

Louvain School of Management

Élasticités de coût et choix modal dans le transport de fret : une analyse économétrique appliquée

Auteur : **Noah CECI**

Promoteur : **Prof. Bart JOURQUIN**

Année académique 2025–2026

Master [120] en Ingénieur de gestion, à finalité spécialisée

Majeure Transportation Management (Mons) and Supply Chain (LLN)

DECLARATION

La déclaration ci-dessous est **obligatoire et doit apparaître à la première page (après la couverture) de votre TFE**

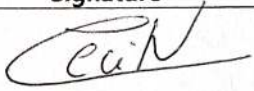
DECLARATION D'UTILISATION D'IA GÉNÉRATIVE

Confirmez soit les quatre premières déclarations, soit, le cas échéant, la dernière :

Déclarations relatives à l'usage responsable de l'IA générative	Réponse
Le contenu de mon/notre TFE est mon/notre production originale, même si j'ai/nous avons utilisé l'IA générative pour m'/nous aider à le préparer.	☒ oui ☐ non
Je/nous maîtrise/maîtrisons les théories, outils et méthodes que j'utilise/nous utilisons pour le mémoire.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons vérifié que le contenu présenté dans le mémoire est exact et valide, et qu'il ne contient ni hallucination, ni fausse référence, etc.	☒ oui ☐ non
J'atteste/nous attestons maîtriser le résultat final et être capable(s) de l'expliquer et de répondre aux questions à son sujet.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons pris toutes les mesures nécessaires afin de ne pas donner accès à des informations ou données confidentielles à des outils d'IA générative	☐ oui ☒ non

SIGNATURE

Signez votre déclaration

Auteur Nom de famille, prénom(s)	Date	Signature
1 CECI Noah	26-05-26	

NOTE

Dans le cadre de la préparation de ce mémoire de master, l'auteur a utilisé les outils d'IA suivants :

1. Claude (Anthropic) aux fins suivantes :
 - Optimisation et assistance sur les codes Python : Claude a été utilisé pour assister au développement, au débogage et à l'optimisation des scripts Python utilisés pour l'estimation du modèle et le calcul des élasticités.
 - Mise en forme LaTeX : Claude a été utilisé pour convertir le manuscrit en un document LaTeX structuré, améliorant la présentation générale des tableaux, des équations et la mise en page du mémoire.
2. ChatGPT (OpenAI) aux fins suivantes :
 - Relecture et reformulation : ChatGPT a été utilisé pour relire certaines sections et proposer des reformulations afin d'améliorer la clarté et la lisibilité, tout en préservant les idées et arguments originaux de l'auteur.

Résumé

Ce mémoire analyse les élasticités de coût du transport de fret en Europe à travers une comparaison méthodologique entre deux niveaux d'agrégation géographique : le niveau NUTS 2 européen et le niveau NUTS 3 allemand. À partir de données origine-destination couvrant dix groupes de marchandises et trois modes de transport (route, voie navigable, chemin de fer), un modèle logit multinomial à coûts généralisés est ensuite estimé via Biogeme. Les élasticités directes et croisées sont par la suite calculées selon deux approches complémentaires : l'élasticité-point et l'élasticité-arc (+10 %). Au niveau NUTS 2, les résultats sont robustes pour six groupes sur dix, acceptables pour trois groupes supplémentaires, et non exploitables pour le groupe 8 (produits chimiques) en raison d'un problème d'identification de θ_{time} . Les élasticités directes sont toutes négatives, variant de -0,19 pour les produits pétroliers à -9,54 pour les minerais et ferrailles, et les élasticités croisées confirment une substituabilité significative entre modes. Au niveau NUTS 3, la quasi-colinéarité entre coût et durée dans les données simulées empêche l'identification correcte de la valeur du temps pour sept groupes sur dix, rendant les résultats inexploitable pour ces groupes. Seuls les combustibles solides, les minerais et les engrais fournissent des estimations fiables à ce niveau de désagrégation. La comparaison entre niveaux confirme que les élasticités sont sensibles à l'échelle d'analyse et souligne la nécessité d'une calibration adaptée au contexte local plutôt qu'au recours à des paramètres agrégés.

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à mon promoteur, Monsieur Bart Jourquin, professeur à l'UCLouvain FUCaM Mons, pour son accompagnement tout au long de ce projet. Je le remercie tout particulièrement pour la mise à disposition des données, ainsi que pour ses remarques pertinentes, sa disponibilité, la rapidité de ses réponses et son expertise, qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire avec rigueur et confiance.

Je tiens également à remercier l'ensemble des professeurs de l'UCLouvain FUCaM Mons que j'ai eu l'occasion de rencontrer au cours de ces années d'études. Leurs enseignements m'ont permis d'enrichir progressivement mes connaissances en gestion, de développer ma réflexion analytique et de gagner en confiance, contribuant ainsi directement à la réalisation de ce travail.

Je remercie enfin mes amis pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence tout au long de ce projet.

Pour conclure, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers ma famille pour son soutien constant, ses conseils et sa présence. Leur aide, notamment dans les différentes étapes de relecture, m'a été particulièrement précieuse.

Table des matières

Liste des abréviations	1
Table des figures	3
Liste des tableaux	4
Liste des annexes	5
Introduction générale	6
1 Cadre théorique et conceptuel du transport de fret	7
1.1 Introduction	7
1.2 Le transport de fret : définitions, fonctions et rôle économique	7
1.3 Les coûts du transport de fret	8
1.4 L'élasticité en économie des transports	9
1.4.1 Élasticité-point et limites de l'élasticité-arc	10
1.5 Revue de la littérature scientifique	11
1.5.1 Études européennes et internationales	11
1.5.2 Études de référence sur l'effet du niveau d'agrégation dans le transport de fret	12
1.6 Enjeux méthodologiques de l'estimation des élasticités	13
1.6.1 Le problème de colinéarité entre coût et durée	13
1.6.2 Sensibilité des résultats aux formes fonctionnelles	14
1.6.3 Sensibilité aux niveaux d'agrégation et à la structure des données	14
1.6.4 La structure fractionnée des données de fret	14
1.7 Conclusion	14
2 Méthodologie et cadre analytique	15
2.1 Introduction	15
2.2 Données	15
2.2.1 Source et structure	15
2.2.2 Analyse descriptive et identification des valeurs aberrantes	16
2.3 Première spécification : modèle logit avec transformation Box-Cox	17
2.3.1 Présentation du modèle	17
2.3.2 Estimation des lambdas par shotgun hill climbing	18
2.3.3 Difficultés rencontrées	18
2.4 Révision de la spécification : modèle à coûts généralisés	19
2.4.1 Motivation	19

2.4.2	Spécification du modèle	20
2.4.3	Log-vraisemblance adaptée : MNL with counts	20
2.4.4	Disponibilité des modes	21
2.5	Résultats de validation sur données NUTS 2	21
2.6	Conclusion	22
3	Estimation des paramètres du modèle à coûts généralisés	23
3.1	Introduction	23
3.2	Résultats sur données NUTS 2 Europe	23
3.2.1	Paramètres estimés	23
3.2.2	Intervalles de confiance et précision des estimations	25
3.2.3	Évaluation de la fiabilité par groupe	26
3.2.4	Analyse économique des résultats NUTS 2	27
3.3	Résultats sur données NUTS 3 Allemagne	28
3.3.1	Paramètres estimés	28
3.3.2	Analyse des résultats NUTS 3	28
3.4	Analyse comparative NUTS 2 Europe vs NUTS 3 Allemagne	30
3.4.1	Tableau comparatif des paramètres clés	30
3.4.2	Effet du niveau d'agrégation sur β_{GC}	30
3.4.3	Effet du niveau d'agrégation sur θ_{time}	30
3.4.4	Interprétation économique	30
3.5	Conclusion	31
4	Résultats et analyse comparative de l'élasticité du coût	32
4.1	Introduction	32
4.2	Élasticités NUTS 2 : résultats et interprétation	32
4.2.1	Élasticités directes	32
4.2.2	Convergence entre élasticité-point et élasticité-arc	34
4.2.3	Élasticités croisées	34
4.3	Élasticités NUTS 3 : résultats, fiabilité et limites	35
4.3.1	Problème d'identification de θ_{time} sur données NUTS 3	35
4.3.2	Résultats consolidés NUTS 3	36
4.3.3	Analyse des groupes fiables (2, 4, 7)	36
4.3.4	Analyse des groupes avec θ_{time} aberrant	37
4.4	Synthèse comparative et enseignements méthodologiques	37
4.4.1	Comparaison NUTS 2 vs NUTS 3	37
4.4.2	Synthèse de fiabilité et recommandations	38
4.4.3	Enseignements méthodologiques	39
4.5	Conclusion	40

5	Limites et recommandations	41
5.1	Introduction	41
5.2	Limites méthodologiques	41
5.2.1	Colinéarité structurelle entre coût et durée	41
5.2.2	Spécification du modèle nul	41
5.2.3	Choix méthodologiques propres à ce travail	41
5.3	Limites liées aux données	42
5.3.1	Périmètre géographique asymétrique	42
5.3.2	Absence de modes complémentaires	43
5.4	Recommandations pour les recherches futures	43
5.4.1	Imposer une valeur du temps exogène	43
5.4.2	Étendre l'analyse à d'autres pays NUTS 3	43
5.4.3	Explorer des spécifications alternatives	43
5.4.4	Utiliser des versions récentes de Biogeme	44
5.5	Conclusion	44
	Conclusion générale	45
	Bibliographie	46
	Annexes	48

Liste des abréviations

Abréviations liées aux données et géographie

NUTS 2	Nomenclature of Territorial Units for Statistics – niveau 2
NUTS 3	Nomenclature of Territorial Units for Statistics – niveau 3
OD	Origine-Destination
pp	Points de pourcentage

Abréviations liées aux modèles et économétrie

MNL	Multinomial Logit
MNL with counts	Modèle logit multinomial adapté aux données de comptage
ASC	Alternative Specific Constant (constante spécifique à un mode)
GC	Generalized Cost (coût généralisé)
β_{GC}	Coefficient associé au coût généralisé
θ_{time}	Valeur du temps (coefficient de la durée dans le coût généralisé)
BC	Box-Cox (transformation)
λ	Paramètre de transformation Box-Cox
LL	Log-vraisemblance
LL₀	Log-vraisemblance nulle (modèle nul)
P_i	Probabilité du mode i
V_i	Utilité du mode i
ρ^2	Pseudo- R^2 de McFadden
$\bar{\rho}^2$	Pseudo- R^2 de McFadden ajusté
L-BFGS-B	Algorithme d'optimisation à mémoire limitée (<i>Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bounds</i>)

Abréviations liées aux élasticités

E_{ii}	Élasticité directe
E_{ij}	Élasticité croisée
Pt	Élasticité-point
Arc	Élasticité-arc

Abréviations liées aux variables

Q_i	Quantité transportée par le mode i
C_i	Coût unitaire du mode i
cost_{i}	Coût monétaire du mode i
duration_{i}	Durée de transport du mode i
dur_{i}	Durée de transport du mode i (forme abrégée)
length_{i}	Distance du trajet pour le mode i
qty	Quantité transportée (variable dans le modèle)
avail_{i}	Disponibilité du mode i

Abréviations transport

IVN	Inland Waterways Navigation (voies navigables intérieures)
------------	--

Autres

NST/R	Nomenclature Statistique des marchandises pour les Transports, version Révisée (Eurostat)
Std. Err.	Erreur standard
IC	Intervalle de confiance à 95%
$ t $	Valeur absolue de la t-statistique

Table des figures

1	Corrélation coût/durée - groupe 4 (données NUTS 2)	17
---	--	----

Note : les graphiques présents en annexe ne sont pas répertoriés ici mais dans la liste des annexes (p. 5)

