M)$, et d'autre part, la probabilité cumulée F_o correspondant à la marge optimale tend vers la valeur 1. En remplaçant, ces deux valeurs limites dans l'expression (7) on aboutit à la relation suivante :

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3(D_{\max} - D_M) + \alpha_4(D_{\max} - D_M) \\ &= (\alpha_1 + \alpha_2) + (\alpha_3 + \alpha_4)(D_{\max} - D_M) \end{aligned}$$

En substituant les α_i par leurs expressions respectives (3), on aboutit à cette formulation de Ω_2 pour des valeurs de C_d très grandes :

$$\Omega_2 = (C_a - C_o)(D_{\max} - D_{\min}) + (C_t - C_o)D_M$$

On remarque bien que Ω_2 est indépendant du paramètre C_d . Ainsi, sur un diagramme (Coût du temps, C_d), la valeur de cette expression représente l'ordonnée de la droite horizontale asymptote à la courbe exprimant le coût Ω_2 en fonction de C_d , quand ce dernier tend vers des valeurs assez élevées.

Quand C_d tend vers 0, la formulation du coût total du temps (2) devient :

$$\Omega_2 = (C_t - C_o)D_M + (C_a - C_o)F_o(D_M + M_o - D_{\min}) - C_t(1 - F_o)(D_{\max} - D_M - M_o)$$

Cette expression peut s'écrire :

$$\Omega_2 = (C_a - C_o)F_o M_o + C_t(1 - F_o)M_o + [(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) + C_t(D_{\max} - D_M)]F_o + \delta$$

avec δ constante indépendante de F_o et de M_o .

On peut remarquer à travers cette dernière expression que la minimisation de Ω_2 dans le cas où C_d tend vers 0 s'obtient par la marge nulle ($M_o=0$ et donc $F_o=1/2$). Ceci traduit le fait que pour des marchandises sans priorité d'arriver à l'heure, il n'est pas nécessaire de prendre de marge de précaution.

On en déduit dans ce cas (C_d au voisinage de 0) que Ω_2 tend vers une valeur égale à :

$$\Omega_2 = (C_t - C_o)D_M + \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M)$$

On peut démontrer (Cf. Annexe 2) que Ω_2 est une fonction croissante en vérifiant que la valeur de Ω_2 quand C_d tend vers 0 est inférieure à celle quand C_d tend vers des valeurs très élevées.

On constate aussi que quand C_d tend vers 0 on a $\Omega_1 = \Omega_2$, autrement dit pour l'acheminement d'une marchandise sans priorité d'arriver à l'heure, la prise en compte d'une marge de précaution optimale ou non n'a aucun effet sur le coût du temps de transport.

De même dans quelles conditions a-t-on $\Omega_1 = \Omega_2 > \Omega_0$ quand C_d tend vers 0 ?

$$(P_x - C_o)D_M + \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M) > (C_t - C_o)D_M$$

$$\Leftrightarrow (C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - C_t(D_{\max} - D_M) > 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{C_a - C_o}{C_t} > \frac{D_{\max} - D_M}{D_M - D_{\min}}$$

comme on a $(D_{\max} - D_M) > (D_M - D_{\min})$ puisque les distributions des durées de trajet sont asymétriques et plus étalées vers la droite de la médiane.

Alors la condition qui lie les coûts unitaires est :

$$C_a > C_o + C_t$$

En prenant en compte, les inégalités présentées dans le Tableau 4 ($C_o < C_t$ et $C_o < C_a$) on en déduit que: $C_t < C_a$ et que $2C_o < C_a$.

Ces deux inégalités traduisent le fait que, pour une même unité de temps, **le surcoût d'arrivée en avance d'une marchandise est plus important (ou plus pénalisant), d'une part, que le coût de son temps de transport et, d'autre part, plus que le double du coût de son temps d'immobilisation à l'origine.**