Liste des tableaux

1	Groupes de marchandises selon la nomenclature NST/R	16
2	Résultats de l'estimation du modèle à coûts généralisés - données NUTS 2 Europe	24
3	Indicateurs de qualité d'ajustement - données NUTS 2 Europe	24
4	Intervalle de confiance à 95 % pour β_{GC} - données NUTS 2 Europe	25
5	Parts modales observées vs prédites - données NUTS 2 Europe	27
6	Résultats de l'estimation du modèle à coûts généralisés - données NUTS 3 Allemagne	28
7	Indicateurs de qualité d'ajustement - données NUTS 3 Allemagne	28
8	Comparaison des paramètres β_{GC} et θ_{time} entre niveaux NUTS 2 et NUTS 3	30
9	Élasticité directe NUTS 2	33
10	Élasticité croisée NUTS 2	35
11	Élasticité directe NUTS 3 (méthodes point/arc, +10 %)	36
12	Synthèse de fiabilité des résultats par groupe et niveau d'agrégation	38

Liste des annexes

• Annexe A Émissions de gaz à effet de serre en Europe	48
• Annexe B Répartition modale du transport de fret en Europe	48
• Annexe C Analyse descriptive des données	48
• C.0 Étapes de nettoyage des données	49
• C.1 Statistique descriptive (NUTS 2)	51
• C.2 Statistique descriptive (NUTS 3)	52
• Annexe D Corrélations coût/durée	53
• D.0 Explication	53
• D.1 Nuage de points NUTS 2 (pour les groupes 2, 4, 8)	55
• D.2 Nuage de points NUTS 3 (pour les groupes 2, 4, 8)	56
• D.3 Comparaison NUTS 2 vs NUTS 3	56
• Annexe E Code Python	57
• E.0 ComputeElasticities_GC.py	57
• E.1 SolveGeneralizedCost_NUTS 2.py	68
• E.2 SolveGeneralizedCost_NUTS 3.py	77
• E.3 GridSearch_BoxCox_Lambdas.py	85
• E.4 SolveIntegratedModel_NUTS 3.py	94

Introduction générale

Le transport de fret constitue l'épine dorsale des économies modernes. En Europe, il représente une composante essentielle du produit intérieur brut et conditionne directement la compétitivité des entreprises et la fluidité des échanges commerciaux. Pourtant, ce secteur est également l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre du continent, en raison de la prédominance constante du mode routier. Dans ce contexte, comprendre comment les chargeurs réagissent aux variations de coût des différents modes de transport (route, rail et voies navigables intérieurs) constitue un enjeu à la fois académique et politique. C'est l'objet de l'élasticité de coût : mesurer la sensibilité de la demande de transport à une variation du prix d'un mode donné, et quantifier dans quelle mesure cette variation peut entraîner un report vers des alternatives. Ces indicateurs sont au cœur des analyses économiques du transport de fret et alimentent directement les décisions de politique tarifaire, de taxation environnementale ou d'investissement en infrastructure.

Or, si ces élasticités font l'objet d'une littérature relativement importante pour le transport de passagers, leur estimation dans le fret multimodal reste nettement plus délicate. La complexité des chaînes logistiques, l'hétérogénéité des marchandises et la difficulté d'accès à des données désagrégées en font un terrain de recherche encore largement ouvert. À cela s'ajoute une question méthodologique, peu explorée dans la littérature : dans quelle mesure les élasticités estimées sont-elles sensibles au niveau d'agrégation géographique des données ?

C'est cette question qui structure le présent mémoire. En comparant deux niveaux d'analyse, le niveau NUTS 2 à l'échelle européenne et le niveau NUTS 3 à l'échelle allemande, ce travail cherche à évaluer si les élasticités de coût varient selon l'échelle d'observation. Pour ce faire, un modèle logit multinomial à coûts généralisés est estimé sur des données origine-destination, pour dix groupes de marchandises. Les élasticités directes et croisées sont ensuite calculées selon deux méthodes : l'élasticité-point et l'élasticité-arc.

Le mémoire s'articule en cinq chapitres. Le chapitre 1 pose le cadre théorique et conceptuel. Le chapitre 2 présente la démarche méthodologique. Le chapitre 3 expose et compare les paramètres estimés aux deux niveaux géographiques. Le chapitre 4 calcule et analyse les élasticités directes et croisées. Le chapitre 5 liste les limites et recommandations liées à ce mémoire.

Chapitre 1

Cadre théorique et conceptuel du transport de fret

1.1 Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les fondations théoriques nécessaires à la compréhension du calcul des élasticités du coût dans le transport de fret. Il s'agit d'abord de définir ce que recouvre le transport de marchandises, d'en présenter les principaux modes et leurs caractéristiques, avant d'examiner la nature et la structure de leurs coûts.

Ensuite, la notion d'élasticité, centrale dans les analyses économiques du transport, sera introduite et replacée dans la littérature scientifique existante.

Enfin, une revue des études antérieures, tant européennes que nationales, permettra de situer le présent travail dans son contexte académique. Ce mémoire se concentre sur une comparaison méthodologique entre deux niveaux d'agrégation géographique (NUTS 2 européen et NUTS 3 allemand) afin d'évaluer la mesure dans laquelle les élasticités de coût du transport de fret sont sensibles à l'échelle d'analyse.

1.2 Le transport de fret : définitions, fonctions et rôle économique

Le transport se définit comme l'« action ou manière de transporter, de porter d'un lieu à un autre » (Larousse, s. d.), tandis que le fret correspond à la « cargaison (d'un navire) ou au chargement (d'un avion, d'un camion) » (Le Robert, s. d.). À partir de ces deux définitions, le transport de fret peut être compris comme l'ensemble des opérations visant au déplacement de biens matériels susceptibles de faire l'objet d'échanges commerciaux, depuis un point d'origine jusqu'à un point de destination.

Il constitue un maillon essentiel des chaînes logistiques et de valeurs, en conditionnant à la fois la compétitivité des entreprises et la fluidité des échanges commerciaux.

En Europe, le secteur du transport de marchandises occupe une place centrale dans l'économie, représentant une part importante du produit intérieur brut et de l'emploi (European Commission, 2025). Toutefois, il constitue également une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier en raison de la prédominance du transport routier (voir Annexe A pour les graphiques d'émissions de gaz à effet de serre en Europe).

Le cas de l'Allemagne, étudié dans ce mémoire au niveau NUTS 3, illustre pleinement ces enjeux. En tant que première économie de l'Union européenne, le pays se situe au cœur des flux logistiques continentaux et concentre d'importants volumes de transit, notamment le long du corridor Rhin-Alpin, l'un des axes de fret les plus structurants en Europe. De plus, l'Allemagne bénéficie d'un réseau fluvial particulièrement performant, dominé par le Rhin, qui concentre une part importante du transport fluvial européen (Commission centrale pour la navigation du Rhin, 2025).

Trois modes dominent le transport intérieur de marchandises dans l'espace européen : le routier, le ferroviaire et le fluvial (voir Annexe B pour la répartition modale du transport de fret en Europe).

- Le transport routier est de loin le plus utilisé. Sa flexibilité, sa rapidité d'exécution et sa capacité à assurer des livraisons porte-à-porte en font le mode privilégié pour la majorité des flux domestiques.
- Le transport ferroviaire se distingue par sa capacité à déplacer de grandes quantités sur de longues distances, notamment pour des produits lourds ou en vrac (charbon, acier, produits chimiques).
- Le transport fluvial joue un rôle important grâce au réseau dense de voies navigables en Europe du Nord-Ouest. Il constitue une alternative durable, bien que souvent limitée par la nécessité d'un pré- et post-acheminement routier.

Cette répartition modale, et en particulier la forte dépendance à la route, pose des enjeux stratégiques en matière de transition énergétique et de politique de report modal, thèmes intimement liés à la question du coût et de la sensibilité des chargeurs à celui-ci.

1.3 Les coûts du transport de fret

L'étude des coûts de transport constitue un préalable à toute analyse d'élasticité. Les coûts peuvent être classés selon deux grandes catégories : les coûts directs et les coûts externes ou indirects.

Les coûts directs sont ceux supportés par les transporteurs eux-mêmes : carburant, salaires des conducteurs, entretien et amortissement du matériel, péages, taxes et frais administratifs. Ils varient fortement selon le mode :

- pour le routier, le carburant et la main-d'œuvre représentent la majorité des dépenses ;
- pour le ferroviaire, les coûts fixes (infrastructures, matériel roulant) sont prépondérants ;
- pour le fluvial, les coûts unitaires sont faibles sur de longues distances mais sensibles aux conditions hydrologiques et à la taille des convois.

Les coûts externes correspondent aux impacts du transport qui ne sont pas directement pris en charge par les acteurs du secteur, tels que la pollution de l'air, le bruit, les accidents, la congestion ou encore l'usure des infrastructures. Bien qu'ils ne soient pas supportés directement par les transporteurs, ces coûts jouent un rôle déterminant dans l'élaboration des politiques publiques, notamment à travers la mise en place de taxes ou de réglementations environnementales.

Par ailleurs, la structure des coûts influence fortement le choix modal des chargeurs : toute variation du coût d'un mode de transport est susceptible d'entraîner un report vers une alternative jugée plus avantageuse. C'est précisément cette relation de sensibilité que les élasticités permettent de quantifier.

1.4 L'élasticité en économie des transports

L'élasticité est un concept fondamental de l'analyse économique qui permet de mesurer la sensibilité d'une variable (la demande) face à la variation de l'un de ses déterminants (le prix ou le coût). Dans le secteur du transport de fret, l'élasticité-prix de la demande est un indicateur crucial pour comprendre comment le volume de marchandises transportées par un mode spécifique (route, rail ou fluvial) réagit à une modification de ses tarifs.

D'un point de vue théorique, l'élasticité peut être définie comme la mesure de la réaction « de la quantité demandée d'un bien au changement de prix de ce bien. Elle se calcule comme la variation en pourcentage des quantités demandées divisée par la variation en pourcentage du prix » (Mankiw, 2015). Plus précisément, dans la littérature spécialisée, on distingue l'élasticité « arc », qui mesure la réaction entre deux points de prix donnés, et l'élasticité « point », qui analyse la sensibilité pour une variation infinitésimale du coût (Oum et al., 1992). Une demande est dite élastique lorsque sa réaction est plus que proportionnelle à la variation du prix (valeur absolue supérieure à 1) et inélastique (ou rigide) dans le cas contraire.

Formellement, l'élasticité directe E_{ii} d'un mode i s'exprime comme suit :

$$E_{ii} = \frac{\Delta Q_i / Q_i}{\Delta C_i / C_i} \quad (1)$$

où Q_i est le volume transporté et C_i le coût unitaire du mode i . Une élasticité négative signifie qu'une hausse du coût réduit la demande, comme attendu. L'élasticité croisée E_{ij} mesure, quant à elle, l'effet d'une variation du coût d'un mode j sur la demande du mode i . Elle permet d'évaluer la substituabilité ou la complémentarité entre modes.

Une élasticité croisée positive traduit une substitution : en d'autres termes, si transporter par camion devient plus cher, une partie des chargeurs bascule vers la péniche ou le train. C'est ce mouvement que l'élasticité croisée cherche à quantifier.

Tandis qu’une valeur négative suggère une complémentarité : cela signifie que deux modes de transport sont utilisés ensemble. Par exemple, dans une chaîne intermodale, une hausse du coût du camion peut aussi réduire l’utilisation du train ou de la péniche, car ils fonctionnent en complément.

1.4.1 Élasticité-point et limites de l’élasticité-arc

L’élasticité-point

L’élasticité-point mesure la sensibilité de la demande pour une variation infinitésimale du coût. Formellement, elle s’exprime comme la dérivée partielle de la demande par rapport au coût, multipliée par le rapport coût sur quantité :

$$E_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial C_i} \times \frac{C_i}{Q_i} \quad (2)$$

Cette formulation présente l’avantage d’être indépendante de l’unité de mesure et de fournir une mesure locale de la sensibilité, valable en un point précis de la courbe de demande. Elle se prête particulièrement bien à l’analyse de modèles économétriques reposant sur des fonctions d’utilité continues et différentiables, comme c’est le cas des modèles logit multinomiaux mobilisés dans ce mémoire.

Dans un modèle logit fondé sur un coût généralisé avec une spécification logarithmique, l’élasticité ponctuelle peut être dérivée analytiquement à partir des paramètres estimés. Pour un modèle de type MNL, l’élasticité directe de la part modale P_i par rapport au coût C_i s’exprime de la manière suivante :

$$E_{ii} = \beta_{GC} \times (1 - P_i) \quad (3)$$

Concrètement, plus un mode est déjà dominant sur un corridor, moins sa demande réagit à une hausse de son propre coût : un mode qui capte presque tout le marché a peu à perdre à court terme. L’élasticité croisée du mode i par rapport au coût du mode j s’écrit quant à elle :

$$E_{ij} = -\beta_{GC} \times P_j \quad (4)$$

Limites de l’élasticité-arc

L’élasticité-arc présente quelques limites qu’il convient de garder à l’esprit. La première demeure assez intuitive : si on augmente un coût de 10 % puis qu’on le baisse de 10 %, on ne retombe pas au point de départ, ce qui introduit une asymétrie dans les résultats (Varian, 2010). La deuxième limite est que la valeur de l’élasticité change selon l’ampleur de la variation qu’on choisit de simuler, ce qui rend les comparaisons entre études délicates

lorsque celles-ci n'ont pas retenu le même intervalle. La troisième limite réside en ce que cette mesure suppose implicitement que la demande évolue de façon régulière et proportionnelle entre les deux points examinés, ce qui n'est pas toujours le cas lorsqu'on travaille avec des coûts généralisés.

Pourquoi l'élasticité-arc reste néanmoins acceptable

Malgré ces limites, l'usage de l'élasticité-arc reste justifiable. Dans le cadre de modèles de transport de fret à l'échelle régionale, les variations de coût observées dans les simulations de politique tarifaire sont généralement modérées, ce qui réduit l'écart entre élasticité-arc et élasticité-point (Jourquin, 2021). L'élasticité-arc présente de plus l'avantage pratique d'être facilement calculable à partir de simulations de réseau, sans nécessiter la dérivation analytique des fonctions d'utilité. Pour des fins de comparaison et pour la communication des résultats à des décideurs politiques, l'élasticité-arc fournit une mesure intuitive de l'ordre de grandeur des effets de report modal.

C'est pourquoi ce mémoire retiendra les deux approches : l'élasticité-arc et l'élasticité-point.

1.5 Revue de la littérature scientifique

1.5.1 Études européennes et internationales

Contrairement au transport de passagers, les travaux empiriques consacrés à l'estimation des élasticités de coût dans le transport de fret restent relativement peu nombreux. Cette relative rareté s'explique en grande partie par la complexité du secteur : les décisions de transport ne reposent pas uniquement sur les prix, mais résultent d'un arbitrage plus global intégrant la valeur des marchandises, les délais de livraison et la fiabilité des services. Comme le souligne Jourquin (2025), l'hétérogénéité des flux ainsi que la difficulté d'accès à des données suffisamment désagrégées rendent ces analyses particulièrement délicates.

Sur le plan théorique, les bases ont été posées par Friedlaender et Spady (1980), qui ont introduit la notion de demande dérivée : le transport de fret est un intrant productif dont la demande n'existe que parce qu'il y a une demande pour le produit final. Ils ont démontré que le coût réel pour une entreprise intègre non seulement le tarif de transport, mais aussi des caractéristiques logistiques comme la taille des envois et les coûts d'inventaire. Cependant, leur analyse reste limitée au contexte américain et à une période antérieure à la libéralisation des marchés européens, ce que ce mémoire cherche à dépasser en travaillant sur des données continentales plus récentes.

Ces premiers apports ont ensuite été approfondis. Oum et al. (1992) ont enrichi ce débat en montrant que l'élasticité varie selon l'horizon temporel et le niveau d'agrégation.

Ils rejettent l'idée que le fret est strictement inélastique, soulignant que la concurrence entre les modes donne lieu à une large gamme d'élasticités, généralement beaucoup plus élevées que ne le suggère la sagesse conventionnelle.

Dans une perspective plus récente, Beuthe et al. (2014) mettent en avant que les élasticités liées au rail et aux voies navigables sont souvent plus élevées que pour la route, ces modes alternatifs ayant souvent une position de « suiveurs » sur le marché. Les auteurs indiquent que les élasticités propres du rail et des voies navigables sont, en général, deux à trois fois plus élevées que celles de la route. Néanmoins, ils signalent que cette variation des résultats dépend aussi de facteurs méthodologiques tels que le degré d'agrégation des données et le choix des spécifications économétriques.

Finalement, l'article de Jourquin (2025) représente une avancée méthodologique majeure et sert de référence pour ce mémoire. L'auteur met en évidence que la sensibilité de la demande aux variations de prix n'est pas constante mais dépend plutôt de la configuration physique et géographique du réseau. Il souligne également que le report modal est un processus progressif et que l'utilisation d'une transformation Box-Cox appliquée aux variables de coût et de temps permet une interprétation plus nuancée des effets. Néanmoins, Jourquin (2025) conduit son analyse à l'échelle européenne sans comparer explicitement les résultats à différents niveaux de désagrégation sur un même jeu de données. En particulier, les problèmes d'identification de θ_{time} qui surgissent spécifiquement au niveau NUTS 3 ne sont pas documentés dans ses travaux. C'est précisément cette limite que le présent mémoire cherche à mettre en lumière et à dépasser.

1.5.2 Études de référence sur l'effet du niveau d'agrégation dans le transport de fret

La question du niveau d'agrégation géographique dans l'estimation des élasticités constitue un enjeu central de ce mémoire, pourtant peu traité de façon directe dans la littérature existante. Aucune étude ne compare en effet explicitement des élasticités estimées aux niveaux NUTS 2 et NUTS 3 sur un même jeu de données. Les travaux disponibles abordent néanmoins cette problématique de manière indirecte, en documentant la sensibilité des résultats au degré de désagrégation des données, ce qui constitue une base de réflexion utile pour le présent travail. Beuthe et al. (2001) ont été les pionniers dans l'analyse multimodale à grande échelle en utilisant le modèle de réseau multimodal NODUS. Leurs simulations, basées sur la minimisation du coût généralisé, ont révélé que le mode fluvial est extrêmement sensible aux variations de prix du transport routier sur les corridors denses.

Beuthe et al. (2014) ont apporté des précisions cruciales sur la structure de cette demande. Ils démontrent que les élasticités varient considérablement non seulement selon le mode, mais aussi selon la catégorie de marchandises et la distance.

L'étude montre notamment que les élasticités-prix tendent à augmenter avec la distance de transport, car les opportunités de substitution modale deviennent plus réelles sur les longs trajets. Ces résultats constituent une base de comparaison essentielle pour les niveaux NUTS 2 et NUTS 3 examinés dans ce travail.

En synthèse, la littérature existante apporte trois enseignements fondamentaux pour ce mémoire : les élasticités de fret sont hétérogènes selon le mode, le type de marchandises et la distance (Beuthe et al., 2014) ; elles sont sensibles aux choix méthodologiques, notamment à la forme fonctionnelle et au niveau d'agrégation (Oum et al., 1992 ; Beuthe et al., 2014) ; et leur estimation à fine granularité géographique pose des problèmes d'identification spécifiques liés à la colinéarité structurelle des données simulées (Jourquin, 2025). Ces trois points structurent directement les choix méthodologiques présentés au chapitre 2 et les résultats discutés aux chapitres 3 et 4. Toutefois, aucune des études recensées ne procède à une comparaison empirique et systématique des élasticités estimées aux niveaux NUTS 2 et NUTS 3 sur un même jeu de données, pour les mêmes groupes de marchandises, en documentant explicitement les problèmes d'identification qui en résultent. C'est précisément cette triple originalité (même terrain, même modèle, deux niveaux d'agrégation) qui constitue la contribution centrale du présent mémoire à la littérature existante.

1.6 Enjeux méthodologiques de l'estimation des élasticités

Avant de présenter la méthodologie retenue dans ce mémoire, il est utile de signaler quelques difficultés récurrentes dans ce type de travaux. Ces problèmes apparaissent dans la plupart des études sur le fret multimodal et sont bien documentés dans la littérature. Les connaître à l'avance permet de comprendre certains choix de spécification qui seront faits au chapitre 2.

1.6.1 Le problème de colinéarité entre coût et durée

Dans la grande majorité des modèles de transport de fret, les variables de coût monétaire et de durée de transport sont construites à partir des mêmes distances de réseau, selon des barèmes fixes par mode. Il en résulte une corrélation structurelle entre ces deux variables pouvant atteindre un coefficient de corrélation proche de l'unité dans les données simulées. Ce problème de multicollinéarité est bien documenté dans la littérature économétrique (Greene, 2020) et se révèle particulièrement critique dans les modèles de choix modal, où il complique l'identification des effets propres de chaque variable. Pour y remédier, une approche fréquemment retenue consiste à regrouper ces variables au sein d'un coût généralisé, intégrant à la fois la dimension monétaire et la durée de transport, cette dernière étant pondérée par une valeur du temps (de Jong & Ben-Akiva, 2007).

1.6.2 Sensibilité des résultats aux formes fonctionnelles

L'introduction de transformations non linéaires telles que la transformation Box-Cox vise à accroître la flexibilité du modèle, mais introduit un risque d'instabilité numérique. Pour des valeurs de λ très négatives, les valeurs transformées se concentrent dans un intervalle étroit et perdent leur pouvoir discriminant. À l'inverse, pour des valeurs élevées de λ , les valeurs peuvent exploser et rendre la hessienne singulière (Train, 2009). Ces difficultés ont conduit plusieurs auteurs à préférer des spécifications logarithmiques directes, moins flexibles mais numériquement plus robustes.

1.6.3 Sensibilité aux niveaux d'agrégation et à la structure des données

Beuthe et al. (2014) montrent que les élasticités estimées varient de façon significative selon que l'on travaille à l'échelle de grandes régions (NUTS 2) ou de zones plus fines (NUTS 3), en raison des effets de composition induits par l'agrégation. Un niveau trop grossier masque la diversité des flux, tandis qu'un niveau trop fin réduit le nombre de paires OD disponibles et fragilise statistiquement les estimations. Cette tension justifie l'approche comparative retenue dans ce mémoire.

1.6.4 La structure fractionnée des données de fret

Les données agrégées de fret expriment une répartition des quantités entre plusieurs modes pour une même paire OD, ce qui viole l'hypothèse de base du modèle logit multinomial standard supposant un choix unitaire. Des approches adaptées, telles que les modèles logit à comptages (MNL with counts), ont été proposées pour tenir compte de cette réalité (McFadden, 1974 ; de Jong & Ben-Akiva, 2007). Leur utilisation est recommandée chaque fois que les données disponibles se présentent sous forme de flux agrégés.

1.7 Conclusion

Ce premier chapitre a posé les bases théoriques du mémoire. Le transport de fret, structuré autour de trois modes principaux (la route, le rail et le fluvial), voit ses structures de coût très différentes conditionner les choix des chargeurs. Les élasticités de coût, directes et croisées, offrent un cadre analytique rigoureux pour évaluer ces relations. La revue de la littérature a montré l'importance de la comparaison entre les niveaux d'agrégation géographique, qui constitue l'axe central de ce mémoire. La section 1.6 a identifié les difficultés d'estimation génériques (colinéarité, instabilité numérique, sensibilité à l'agrégation) qui seront au cœur des choix présentés au chapitre 2.

Chapitre 2

Méthodologie et cadre analytique

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la démarche méthodologique adoptée pour estimer les élasticités de coût du transport de fret à deux niveaux géographiques : le niveau NUTS 2 européen et le niveau NUTS 3 allemand. Il s'agit d'abord de décrire les données utilisées et leur structure, avant de présenter la spécification du modèle économétrique retenu. Une partie importante de ce chapitre est consacrée aux difficultés rencontrées lors de l'implémentation, car celles-ci constituent en elles-mêmes des résultats analytiques pertinents sur la nature des données et la complexité du problème. La conclusion du chapitre justifie la révision de la spécification initiale et présente le modèle final retenu.

2.2 Données

2.2.1 Source et structure

Les données se présentent sous forme d'une table origine-destination (OD), où chaque ligne correspond à une paire OD pour un groupe de marchandises donné. Pour chaque paire OD, on dispose des coûts unitaires (en euros par tonne), des durées de transport (en secondes), des longueurs de trajet (en mètres) et des quantités transportées (en tonnes) pour chacun des trois modes lorsqu'ils sont disponibles.