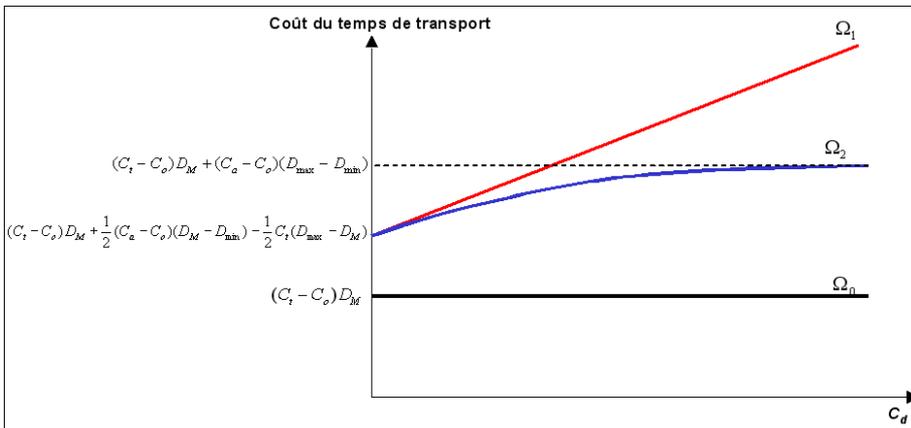
Dans le Tableau 5 sont récapitulés les résultats auxquels nous sommes parvenus. Ces résultats permettent ainsi de représenter graphiquement pour une loi de distribution quelconque des temps de trajet, la variation des coûts du temps Ω_0 , Ω_1 et Ω_2 en fonction de C_d (paramètre traduisant le degré de

préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure), suivant la Figure 14.

Tableau 5 : Évolution du coût du temps de transport en fonction du degré de préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure

	Quand C_d tend vers 0	Quand C_d tend vers des valeurs assez élevées	Type de variation du coût en fonction de C_d
Ω_0	$(C_t - C_o)D_M$	$(C_t - C_o)D_M$	Constante
Ω_1	$(C_t - C_o)D_M$ $+ \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min})$ $- \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M)$	$+\infty$	Croissante et linéaire
Ω_2	$(C_t - C_o)D_M$ $+ \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min})$ $- \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M)$	$(C_a - C_o)(D_{\max} - D_{\min})$ $+ (C_t - C_o)D_M$	Croissante tendant vers une asymptote

Figure 14 : Variation du coût du temps de transport en fonction du degré de préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure



La Figure 14 illustre les effets de la variabilité des durées d'acheminement sur le coût du temps, et permet d'énoncer les constats suivants qui sont valables quel que soit le type ou la forme de la loi de distribution des durées d'acheminement :

- Traditionnellement, le coût du temps consacré à l'acheminement des marchandises est sous-estimé dans les études d'évaluation puisqu'on considère uniquement Ω_0 au lieu de Ω_1 ou Ω_2 (avec prise en compte de la variabilité des temps de trajet). Cependant il convient de noter que ce coût du temps peut parfois être surestimé afin d'intégrer indirectement dans le calcul économi-

que d'autres facteurs non modélisables comme la variabilité du temps de transport ou les conditions de sécurité de la marchandise pendant son acheminement.

- Le coût du temps de transport avec variabilité des durées d'acheminement varie en fonction du niveau d'information des transporteurs/chargeurs ; les deux niveaux extrêmes sont :

- . sans information (marge nulle) : le coût est le plus élevé et est représenté par Ω_1 ;
- . avec information optimisée (marge optimale) : le coût est minimal et représenté par Ω_2 .

- Par rapport à l'exploitation du réseau ferroviaire et la gestion des conditions d'acheminement du fret, il ressort deux sources de gains possibles :

- . réduction de Ω_1 en minimisant la durée médiane et sa variabilité par les actions de gestion d'incidents et de régulation (attribution de sillons, efficacité des interventions, réduction de la durée de retour à la normale en cas d'incident...) ;
- . réduction de Ω_1 en prenant une marge de précaution qui sera ajoutée à la durée médiane ($\Omega_1 \rightarrow \Omega_2$).

4. CONCLUSION

La revue de la littérature et les pratiques actuelles d'évaluation ont mis en évidence la pertinence de notre problématique et l'originalité de notre démarche. En effet, l'analyse des pratiques actuelles en matière d'évaluation des projets ferroviaires montre que la fiabilité des temps de trajet n'est pas prise en compte dans les études d'évaluation de ces projets en France et dans les autres pays.

Les études analysées nous ont confortés dans la mise au point d'une fonction de coût attribuée au temps d'acheminement de la marchandise qui intègre la valeur de la fiabilité. Les différentes décompositions de la fonction de coût qui y sont présentées nous ont particulièrement éclairés sur les éléments liés à la fiabilité à intégrer à notre propre fonction de coût. En revanche, notre démarche est basée sur une approche microéconomique qui intègre le comportement des différents acteurs (chargeur/client, opérateur de transport) et tente ainsi de traduire l'effet de la variabilité des temps de transport sur ces acteurs. La fonction de coût que nous avons élaborée est composée de trois éléments à savoir : le coût lié à la durée médiane du trajet, le surcoût lié aux arrivées à l'avance et le surcoût lié aux retards par rapport à l'horaire convenu entre le transporteur et son client. De plus, différents entretiens auprès des différents acteurs du transport de fret ont permis d'alimenter notre démarche. En effet, ils nous ont permis d'ajuster notre point de vue sur l'organisation du transport de fret et de prendre conscience des réelles conséquences de la variabilité des temps de transport à la fois pour le

chargeur/client et pour l'opérateur de transport afin de les intégrer à notre modélisation.