Deux jeux de données sont mobilisés dans ce mémoire :

- les données européennes au niveau NUTS 2, comprenant 130 523 observations réparties en dix groupes de marchandises ;
- les données allemandes au niveau NUTS 3, comprenant 1 201 394 observations après filtrage des quantités nulles.

Les dix groupes de marchandises présentés dans le tableau 1 sont conformes à la nomenclature NST/R (Eurostat, 2007).

TABLEAU 1 – Groupes de marchandises selon la nomenclature NST/R

Groupe	Marchandise
0	Produits agricoles
1	Denrées alimentaires et fourrage
2	Combustibles solides
3	Produits pétroliers
4	Minerais et ferrailles
5	Produits métallurgiques
6	Minéraux et matériaux de construction
7	Engrais
8	Produits chimiques
9	Machines et articles manufacturés

Source : Eurostat (2007)

2.2.2 Analyse descriptive et identification des valeurs aberrantes

Avant de lancer les estimations, une analyse exploratoire des données a été réalisée afin d’identifier d’éventuels problèmes de qualité. Cette étape s’est révélée cruciale pour comprendre certaines difficultés d’estimation rencontrées par la suite. Les statistiques descriptives des données NUTS 2 et NUTS 3 sont présentées (Annexe C.1 à C.2).

Du côté des coûts unitaires, rien d’alarmant : les distributions sont cohérentes, sans valeurs négatives ni infinies. Les durées de transport montrent en revanche une forte asymétrie, particulièrement pour le mode fluvial, dont les valeurs peuvent être jusqu’à 100 fois supérieures à celles de la route pour les mêmes OD, reflétant la lenteur intrinsèque de ce mode.

L’analyse a révélé la présence de valeurs aberrantes dans les variables de quantités transportées. Pour le mode fluvial notamment, certaines OD présentent des quantités anormalement élevées. Pour les données NUTS 2, ce filtrage a été réalisé en amont par Jourquin avant la mise à disposition des données. Pour les données NUTS 3, le filtrage est appliqué groupe par groupe dans le script Python selon les seuils détaillés (Annexe C.0).

Un constat important émerge de cette analyse : pour plusieurs groupes de marchandises, la corrélation entre les coûts et les durées de transport est quasi parfaite (coefficient de corrélation $\approx 1,0$). Ce phénomène s’explique par le fait que, dans le modèle NODUS, les coûts et les durées sont tous deux calculés à partir des distances de réseau selon des barèmes fixes par mode. Cette corrélation structurelle, plus prononcée au niveau NUTS 3 qu’au niveau NUTS 2, aura des conséquences directes sur les difficultés d’estimation décrites dans la section suivante.

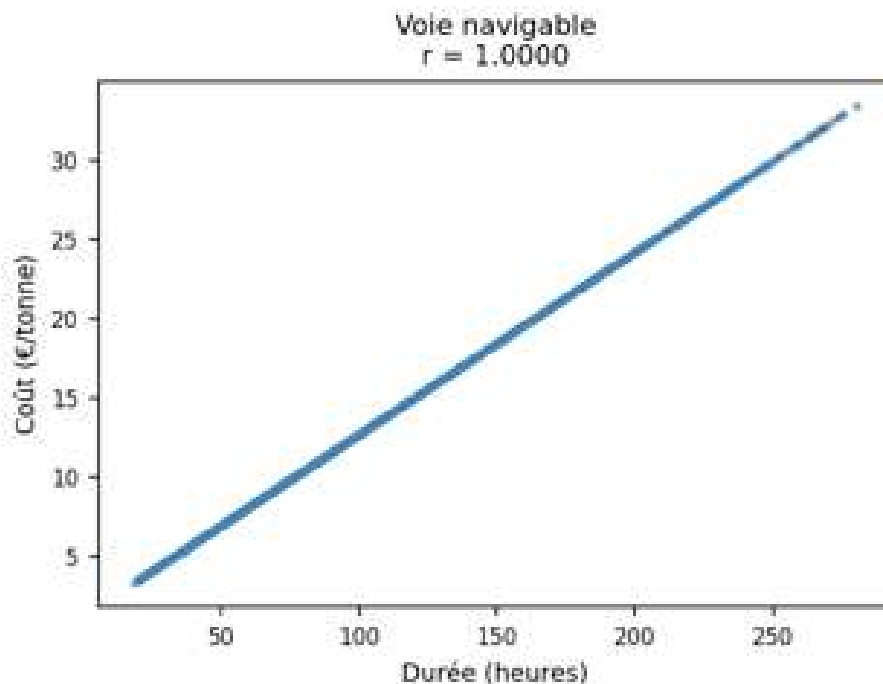


FIGURE 1 – Corrélation coût/durée - groupe 4 (données NUTS 2)

Source : Auteur

La figure 1 illustre cette corrélation pour le groupe 4. Ce phénomène est discuté plus en détail à la section 2.3.3. Les nuages de points pour les groupes 2, 4 et 8 aux deux niveaux d'agrégation sont disponibles (Annexe D).

2.3 Première spécification : modèle logit avec transformation Box-Cox

2.3.1 Présentation du modèle

La spécification initiale, développée par Jourquin (2019, 2021, 2025), combine un modèle logit conditionnel avec des transformations Box-Cox appliquées séparément aux variables de coût et de durée. La transformation Box-Cox est définie comme :

$$BC(x, \lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{si } \lambda \neq 0 \\ \ln(x) & \text{si } \lambda = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Cette transformation permet d'adopter une forme fonctionnelle flexible, qui englobe le cas linéaire ($\lambda = 1$) et le cas logarithmique ($\lambda = 0$) comme cas particuliers. Les fonctions d'utilité du modèle s'écrivent alors :

$$V_i = ASC_i + \beta_{cost} \times BC(cost_i, \lambda_{cost}) + \beta_{dur} \times BC(dur_i, \lambda_{dur}) \\ + (\beta_{from} \times qty_{from,i} + \beta_{to} \times qty_{to,i}) \times \exp(length_i^2 \times \beta_{decay}) \quad (6)$$

où ASC_i représente la constante spécifique au mode i (le mode 1, routier, servant de référence), et les termes d’accessibilité captent l’effet des volumes de trafic aux origines et destinations, pondérés par un facteur de décroissance en fonction de la distance. Les paramètres λ_{cost} et λ_{dur} sont déterminés préalablement via une procédure de recherche heuristique décrite dans la section suivante.

2.3.2 Estimation des lambdas par shotgun hill climbing

Pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de transformation λ_{cost} et λ_{dur} , l’algorithme *shotgun hill climbing* proposé par Jourquin (2021) a été implémenté en Python. Cette méthode se déroule en deux phases. La phase 1, dite phase « shotgun », consiste à évaluer aléatoirement N points de départ dans l’espace des lambdas, défini sur une grille discrète à pas de 0,1. Pour chaque combinaison $(\lambda_{cost}, \lambda_{dur})$, la log-vraisemblance est calculée via une optimisation `scipy` L-BFGS-B des paramètres du modèle logit. La phase 2, ou *hill climbing* avec *backtracking*, explore le voisinage du meilleur point en testant les quatre directions adjacentes sur la grille. Cette procédure peut être comparée à une exploration progressive : l’algorithme commence par tester plusieurs points répartis aléatoirement afin d’identifier les zones les plus prometteuses, puis affine ensuite la recherche de manière plus systématique autour de la meilleure solution détectée. Le code python utilisé est disponible (Annexe E.0 et E.1).

2.3.3 Difficultés rencontrées

La mise en œuvre de cette première spécification a rapidement fait apparaître plusieurs difficultés importantes, en cohérence avec les enjeux méthodologiques évoqués à la section 1.6.

Tout d’abord, l’algorithme de type *hill climbing* s’arrête très rapidement, après un nombre limité d’itérations (environ huit points testés par groupe). Concrètement, cela signifie que la recherche converge presque immédiatement vers un optimum local : le meilleur point identifié dès le départ ne peut pas être amélioré par l’exploration des solutions voisines, ce qui limite fortement la qualité de l’optimisation.

Par la suite, certaines valeurs des paramètres de transformation (λ) engendrent des problèmes numériques. Lorsque λ associé au coût prend des valeurs très négatives (par exemple $-2,2$), les données transformées deviennent presque constantes, car elles se retrouvent coincées dans un intervalle très réduit.

En revanche, des valeurs élevées pour λ lié à la durée (par exemple 1,4) provoquent une augmentation des valeurs transformées, qui peuvent atteindre des ordres de grandeur assez importants. Dans ce cas, le modèle devient instable et ne parvient plus à converger correctement.

Par ailleurs, un autre problème majeur apparaît dans certains groupes de données : le coût et la durée y sont presque parfaitement corrélés. Cette corrélation empêche de distinguer clairement leur effet respectif dans le modèle, rendant l'estimation des paramètres peu fiable.

L'ensemble de ces difficultés met en évidence les limites de cette première spécification et justifie la nécessité de revoir la formulation du modèle.

2.4 Révision de la spécification : modèle à coûts généralisés

2.4.1 Motivation

Face aux problèmes identifiés dans la section précédente, une nouvelle spécification¹ basée sur les coûts généralisés a été adoptée. L'idée centrale est de combiner les variables de coût et de durée en un seul indicateur composite, éliminant ainsi le problème de colinéarité. Plusieurs alternatives auraient pu être envisagées à ce stade, mais elles ont été écartées pour différentes raisons.

Une première option consistait à conserver la spécification Box-Cox tout en limitant les valeurs des paramètres λ à des plages plus stables, par exemple entre $-0,5$ et $1,5$, afin d'éviter les problèmes numériques décrits précédemment. Cette approche, utilisée notamment par Beuthe et al. (2014), permet de garder une certaine flexibilité dans la forme du modèle. Toutefois, elle ne résout pas le problème principal de ce travail : la forte colinéarité entre le coût et la durée. Même transformées, ces deux variables restent presque proportionnelles dans les données, ce qui empêche d'identifier correctement leurs effets respectifs.

Une deuxième possibilité aurait été d'imposer une valeur du temps issue de la littérature, comme celles proposées par de Jong et Ben-Akiva (2007), et de n'estimer que le paramètre β_{GC} . Cette solution est plus prudente d'un point de vue économétrique, notamment dans les cas de colinéarité forte. Elle est d'ailleurs recommandée pour des applications futures du modèle. Cependant, elle n'a pas été retenue ici, car elle nécessiterait de disposer de valeurs du temps fiables pour chacun des dix groupes de marchandises à l'échelle européenne, ce qui dépasse le cadre de ce mémoire.

1. Suggestion formulée par le professeur Bart Jourquin dans le cadre de l'encadrement du mémoire.

Enfin, un modèle logit emboîté aurait également pu être utilisé, en regroupant par exemple le rail et le fluvial dans un même ensemble afin de mieux représenter leur proximité. Ce type de modèle est pertinent lorsque certains modes sont en concurrence directe. Néanmoins, son estimation nécessite une variabilité suffisante dans les choix entre ces modes, ce qui n'est pas toujours le cas dans nos données, où un seul mode domine souvent pour une paire origine-destination donnée. Dans ce contexte, le modèle logit multinomial retenu apparaît comme une solution plus simple et plus robuste, en accord avec l'objectif comparatif du mémoire.

2.4.2 Spécification du modèle

Le coût généralisé pour le mode i est défini comme :

$$GC_i = cost_i + \theta_{time} \times duration_i \quad (7)$$

où θ_{time} représente la valeur implicite du temps, exprimée en euros par unité de durée. Ce paramètre doit être positif : une durée plus longue augmente le coût généralisé, ce qui diminue l'utilité du mode. On fait ici l'hypothèse implicite que le coefficient du coût monétaire est égal à 1 pour tous les modes, ce qui est une normalisation courante (de Jong & Ben-Akiva, 2007). La fonction d'utilité devient :

$$V_i = ASC_i + \beta_{GC} \times \log(GC_i) \quad (8)$$

L'utilisation du logarithme du coût généralisé est cohérente avec la théorie économique (utilité marginale décroissante), elle correspond au cas $\lambda \rightarrow 0$ de la transformation Box-Cox, et elle garantit la stabilité numérique de l'estimation (Train, 2009). Le paramètre β_{GC} doit être négatif. Il est possible que $\theta_{time} = 0$ pour certains groupes de marchandises, ce qui signifie que la durée n'apporte pas de pouvoir explicatif supplémentaire au-delà du coût monétaire.

2.4.3 Log-vraisemblance adaptée : MNL with counts

La structure des données de transport de fret est fractionnée : chaque observation correspond à une paire OD, et les quantités transportées sont réparties entre plusieurs modes simultanément. Pour tenir compte de cette spécificité, la log-vraisemblance est redéfinie comme un modèle multinomial à comptages (*MNL with counts*), où chaque mode contribue proportionnellement à la quantité transportée (McFadden, 1974 ; de Jong & Ben-Akiva, 2007) :

$$\log L = \sum_{od} [qty_1 \times \log(P_1) + qty_2 \times \log(P_2) + qty_3 \times \log(P_3)] \quad (9)$$

où P_i est la probabilité logit du mode i :

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum_j [\text{avail}_j \times \exp(V_j)]} \quad (10)$$

En pratique, cette formule revient à dire que le modèle est d'autant mieux ajusté qu'il prédit des probabilités élevées pour les modes qui transportent effectivement de grandes quantités : les tonnes servent en quelque sorte de vote pondéré pour chaque mode.

Cette formulation est implémentée manuellement dans Biogeme (Bierlaire, 2003).

Afin d'évaluer la qualité globale de l'ajustement, un pseudo- R^2 de McFadden (ρ^2) est calculé pour chaque groupe. Biogeme 3.2.11 ne produit pas la log-vraisemblance nulle (LL_0) dans le cas de modèles estimés avec des poids personnalisés, ce qui rend le calcul direct impossible. La LL_0 a donc été recalculée manuellement, en appliquant les mêmes poids que Biogeme et en supposant un modèle nul où chaque mode disponible reçoit une probabilité égale $P_i^0 = 1/k$ (k étant le nombre de modes disponibles pour la paire OD considérée) :

$$LL_0 = \sum_{od} [\text{weight}_{od} \times \text{qty_tot}_{od} \times \log(1/k)] \quad (11)$$

Le pseudo- R^2 est ensuite défini comme $\rho^2 = 1 - (LL_{finale}/LL_0)$. Selon Train (2009), un ρ^2 supérieur à 0,20 indique un bon ajustement dans les modèles de choix discret. Les résultats sont présentés aux sections 3.2.3 et 3.3.2.

2.4.4 Disponibilité des modes

La disponibilité de chaque mode est dérivée directement de la présence ou de l'absence de coût : $\text{avail}_i = 1$ si cost_i est non nul, 0 sinon.

Autrement dit, si aucun coût n'est renseigné pour un mode de transport entre deux zones, c'est qu'il n'existe tout simplement pas de liaison praticable entre elles : le mode est donc exclu du choix pour cette paire OD.

Cette approche est justifiée par le fait que dans le modèle NODUS, un coût nul indique l'absence d'itinéraire praticable pour ce mode entre l'origine et la destination considérées.

2.5 Résultats de validation sur données NUTS 2

Avant d'appliquer le modèle révisé aux données NUTS 3, une validation a été réalisée sur le jeu de données européen au niveau NUTS 2, fourni par Jourquin. Ce jeu de données, plus propre (outliers supprimés en amont, une seule classe de péniches), comprend 130 523 observations réparties en dix groupes de marchandises.

Les résultats confirment la convergence du modèle et le signe attendu de β_{GC} pour l'ensemble des dix groupes : le paramètre est négatif dans tous les cas, conformément

aux attentes théoriques. Les groupes 3, 4 et 9 permettent en outre l'identification de θ_{time} avec des t -statistiques élevées, tandis que six groupes présentent θ_{time} contraint à zéro, résultat économiquement cohérent pour des marchandises pondéreuses peu sensibles aux délais. Le groupe 8 (produits chimiques) constitue un cas particulier, où la quasi-colinéarité parfaite entre coût et durée empêche l'identification de θ_{time} ; ce cas est traité en détail à la section 3.2.2.

L'analyse détaillée des paramètres estimés, des intervalles de confiance à 95 % et de la fiabilité par groupe est présentée au chapitre 3.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a retracé le cheminement méthodologique de ce mémoire, depuis la spécification initiale basée sur la transformation Box-Cox jusqu'au modèle révisé à coûts généralisés. Les difficultés rencontrées (arrêt prématuré de l'heuristique, instabilité numérique liée aux lambdas extrêmes, colinéarité parfaite entre coût et durée) ont mis en évidence une limite fondamentale de la spécification originale lorsqu'elle est appliquée à des données où coûts et durées sont mécaniquement corrélés. La spécification révisée, basée sur les coûts généralisés et une log-vraisemblance MNL with counts, offre une solution plus robuste, tout en restant économiquement interprétable. Le chapitre suivant présentera les résultats de l'estimation sur les deux niveaux d'agrégation.

Chapitre 3

Estimation des paramètres du modèle à coûts généralisés

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de l'estimation du modèle à coûts généralisés appliqué à deux jeux de données distincts : d'une part, les données européennes au niveau NUTS 2, et d'autre part, les données allemandes au niveau NUTS 3. Comme le souligne Jourquin (2025), l'instabilité des modèles de choix modal de fret n'est pas propre à un pays particulier mais constitue un phénomène générique lié à la structure des données. C'est pourquoi les deux niveaux d'analyse sont traités conjointement, permettant d'évaluer dans quelle mesure les résultats sont sensibles au niveau d'agrégation géographique.

La section 3.2 présente les résultats NUTS 2 Europe en les analysant en détail. La section 3.3 expose les résultats NUTS 3 Allemagne. La section 3.4 propose une analyse comparative des deux niveaux. Le chapitre 4 sera consacré au calcul et à l'analyse des élasticités directes et croisées.

3.2 Résultats sur données NUTS 2 Europe

3.2.1 Paramètres estimés

Le modèle à coûts généralisés a été estimé sur un jeu de données européen au niveau NUTS 2 comprenant 130 523 paires OD réparties en dix groupes de marchandises. Ces résultats ont été obtenus par l'exécution du script Python `SolveGeneralized-Cost_NUTS 2.py` en utilisant la bibliothèque Biogeme (Bierlaire, 2003). Les codes python pour NUTS 2 et NUTS 3 sont disponibles (Annexe E.2 et E.3). Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

TABLEAU 2 – Résultats de l'estimation du modèle à coûts généralisés - données NUTS 2 Europe

Grp	β_{GC}	Std. Err.	t	θ_{time}	t	ASC 2	t	ASC 3	t
0	-4,43	0,096	46,0	0	—	-7,37	33,8	-1,09	19,4
1	-5,06	0,201	25,1	0	—	-8,94	7,6	-7,32	13,4
2	-6,52	0,498	13,1	0	—	-7,14	4,8	-1,44	1,9*
3	-3,80	0,159	23,9	1,12	8,2	4,02	14,7	1,97	8,2
4	-11,64	0,340	34,2	0,13	8,8	-6,20	8,4	-4,47	9,2
5	-4,38	0,117	37,6	0	—	-7,53	7,6	1,14	9,2
6	-4,15	0,124	33,6	0	—	-7,40	19,7	-3,10	29,2
7	-4,43	0,519	8,5	0	—	-8,32	3,7	-1,09	1,0*
8	-1,87	0,070	26,7	48,35*	0,8*	3,23	14,9	2,55	12,9
9	-3,96	0,099	40,0	0,27	35,0	0,05	0,5*	1,28	12,0

Source : Auteur. *Valeur suspecte, voir section 3.2.2.

Le tableau 3 présente les indicateurs globaux de qualité d'ajustement pour les dix groupes. La log-vraisemblance nulle (LL_0) a été recalculée manuellement avec les mêmes poids que Biogeme (voir section 2.4.3), afin de garantir la comparabilité avec la LL finale produite par Biogeme.

TABLEAU 3 – Indicateurs de qualité d'ajustement - données NUTS 2 Europe

Grp	N obs	LL finale (M)	LL_0 (M)	ρ^2	$\bar{\rho}^2$	Fiabilité
0	17 118	-2 401,7	-7 033,7	0,659	0,659	Fiable
1	16 989	-1 771,4	-9 746,7	0,818	0,818	Fiable
2	6 994	-6 893,9	-15 948,6	0,568	0,568	Fiable
3	8 245	-2 850,7	-5 300,9	0,462	0,462	Fiable
4	4 871	-2 625,2	-6 844,9	0,617	0,617	Fiable
5	17 129	-3 023,6	-7 017,0	0,569	0,569	Fiable
6	9 007	-6 782,0	-14 375,4	0,528	0,528	Fiable
7	11 263	-1 777,0	-4 412,5	0,597	0,597	Fiable
8	17 352	-4 034,0	-7 092,9	0,431	0,431	θ suspect*
9	21 555	-14 856,7	-29 190,5	0,491	0,491	Fiable

Source : Auteur. LL en millions (M). LL_0 calculée avec $P_i^0 = 1/k$.

L'ensemble des pseudo- R^2 de McFadden sont supérieurs à 0,43, ce qui traduit un bon ajustement global, bien au-delà du seuil de 0,20 généralement retenu (Train, 2009). Le groupe 1 (denrées alimentaires) atteint le meilleur ajustement avec $\rho^2 = 0,818$, tandis que le groupe 8 (produits chimiques) présente le plus faible ($\rho^2 = 0,431$), en cohérence avec les problèmes d'identification de θ_{time} déjà documentés. Ces indicateurs confirment que le modèle à coûts généralisés capture bien la structure des choix modaux observés dans les données NUTS 2 pour la grande majorité des groupes de marchandises.

3.2.2 Intervalles de confiance et précision des estimations

Au-delà de la significativité individuelle de chaque paramètre, la précision des estimations se lit dans la largeur des intervalles de confiance à 95 %, calculés comme valeur $\pm 1,96 \times$ erreur standard. Ces intervalles renseignent sur la plage de valeurs compatibles avec les données au seuil de confiance retenu, et constituent un critère de fiabilité complémentaire au t -stat.

Pour β_{GC} , tous les intervalles sont entièrement négatifs, ce qui confirme sans ambiguïté le signe du paramètre pour chaque groupe. La précision varie néanmoins considérablement :

TABLEAU 4 – Intervalles de confiance à 95 % pour β_{GC} - données NUTS 2 Europe

Grp	β_{GC}	IC 95 %	Largeur
0	-4,43	[-4,61 ; -4,24]	0,38
1	-5,06	[-5,45 ; -4,66]	0,79
2	-6,52	[-7,49 ; -5,54]	1,95
3	-3,80	[-4,12 ; -3,49]	0,62
4	-11,64	[-12,30 ; -10,97]	1,33
5	-4,38	[-4,61 ; -4,15]	0,46
6	-4,15	[-4,40 ; -3,91]	0,49
7	-4,43	[-5,45 ; -3,41]	2,03
8	-1,87	[-2,00 ; -1,73]	0,27
9	-3,96	[-4,16 ; -3,77]	0,39

Source : Auteur.

Les groupes 0, 5, 6 et 9 sont ceux pour lesquels les estimations sont les plus précises, avec des intervalles inférieurs à 0,5 unité. À l'inverse, les groupes 2 et 7 affichent des intervalles proches de 2 unités, ce qui traduit une incertitude notable sur la sensibilité au coût dans ces segments. Le groupe 8 mérite une mention à part : son IC pour β_{GC} est le plus étroit (0,27), mais cette apparente précision est trompeuse, pour des raisons détaillées plus bas.

Concernant θ_{time} , la situation est plus contrastée. Les groupes 3, 4 et 9 présentent des intervalles bien localisés et entièrement positifs : [0,85 ; 1,39] pour les produits pétroliers, [0,10 ; 0,16] pour les minerais, et un intervalle remarquablement étroit [0,25 ; 0,28] pour les machines manufacturées, qui témoigne d'une précision d'estimation très élevée ($t = 35$). Le groupe 8 constitue le cas inverse : son IC s'étend de -63 à +160, ce qui signifie concrètement que la vraie valeur du temps pourrait être négative, nulle ou exorbitante. Un intervalle aussi ouvert ne fournit aucune information exploitable et confirme l'absence d'identification de ce paramètre.