Cette approche « comportementale » nous a permis d'introduire dans la fonction de coût la notion de marge de temps de précaution que l'opérateur de transport a la possibilité de prendre pour faire face aux aléas des durées de transport. L'approche microéconomique nous a permis de déterminer la marge optimale qui minimise le coût du temps de transport qui tient compte des caractéristiques du trajet (distribution des durées de trajet) et des caractéristiques de la marchandise (nature, priorité d'acheminement...). Ainsi, sur le plan pratique, la marge de précaution optimale peut être estimée avec notre modèle et rajoutée par le transporteur au temps médian qu'il connaît par ailleurs afin qu'il puisse vendre son service de transport avec la plus grande fiabilité possible à son client.

Sur le plan de l'évaluation économique, notre recherche montre en premier lieu que les coûts liés au temps d'acheminement de la marchandise sont sous-estimés du fait de la non prise en compte de la variabilité des temps de trajet. Nous démontrons également que le coût du temps de transport en considérant la variabilité croît en fonction du degré de préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure. En outre, nous montrons que le coût du temps qui intègre la variabilité peut être minimisé en introduisant une marge de précaution dans le temps global alloué à l'acheminement de la marchandise. En définitive, nous sommes parvenus à construire la courbe qui exprime le coût du temps minimal traduisant la prise en compte d'une marge de précaution optimale en fonction du degré de préférence du chargeur à recevoir sa marchandise à l'heure désirée.

Nous avons ensuite mis en évidence deux sources de gains possibles : l'une obtenue à partir de la réduction de la durée médiane et de la variabilité des temps de transport ; l'autre procurée par l'intégration d'une marge de précaution dans le temps global alloué à l'acheminement de la marchandise.

BIBLIOGRAPHIE

ALLEN W.B., MAHMOUD M.M., McNEIL D. (1985) The importance of time in transit and Reliability of transit time for shippers, receivers and carriers. **Transportation Research B**, Vol. 19, n° 5, pp. 447-456.

ARNOTT R., DE PALMA A., LINDSEY C.R. (1993) A structural model of peak period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand. **American Economic Review**, Vol. 83, n° 1, pp. 161-179.

BAUMOL W.J., VINOD H.D. (1970) An inventory theoretic model of freight transport demand. **Management Science**, Vol. 16, n° 7, pp. 413-421.

- BRUZELIUS N. (2001) **The valuation of logistics improvements in CBA of transport investments, a survey**. Report to the SAMGODS group, Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (SIKA), 49 p.
- BOUFFIOUX C., BEUTHE M., PAUWELS T. (2006) La qualité des services de transport de marchandises : une analyse agrégée des ordres de préférence déclarés. **Les Cahiers Scientifiques du Transport**, n° 50, pp. 135-158.
- DE JONG G., KROES E., PLASMEIJER R., SANDERS P., WARFFEMIUS P. (2004) **The Value of Reliability**. Ministry of Transport, Netherlands, 18 p.
- CONFÉRENCE EUROPÉENNE DES MINISTRES DES TRANSPORTS (2005) **Le Temps et les Transports**. Rapport de la 127ème table ronde d'Economie des Transports, 130 p.
- DANIELIS R, ROTARIS L. (2002) Shipper's preferences for freight transport services: a conjoint analysis experiment for an Italian region. **Trasporti Europei**, Vol. 22, pp. 27-35.
- FOWKES A.S., FIRMIN P.E., WHITEING A.E., TWEDDLE, G. (2001) Freight road user valuations of three different aspects of delay. Proceedings of **the European Transport Conference**, Cambridge, UK, 14 p.
- SAVY M. (2006) **Le transport de marchandises**. Éditions Eyrolles, 372 p.
- SAVY M. (2009) Freight: quality of service as a key issue for freight transport. **Innovative Perspectives of Transport and Logistics**, Gdansk, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdanskiego. pp. 257-267.
- SMALL K., NOLAND R., CHU X., LEWIS D. (1999) **Valuation of Travel-Time Savings and Predictability in Congested Conditions for Highway User-Cost Estimation**. Washington DC, Rapport 431, National Cooperative Highway Research Program, 80 p.
- PREDIT (2005) **Qualiffer : Qualité et Amélioration de la logistique à travers l'Innovation dans le Fret Ferroviaire**. Rapport intermédiaire, Paris, 39 p.
- UNIVERSITÉ PARIS 12 (2007) **La valeur de la fiabilité dans le transport ferroviaire de marchandises**. PREDIT, DGMT/RFF/SNCF, 159 p.
- VELLAY C., DE JONG G., HOUÉE M. (2001) A Joint SP/RP Model of Freight Shipments from the Region Nord-Pas de Calais. Paper presented at the **European Transport Conference**, 23 p.
- VICKREY W.S. (1969) Congestion Theory and Transport Investment. **American Economic Review**. Vol. 59, pp. 251-260.
- WIGAN M., ROCKCLIFFE N., THORESEN T., TSOLAKIS D. (2000) Valuing long-haul and metropolitan freight travel time and reliability. **Journal of Transportation and Statistics**, Vol. 3.3, pp. 83-89.