Du côté des constantes modales (ASC), deux cas posent problème. L'ASC du mode ferroviaire pour le groupe 2 (combustibles solides) présente un IC de [-2,92 ; +0,05], frôlant la non-significativité du côté positif ($t = -1,9$).

L'ASC du mode ferroviaire pour le groupe 7 (engrais) est clairement non significatif, avec un IC de $[-3,35 ; +1,16]$ chevauchant largement zéro dans les deux sens ($t = -1,0$). Enfin, l'ASC du mode fluvial pour le groupe 9 est lui aussi non significatif $[-0,16 ; +0,26]$ ($t = 0,5$), indiquant que la voie navigable n'a pas d'avantage ou désavantage structurel particulier pour les machines manufacturées, une fois l'effet du coût pris en compte.

3.2.3 Évaluation de la fiabilité par groupe

La combinaison des t -stats et des intervalles de confiance permet de classer les dix groupes en trois niveaux de fiabilité.

Groupes fiables. Les groupes 0, 3, 4, 5, 6 et 9 donnent des estimations solides pour l'ensemble de leurs paramètres. Dans tous les cas, β_{GC} affiche des valeurs de $|t|$ supérieures à 23, et les intervalles de confiance sont relativement étroits. Les groupes 3 et 4 se distinguent par une identification correcte de θ_{time} (t -stats proches de 8). Le groupe 9 est le plus performant, avec $t = 40$ pour β_{GC} et $t = 35$ pour θ_{time} .

Groupes acceptables, mais à interpréter avec prudence. Le groupe 1 (denrées alimentaires) présente un β_{GC} robuste ($t = 25,1$), mais les intervalles de confiance des ASC des modes alternatifs sont assez larges. Le groupe 2 (combustibles solides) affiche un intervalle large pour β_{GC} (largeur = 1,95) et un ASC ferroviaire proche du seuil de significativité ($t = -1,9$). Le groupe 7 (engrais) est le plus fragile : erreur standard élevée (0,519) et ASC ferroviaire non significatif ($t = -1,0$).

Groupe non fiable, à exclure. Le groupe 8 (produits chimiques) présente un problème d'identification. Même si β_{GC} est bien estimé ($t = 26,7$), θ_{time} n'est pas significatif ($t = 0,85$) et son IC est très large $[-63 ; +160]$. Sa valeur estimée (48,35 €/heure) n'est pas réaliste économiquement, en raison d'une corrélation quasi parfaite entre coût et temps ($r \approx 1,000$). Les résultats du groupe 8 ne seront pas pris en compte dans les conclusions quantitatives.

Ces conclusions sont confirmées par l'analyse de la capacité prédictive du modèle sur les parts modales, présentée dans le tableau 5.

TABLEAU 5 – Parts modales observées vs prédites - données NUTS 2 Europe

Grp	Marchandise	Route		IVN		Fer	
		Obs	Préd	Obs	Préd	Obs	Préd
0	Produits agricoles	88,3 %	83,0 %	3,6 %	3,7 %	8,0 %	13,3 %
1	Denrées alimentaires	94,3 %	94,1 %	3,8 %	3,5 %	1,9 %	2,4 %
2	Combustibles solides	20,9 %	4,9 %	13,3 %	8,4 %	65,8 %	86,7 %
3	Produits pétroliers	68,3 %	59,6 %	22,0 %	30,3 %	9,7 %	10,1 %
4	Minerais et ferrailles	84,7 %	73,2 %	4,3 %	8,9 %	11,0 %	18,0 %
5	Produits métallurgiques	78,6 %	71,4 %	3,7 %	1,9 %	17,7 %	26,7 %
6	Minéraux et mat. construction	80,8 %	81,6 %	5,3 %	3,5 %	13,9 %	14,9 %
7	Engrais	33,9 %	11,5 %	3,2 %	0,5 %	62,8 %	88,0 %
8	Produits chimiques	80,7 %	77,0 %	8,8 %	9,2 %	10,5 %	13,9 %
9	Machines et art. man.	87,1 %	71,9 %	4,9 %	12,1 %	8,0 %	16,0 %

Source : Auteur. IVN = voie navigable intérieure. Écarts en points de pourcentage (pp).

Pour la majorité des groupes, l'écart entre parts observées et prédites reste limité, notamment pour les groupes 1 (écart routier de $-0,2$ pp) et 6 ($+0,8$ pp). En revanche, les groupes 2 et 7 présentent des écarts importants (-16 et -22 pp sur la part routière), reflétant une réalité structurelle : ces marchandises sont massivement transportées par voies ferrées, et le modèle tend à accentuer cette concentration.

3.2.4 Analyse économique des résultats NUTS 2

Les résultats du tableau 2 donnent lieu à plusieurs interprétations économiques. Rappelons que les groupes 0, 3, 4, 5, 6 et 9 sont fiables, les groupes 2 et 7 à interpréter avec prudence, et le groupe 8 exclu.

Le paramètre β_{GC} . Pour les groupes fiables, les valeurs varient entre $-3,80$ (produits pétroliers) et $-11,64$ (minerais et ferrailles). Les minerais, transportés en grandes quantités sur des axes multimodaux concurrentiels, présentent une forte sensibilité au coût. À l'inverse, les produits pétroliers ($-3,80$) et les machines manufacturées ($-3,96$) montrent une sensibilité plus faible, liée à des contraintes logistiques limitant le choix modal.

Le paramètre θ_{time} . Pour six groupes sur dix, $\theta_{time} = 0$, résultat cohérent pour des marchandises lourdes ou en vrac dont les décisions reposent principalement sur les coûts. Parmi les groupes estimés, les produits pétroliers donnent $\theta_{time} = 1,12$ /heure avec un IC $[0,85 ; 1,39]$, et les machines manufacturées $\theta_{time} = 0,27$ avec un IC très resserré $[0,25 ; 0,28]$ ($t = 35$).

Les constantes spécifiques aux modes (ASC). Les ASC fluviaux sont négatifs pour huit groupes sur dix, traduisant une préférence générale pour la route. Exception notable : le groupe 3 affiche $ASC2 = +4,02$ ($t = 14,7$), fiable et expliqué par la présence

d'infrastructures pétrolières le long des axes rhénans. Pour le groupe 9, l'ASC fluvial n'est pas significatif ($t = 0,5$).

3.3 Résultats sur données NUTS 3 Allemagne

3.3.1 Paramètres estimés

Le même modèle a été appliqué aux données allemandes au niveau NUTS 3, comprenant 1 201 394 observations après filtrage. L'estimation a nécessité environ 11 heures de calcul pour les dix groupes. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

TABLEAU 6 – Résultats de l'estimation du modèle à coûts généralisés - données NUTS 3 Allemagne

Grp	β_{GC}	θ_{time}	ASC 2	ASC 3	N obs	Statut θ
0	-4,10	1 803	7,46	9,51	113 412	Aberrant
1	-1,40	6 598	0,24	-1,10	93 458	Aberrant
2	-0,63	0	-1,86	5,91	93 570	Fiable
3	-3,21	58 475	7,95	7,60	89 567	Aberrant
4	-13,77	2,13	17,28	23,45	140 345	Fiable
5	-3,99	26 733	8,69	12,44	120 323	Aberrant
6	-3,50	38 387	7,53	10,85	150 802	Aberrant
7	-6,66	0,06	-5,98	3,92	124 014	Fiable
8	-3,53	3 841	7,30	9,88	138 132	Aberrant
9	-3,08	19 896	6,21	8,72	134 619	Aberrant

Source : Auteur.

3.3.2 Analyse des résultats NUTS 3

Le tableau 7 présente les indicateurs globaux de qualité d'ajustement pour les données NUTS 3.

TABLEAU 7 – Indicateurs de qualité d'ajustement - données NUTS 3 Allemagne

Grp	N obs	LL finale (M)	LL_0 (M)	ρ^2	$\bar{\rho}^2$	Fiabilité
0	267 447	-475,2	-8 258,8	0,943	0,943	θ aberrant
1	219 942	-437,5	-11 335,5	0,961	0,961	θ aberrant
2	207 033	-3 924,5	-366 665,5	0,989	0,989	Fiable ($\theta = 0$)
3	208 125	-2 757,1	-10 236,7	0,731	0,731	θ aberrant
4	326 452	-1 663,6	-25 026,5	0,934	0,934	Fiable
5	274 476	-1 813,1	-8 741,4	0,793	0,793	θ aberrant
6	335 667	-8 767,9	-30 658,1	0,714	0,714	θ aberrant
7	260 962	-334,9	-28 293,0	0,988	0,988	Fiable
8	312 810	-2 345,6	-10 941,6	0,786	0,786	θ aberrant
9	307 909	-7 835,1	-28 367,7	0,724	0,724	θ aberrant

Source : Auteur. LL en millions (M).

Un résultat à première vue surprenant apparaît : les pseudo- R^2 sont très élevés pour l'ensemble des groupes, y compris ceux dont θ_{time} est aberrant, atteignant 0,943 pour les produits agricoles et 0,961 pour les denrées alimentaires. Ce paradoxe s'explique par la structure des données NUTS 3 : lorsque θ_{time} prend des valeurs extrêmes, le modèle concentre quasi toute la probabilité sur un ou deux modes. Si les données sont elles-mêmes très concentrées sur ces modes, la LL finale devient mécaniquement élevée par rapport à LL_0 , gonflant artificiellement le ρ^2 . Un ρ^2 élevé est donc une condition nécessaire mais non suffisante pour valider un modèle : il doit s'accompagner de paramètres économiquement cohérents.

Le paramètre β_{GC} reste négatif pour l'ensemble des groupes, allant de $-0,63$ (combustibles solides) à $-13,77$ (minerais et ferrailles). En revanche, θ_{time} pose problème pour plusieurs groupes : des valeurs de l'ordre de milliers à dizaines de milliers d'euros par heure, statistiquement très significatives ($t > 100$), mais économiquement aberrantes. Au niveau NUTS 3, coût et durée sont quasi colinéaires, forçant le modèle à concentrer toute la variance sur θ_{time} . Cela illustre que la significativité statistique ne garantit pas la pertinence économique.

Le groupe 4 (minerais et ferrailles) se démarque : $\beta_{GC} = -13,77$ (contre $-11,64$ en NUTS 2) et des ASC élevés pour le rail (17,28) et le fluvial (23,45), reflétant la forte orientation de ces flux vers les modes lourds. Les ASC diffèrent sensiblement de NUTS 2 : majoritairement positifs pour le rail et le fluvial, suggérant une compétitivité accrue liée au réseau rhénan allemand.

3.4 Analyse comparative NUTS 2 Europe vs NUTS 3 Allemagne

3.4.1 Tableau comparatif des paramètres clés

TABEAU 8 – Comparaison des paramètres β_{GC} et θ_{time} entre niveaux NUTS 2 et NUTS 3

Grp	β_{GC} N2	β_{GC} N3	Écart	θ_{time} N2	θ_{time} N3	Statut N3
0	-4,43	-4,10	-7 %	0	1 803	Aberrant
1	-5,06	-1,40	+72 %	0	6 598	Aberrant
2	-6,52	-0,63	+90 %	0	0	Fiable
3	-3,80	-3,21	+15 %	1,12	58 475	Aberrant
4	-11,64	-13,77	-18 %	0,13	2,13	Fiable
5	-4,38	-3,99	+9 %	0	26 733	Aberrant
6	-4,15	-3,50	+16 %	0	38 387	Aberrant
7	-4,43	-6,66	-50 %	0	0,06	Fiable
8	-1,87	-3,53	-89 %	48,35	3 841	Aberrant
9	-3,96	-3,08	+22 %	0,27	19 896	Aberrant

Source : Auteur.

3.4.2 Effet du niveau d'agrégation sur β_{GC}

La comparaison révèle une cohérence remarquable pour les groupes 0 et 4, dont les valeurs sont proches entre NUTS 2 et NUTS 3, suggérant une sensibilité au coût robuste au niveau d'agrégation. En revanche, les groupes 1 et 2 affichent un β_{GC} nettement plus faible en valeur absolue au niveau NUTS 3, cohérent avec les effets de composition documentés par Beuthe et al. (2014) (voir section 1.6.3).

3.4.3 Effet du niveau d'agrégation sur θ_{time}

L'effet est encore plus prononcé pour θ_{time} . Au niveau NUTS 2, six groupes présentent $\theta_{time} = 0$; au niveau NUTS 3, la plupart affichent des valeurs extrêmes. La diversité des distances au sein des zones NUTS 2 permet de distinguer partiellement coût et durée ; au niveau NUTS 3, cette variance est réduite, rendant les deux variables quasi colinéaires. Ce résultat illustre concrètement les enjeux de la section 1.6.

3.4.4 Interprétation économique

Plusieurs conclusions convergentes peuvent être tirées. Premièrement, la sensibilité au coût est systématiquement plus élevée pour les minerais et ferrailles (groupe 4), quel que soit le niveau. Deuxièmement, les combustibles solides (groupe 2) présentent la plus faible sensibilité dans les deux niveaux, reflétant la rigidité des chaînes logistiques du charbon.

Troisièmement, les groupes affectés par la corrélation parfaite (groupes 3, 5, 6, 8) constituent des limites d'identification documentées en section 1.6.1, non des comportements économiques réels.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté et comparé les paramètres estimés du modèle à coûts généralisés selon les deux niveaux d'agrégation. β_{GC} reste systématiquement négatif et relativement cohérent d'un niveau à l'autre, renforçant la crédibilité de la spécification. En revanche, θ_{time} est nettement plus problématique au niveau NUTS 3, en raison d'une corrélation structurellement plus forte entre coût et durée.

Les indicateurs NUTS 2 sont uniformément bons (ρ^2 entre 0,43 et 0,82). Les ρ^2 NUTS 3, bien qu'élevés, reflètent un surajustement pour sept groupes sur dix : le modèle NUTS 2 passe le test statistique et le test économique ; le modèle NUTS 3 passe le premier mais échoue au second pour sept groupes, un signal clair d'un problème d'identification.

Le chapitre suivant s'appuie sur ces estimations pour calculer et analyser les élasticités directes et croisées.

Chapitre 4

Résultats et analyse comparative de l'élasticité du coût

4.1 Introduction

Ce chapitre présente et analyse les élasticités de coût estimées à partir du modèle à coûts généralisés décrit au chapitre 2 et dont les paramètres ont été exposés au chapitre 3. Deux niveaux géographiques sont examinés : le niveau NUTS 2 européen et le niveau NUTS 3 allemand. Pour chaque niveau, les élasticités directes et croisées sont calculées selon les deux méthodes complémentaires décrites en section 1.4.1 : l'élasticité-point (analytique) et l'élasticité-arc (par simulation d'une perturbation de +10 % sur le coût unitaire).

L'analyse se structure en trois temps. La section 4.2 présente et discute les résultats NUTS 2 en les confrontant à la littérature existante. La section 4.3 expose les résultats NUTS 3 et identifie les groupes pour lesquels les estimations sont fiables, ainsi que ceux affectés par le problème d'identification de θ_{time} documenté au chapitre 3. La section 4.4 propose une synthèse comparative et tire les enseignements méthodologiques de cet exercice.

4.2 Élasticités NUTS 2 : résultats et interprétation

4.2.1 Élasticités directes

Le tableau 9 présente les élasticités directes estimées pour les dix groupes de marchandises et les trois modes de transport, selon les méthodes point et arc.

TABLEAU 9 – Élasticités directes NUTS 2

Grp	Pt R	Pt IVN	Pt Fer	Arc R	Arc IVN	Arc Fer
0	-2,270	-3,060	-3,520	-1,930	-0,060	-2,880
1	-4,880	-3,220	-2,010	-3,740	-0,310	-1,600
2	-6,460	-4,320	-2,250	-4,600	-0,210	-1,650
3	-0,190	-3,710	-3,700	-0,200	-3,520	-3,530
4	-9,540	-8,370	-5,360	-6,070	-1,790	-4,340
5	-2,170	-2,650	-3,940	-1,790	-0,090	-3,150
6	-3,470	-2,800	-2,040	-2,860	-0,130	-1,760
7	-4,310	-2,720	-1,840	-3,380	-0,470	-1,500
8	-0,040	-1,860	-1,840	-0,040	-1,850	-1,830
9	-0,760	-3,470	-3,690	-0,750	-2,540	-3,160

Source : Auteur. *R* = route ; *IVN* = voie navigable intérieure ; *Fer* = ferroviaire.

Dans l'ensemble, les élasticités directes obtenues présentent toutes un signe négatif, ce qui est conforme aux attentes théoriques : une augmentation du coût généralisé entraîne bien une diminution de la part modale du mode concerné. Ce point constitue une validation importante du modèle, d'autant plus que sa convergence n'était pas acquise au départ en raison des problèmes de colinéarité mis en évidence précédemment.

En ce qui concerne les ordres de grandeur, les élasticités-point s'étendent de $-0,04$ pour les produits chimiques transportés par route à $-9,54$ pour les minerais et ferrailles, également par route. Cette amplitude reste cohérente avec les valeurs généralement observées dans la littérature. Par ailleurs, les travaux de Beuthe et al. (2014) suggèrent que les élasticités propres du rail et des voies navigables sont en moyenne deux à trois fois plus élevées que celles de la route. Cette tendance est globalement vérifiée ici, puisque, pour la plupart des groupes, les modes ferroviaire et fluvial présentent des élasticités plus fortes en valeur absolue. Il existe toutefois des exceptions notables, en particulier pour les groupes 3 (produits pétroliers) et 9 (machines), où la demande routière apparaît structurellement peu sensible aux variations de coût en raison de la faible présence d'alternatives crédibles.

Le groupe 4, correspondant aux minerais et ferrailles, se distingue nettement du reste : il affiche les élasticités les plus élevées de l'ensemble, avec $-9,54$ pour la route et $-8,37$ pour les voies navigables intérieures. Ces résultats sont cohérents avec la nature de ces flux, des marchandises lourdes transportées sur des corridors fluviaux denses, et rejoignent les conclusions de Beuthe et al. (2014) pour ce type de fret.

À l'inverse, les groupes 3 et 9 présentent des élasticités routières nettement plus faibles, respectivement de $-0,19$ et $-0,76$. Dans le cas des produits pétroliers, les contraintes logistiques limitent fortement les possibilités de substitution entre modes, ce qui rend la demande routière peu réactive. Pour les machines manufacturées, la valeur élevée des biens transportés favorise le recours à la route, même en cas d'augmentation modérée des coûts.

Quant au groupe 8 (produits chimiques), ses résultats appellent à la plus grande prudence. Comme signalé précédemment, le paramètre θ_{time} y est vraisemblablement mal identifié, ce qui entraîne des parts modales biaisées et, par conséquent, des élasticités peu fiables. Pour cette raison, ce groupe est écarté de l’analyse comparative.

Il convient de rappeler que la fiabilité de ces élasticités est directement conditionnée par la qualité d’ajustement du modèle documentée au chapitre 3. Les groupes présentant les ρ^2 les plus élevés (groupes 1 et 4, avec respectivement 0,818 et 0,617) fournissent les élasticités les plus robustes. À l’inverse, les groupes 2 et 7, dont les parts modales prédites s’écartaient significativement des parts observées (respectivement -16 et -22 pp sur la part routière), produisent des élasticités à interpréter avec davantage de prudence, même si leur signe et leur ordre de grandeur restent cohérents avec la littérature.

4.2.2 Convergence entre élasticité-point et élasticité-arc

Pour la majorité des groupes et des modes, l’élasticité-arc est inférieure en valeur absolue à l’élasticité-point, ce qui est attendu : la méthode point évalue la sensibilité instantanée, tandis que la méthode arc intègre les effets de saturation. L’écart observé entre les deux méthodes reste globalement limité, généralement inférieur à 3 %, ce qui témoigne d’une certaine stabilité des résultats dans le cadre de la perturbation retenue de +10 %.

Il existe cependant une exception notable : pour les groupes où θ_{time} est fixé à zéro, les élasticités-arc associées à la voie navigable intérieure (IVN), sont systématiquement très faibles, alors que les élasticités-point correspondantes sont nettement plus élevées. Cette différence s’explique par un effet mécanique lié à la faible présence du mode fluvial dans les données. En effet, la méthode point mesure une sensibilité locale à partir des parts modales observées, sans intégrer la disponibilité réelle du mode sur chaque paire OD. À l’inverse, la méthode arc repose sur une simulation concrète d’une variation du coût fluvial sur l’ensemble des paires OD. Dans les cas où la voie navigable est absente, avec un coût nul et une disponibilité inexistante, cette perturbation ne produit aucun effet sur les flux.

Dès lors, comme le mode fluvial n’est accessible que sur une part restreinte des relations OD, l’impact agrégé de la variation de coût reste quasi nul, même si la sensibilité locale peut être élevée. En résumé, l’élasticité-arc pour la voie navigable reflète avant tout l’étendue géographique du réseau fluvial, plutôt que la véritable sensibilité des chargeurs à une variation de son coût.

4.2.3 Élasticités croisées

Le tableau 10 présente une sélection d’élasticités croisées pour les principaux couples de modes.

TABLEAU 10 – Élasticités croisées NUTS 2

Grp	Pt R→IVN	Pt R→Fer	Pt IVN→R	Arc R→IVN	Arc R→Fer	Arc IVN→R
0	1,360	0,910	2,160	0,040	2,300	1,610
1	1,840	3,050	0,170	0,010	0,120	2,190
2	2,200	4,260	0,056	0,002	0,039	2,850
3	0,090	0,100	3,610	3,890	3,990	0,090
4	3,270	6,270	2,100	0,450	2,050	3,910
5	1,730	0,440	2,210	0,054	2,440	2,030
6	1,350	2,120	0,690	0,030	0,590	1,560
7	1,710	2,590	0,120	0,012	0,090	1,940
8	0,010	0,030	1,830	1,830	1,830	0,010
9	0,490	0,270	3,200	2,560	3,470	0,480

Source : Auteur. Notation $X \rightarrow Y$: effet d'une hausse du coût de X sur la demande de Y .

Les élasticités croisées obtenues sont toutes positives, ce qui traduit bien la logique de substituabilité entre les modes de transport : lorsqu'un mode devient plus coûteux, une partie de la demande se reporte vers des modes concurrents. Ce phénomène apparaît particulièrement marqué pour les groupes où les modes ferroviaire et fluvial sont déjà bien présents, notamment les groupes 2, 4, 5 et 6. Dans ces cas, les élasticités croisées-point de type Route $\rightarrow$ IVN se situent entre 1,35 et 3,27, indiquant un potentiel de report modal non négligeable. Le groupe 4 se distingue une nouvelle fois avec la valeur la plus élevée (3,27), en cohérence avec les résultats de Beuthe et al. (2014) sur la sensibilité du transport fluvial aux variations des coûts routiers.

Par ailleurs, ces élasticités croisées ne sont pas symétriques. L'effet d'une variation du coût fluvial sur la demande routière reste systématiquement plus faible que l'effet inverse. Cette asymétrie reflète la position dominante de la route : une hausse du coût fluvial entraîne un report limité vers la route, déjà largement utilisée, tandis qu'une augmentation du coût routier peut générer un report plus marqué vers le fluvial, du moins sur les corridors où l'infrastructure est disponible.

4.3 Élasticités NUTS 3 : résultats, fiabilité et limites

4.3.1 Problème d'identification de θ_{time} sur données NUTS 3

Avant de présenter les résultats, il est indispensable de rappeler la source principale d'incertitude qui affecte les estimations NUTS 3. Comme détaillé au chapitre 3, le paramètre θ_{time} présente des valeurs aberrantes pour sept groupes sur dix : statistiquement significatives mais économiquement incohérentes, résultant de la quasi-colinéarité entre coût et durée dans les données NUTS 3.