ZERGUINI S. (1998) Variabilité des temps de parcours et incertitude des usagers sur le temps de déplacement—Proposition d'une approche de prise en compte dans l'évaluation socio-économique. **Congrès international francophone de l'ATEC**, Vincennes. Actes publiés sous forme d'ouvrage aux presses des l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 216-224.

ZERGUINI S. (1998) **Contribution à l'analyse économique de l'exploitation de la route**. Université de Paris XII, Thèse de Doctorat, 253 p.

ANNEXES

ANNEXE 1

Résolution de l'équation différentielle (4) : $\alpha_2 y' + \alpha_4 y + \alpha_4 y' x + \alpha_3 = 0$

On peut la réécrire sous la forme d'une équation à variables séparées :

$$(\alpha_2 + \alpha_4 x) y' + \alpha_4 y + \alpha_3 = 0$$

$$y' = \frac{-\alpha_4 y - \alpha_3}{\alpha_2 + \alpha_4 x}$$

$$y' = \frac{1}{\alpha_2 + \alpha_4 x} (-\alpha_4 y - \alpha_3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\alpha_2 + \alpha_4 x} (-\alpha_4 y - \alpha_3)$$

$$\frac{dy}{(-\alpha_4 y - \alpha_3)} = \frac{dx}{\alpha_2 + \alpha_4 x}$$

$$\int \frac{dy}{(-\alpha_4 y - \alpha_3)} = \int \frac{dx}{\alpha_2 + \alpha_4 x} + \text{Constante}$$

$$-\frac{1}{\alpha_4} \ln|\alpha_4 y + \alpha_3| = \frac{1}{\alpha_4} \ln|\alpha_4 x + \alpha_2| + \text{Constante}$$

$$\frac{1}{|\alpha_4 y + \alpha_3|} = K |\alpha_4 x + \alpha_2| \quad \text{avec } K \in \mathfrak{R}$$

$$(\alpha_4 x + \alpha_2)(\alpha_4 y + \alpha_3) = K$$

$$(\alpha_4 x + \alpha_2)\alpha_4 y + (\alpha_4 x + \alpha_2)\alpha_3 = K$$

$$y = \frac{K - (\alpha_4 x + \alpha_2)\alpha_3}{(\alpha_4 x + \alpha_2)\alpha_4}$$

ANNEXE 2

Vérification que la valeur de Ω_2 quand C_d tend vers 0 est inférieure à celle quand C_d tend vers des valeurs très élevées.

Cette inégalité a pour expression :

$$\begin{aligned}
& (C_t - C_o)D_M + \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M) < (C_a - C_o)(D_{\max} - D_{\min}) + (C_t - C_o)D_M \\
\Leftrightarrow & \frac{1}{2}(C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - \frac{1}{2}C_t(D_{\max} - D_M) < (C_a - C_o)(D_{\max} - D_{\min}) \\
\Leftrightarrow & (C_a - C_o)(D_M - D_{\min}) - C_t(D_{\max} - D_M) < 2(C_a - C_o)(D_{\max} - D_{\min}) \\
\Leftrightarrow & (C_a - C_o)D_M - (C_a - C_o)D_{\min} - C_t(D_{\max} - D_M) < 2(C_a - C_o)D_{\max} - 2(C_a - C_o)D_{\min} \\
\Leftrightarrow & (C_a - C_o)D_M + (C_a - C_o)D_{\min} - C_t(D_{\max} - D_M) < 2(C_a - C_o)D_{\max} \\
\Leftrightarrow & (C_a - C_o)(D_M + D_{\min} - 2D_{\max}) - C_t(D_{\max} - D_M) < 0 \\
\Leftrightarrow & \underbrace{-(C_a - C_o)}_{>0} \underbrace{(-D_M - D_{\min} + 2D_{\max})}_{>0} - \underbrace{C_t}_{>0} \underbrace{(D_{\max} - D_M)}_{>0} < 0
\end{aligned}$$