Ce problème d'identification se manifeste également dans les indicateurs de qualité d'ajustement : bien que les ρ^2 de ces groupes soient apparemment élevés (entre 0,714 et 0,961), la comparaison avec les parts modales prédites révèle des écarts allant jusqu'à 32 pp, confirmant qu'il s'agit d'un surajustement sur la structure dominante des données. Les élasticités calculées pour ces groupes ne sont donc pas interprétables économiquement.

Pour ces groupes, l'optimiseur pousse θ_{time} vers des valeurs aberrantes, concentrant toute la masse de transport sur un seul mode et écrasant la part modale de la route vers zéro. Seuls les groupes 2, 4 et 7 présentent un θ_{time} identifiable et constituent donc les seuls résultats NUTS 3 exploitables économétriquement.

4.3.2 Résultats consolidés NUTS 3

TABLEAU 11 – Élasticités directes NUTS 3 (méthodes point/arc, +10 %)

Grp	Pt R	Pt IVN	Pt Fer	Arc R	Arc IVN	Arc Fer	Fiabilité
0	≈ 0	-4,100	-4,100	≈ 0	-4,100	-4,100	θ aberrant
1	-0,031	-1,390	-1,390	-0,031	-1,380	-1,390	θ aberrant
2	-0,450	-0,440	-0,380	-0,420	-0,330	-0,360	Fiable
3	≈ 0	-3,210	-3,210	≈ 0	-3,210	-3,210	θ aberrant
4	≈ 0	-13,770	-13,770	≈ 0	-13,350	-12,970	Fiable
5	≈ 0	-3,990	-3,990	≈ 0	-3,990	-3,990	θ aberrant
6	≈ 0	-3,500	-3,500	≈ 0	-3,500	-3,500	θ aberrant
7	-6,350	-3,370	-3,600	-4,580	-1,610	-3,030	Fiable
8	≈ 0	-3,530	-3,530	≈ 0	-3,530	-3,530	θ aberrant
9	≈ 0	-3,080	-3,080	≈ 0	-3,080	-3,080	θ aberrant

Source : Auteur. ≈ 0 = élasticité quasi nulle liée à une part modale routière artificiellement nulle (voir section 4.3.1).

4.3.3 Analyse des groupes fiables (2, 4, 7)

Le groupe 2, correspondant aux combustibles solides ($\theta_{time} = 0$), se caractérise par des élasticités directes relativement modérées : -0,45 pour la route, -0,44 pour la voie navigable et -0,38 pour le rail. Ces valeurs sont nettement plus faibles que celles observées au niveau NUTS 2 (respectivement -6,46, -4,32 et -2,25). Cette différence s'explique principalement par un effet d'agrégation : à l'échelle NUTS 3, la concurrence entre modes apparaît moins marquée, car la disponibilité des alternatives varie fortement d'une zone à l'autre. Ce constat rejoint les conclusions de Beuthe et al. (2014) sur l'influence du niveau d'agrégation dans les estimations.

Le groupe 4, celui des minerais et ferrailles ($\theta_{time} = 2,13$), se distingue une nouvelle fois par des élasticités très élevées au niveau NUTS 3, atteignant -13,77 pour les modes fluvial et ferroviaire. En revanche, l'élasticité de la route est quasiment nulle.

Ce résultat ne traduit pas un problème du modèle, mais une réalité structurelle : les constantes spécifiques aux modes sont extrêmement élevées pour le rail (23,45) et le fluvial (17,28), reflétant une concentration quasi totale des flux de minerais sur ces deux modes en Allemagne. La part modale de la route devient alors si faible que toute variation de son coût n'a pratiquement aucun effet au niveau agrégé. Pour le dire simplement : là où les camions ne transportent presque rien, une hausse du tarif routier ne change rien à l'échelle agrégée.

Enfin, le groupe 7 (engrais, $\theta_{time} = 0,065$) présente une forte sensibilité au coût routier, avec une élasticité-point de $-6,35$, tandis que les modes fluvial et ferroviaire affichent des valeurs plus modérées ($-3,37$ et $-3,60$). On observe également un écart plus marqué entre les méthodes point et arc pour ce groupe : l'élasticité-arc de la route descend à $-4,58$, ce qui suggère un effet de saturation non négligeable lorsque la variation de coût atteint 10 %.

4.3.4 Analyse des groupes avec θ_{time} aberrant

Pour les sept groupes caractérisés par un θ_{time} aberrant, l'élasticité-point associée à la route est proche de zéro. Cela ne traduit pas une absence réelle de sensibilité, mais plutôt une part modale routière artificiellement nulle, directement liée au problème d'identification de θ_{time} . Il est toutefois important de souligner que les valeurs de β_{GC} restent, pour ces mêmes groupes, cohérentes avec celles obtenues au niveau NUTS 2. Cela indique que le modèle parvient malgré tout à capter correctement la sensibilité globale au coût généralisé. La difficulté ne concerne donc pas le modèle dans son ensemble, mais se situe plus précisément dans la décomposition entre coût monétaire et valeur du temps.

4.4 Synthèse comparative et enseignements méthodologiques

4.4.1 Comparaison NUTS 2 vs NUTS 3

La comparaison entre les deux niveaux d'agrégation confirme les mises en garde formulées en section 1.6.3. Pour les groupes fiables (2, 4, 7), les élasticités NUTS 3 sont systématiquement différentes des élasticités NUTS 2, mais pas de façon aléatoire :

- le groupe 2 présente des élasticités NUTS 3 environ dix fois moindres, reflétant la plus grande hétérogénéité des flux à fine granularité ;
- le groupe 4 présente des élasticités NUTS 3 plus élevées, traduisant la plus grande homogénéité des corridors de minerais à l'échelle locale ;
- le groupe 7 présente des résultats globalement cohérents entre les deux niveaux.

Ces résultats illustrent que les élasticités ne sont pas des paramètres structurels universels, mais des mesures contextuelles sensibles à la fois au niveau d’agrégation et à la structure du réseau local. Cette conclusion, cohérente avec Jourquin (2025) et Beuthe et al. (2014), souligne l’importance d’estimer des élasticités spécifiquement calibrées pour le réseau étudié plutôt que d’importer des valeurs agrégées.

4.4.2 Synthèse de fiabilité et recommandations

TABLEAU 12 – Synthèse de fiabilité des résultats par groupe et niveau d’agrégation

Grp	NUTS 2	ρ^2 N2	NUTS 3	ρ^2 N3	Recommandation
0	Fiable	0,659	θ aberrant	0,943	Utiliser NUTS 2 comme référence
1	Fiable	0,818	θ aberrant	0,961	Utiliser NUTS 2 comme référence
2	Fiable	0,568	Fiable ($\theta = 0$)	0,989	Résultats exploitables aux deux niveaux
3	Fiable	0,462	θ aberrant	0,731	Utiliser NUTS 2 ; vérifier outliers
4	Fiable	0,617	Fiable	0,934	Résultats NUTS 3 préférables
5	Fiable	0,569	θ aberrant	0,793	Utiliser NUTS 2 comme référence
6	Fiable	0,528	θ aberrant	0,714	Utiliser NUTS 2 comme référence
7	Fiable	0,597	Fiable	0,988	Résultats exploitables aux deux niveaux
8	θ suspect	0,431	θ aberrant	0,786	Imposer $\theta = 0$ ou valeur exogène
9	Fiable	0,491	θ aberrant	0,724	Utiliser NUTS 2 comme référence

Source : Auteur. ρ^2 élevé mais non fiable : surajustement lié à θ_{time} aberrant (voir chapitre 3).

Implications opérationnelles

Les résultats de cette synthèse ont des implications concrètes pour les différentes parties prenantes du transport de fret.

Pour un **chargeur ou un logisticien**, les élasticités NUTS 2 estimées pour les groupes 0, 1, 3, 5, 6, 7 et 9 constituent des références fiables pour anticiper les effets d’une variation tarifaire sur la répartition modale à l’échelle d’un corridor européen. À titre d’exemple, une hausse de 10 % du coût routier pour les engrais (groupe 7) peut être associée à un report significatif vers le rail ou le fluvial, comme le confirment les élasticités croisées estimées au chapitre 4. En revanche, pour les produits pétroliers (groupe 3), dont les contraintes logistiques limitent les alternatives modales, une hausse tarifaire similaire entraînerait un report bien plus faible. Ces nuances sont directement exploitables dans la construction de scénarios de coûts ou dans l’évaluation de l’exposition d’une chaîne logistique à une évolution de la tarification routière.

Pour une décision opérationnelle à l’échelle locale (par exemple, le choix d’un prestataire ou d’un mode pour un flux régional en Allemagne) seuls les groupes 2 (combustibles solides), 4 (minerais et ferrailles) et 7 (engrais) disposent d’élasticités NUTS 3 exploitables. Pour les sept autres groupes, les résultats NUTS 3 ne doivent **pas** être utilisés pour prendre une décision opérationnelle : le problème d’identification de θ_{time} introduit des

biais structurels qui rendent ces estimations économiquement incohérentes. Dans ce cas, les élasticités NUTS 2 peuvent servir d'ordre de grandeur, en gardant à l'esprit qu'elles agrègent une diversité de corridors et peuvent sous-estimer ou surestimer la sensibilité locale.

Pour un **gestionnaire d'infrastructure ou un décideur public**, ces résultats plaident pour une calibration locale des élasticités avant toute décision de politique tarifaire ou d'investissement en infrastructure. Recourir à des valeurs agrégées issues de la littérature ou d'un niveau NUTS 2 pour justifier un projet d'infrastructure à l'échelle d'une région allemande revient à ignorer les effets de composition documentés dans ce travail. Lorsqu'une estimation NUTS 3 fiable n'est pas disponible, la solution la plus prudente consiste à imposer une valeur du temps exogène (voir section 5.4.1) et à traiter les résultats comme des bornes d'estimation plutôt que comme des paramètres opérationnels.

4.4.3 Enseignements méthodologiques

Ces résultats permettent de dégager plusieurs enseignements utiles pour une application du modèle à d'autres contextes géographiques.

Tout d'abord, lorsque la corrélation entre le coût et la durée est quasi parfaite, comme c'est souvent le cas au niveau NUTS 3, il apparaît préférable de contraindre le paramètre θ_{time} à zéro. En effet, laisser ce paramètre libre conduit généralement à des valeurs non identifiées, difficilement interprétables sur le plan économique. Dans ce cas, le recours au seul coût monétaire comme approximation du coût généralisé constitue une solution plus robuste du point de vue économétrique.

Ensuite, les résultats obtenus au niveau NUTS 2 peuvent être mobilisés comme référence pour évaluer la plausibilité des estimations issues de données plus désagrégées. Lorsque θ_{time} ne peut pas être identifié au niveau NUTS 3, les élasticités estimées à l'échelle européenne offrent une base de comparaison pertinente. Des écarts trop importants entre les deux niveaux (par exemple supérieurs à un facteur trois) doivent alors être interprétés comme un signal de possible problème d'estimation.

Enfin, le cas du groupe 8 (produits chimiques) nécessite un traitement spécifique. Ce groupe présente les difficultés d'identification les plus marquées, quel que soit le niveau d'agrégation considéré. Il est dès lors recommandé soit de fixer θ_{time} à zéro, soit de recourir à une valeur du temps exogène issue de la littérature, afin de garantir des résultats économiquement cohérents.

Ces résultats illustrent enfin l'importance de ne pas se limiter au pseudo- R^2 comme unique critère de validation d'un modèle de choix modal. Un ρ^2 élevé peut masquer un problème d'identification lorsque les données sont fortement concentrées sur un seul mode.

La confrontation systématique entre parts modales prédites et observées constitue un critère de validation complémentaire et indispensable, particulièrement dans le cas de données simulées où la colinéarité entre variables est structurelle.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et d’analyser les élasticités de coût estimées pour dix groupes de marchandises, en comparant deux niveaux géographiques. Les résultats obtenus à l’échelle NUTS 2 s’inscrivent globalement dans la continuité de la littérature existante : les élasticités sont systématiquement négatives, plus élevées pour les modes ferroviaire et fluvial que pour la route, et elles mettent en évidence un potentiel important de report modal pour les marchandises pondéreuses. À titre illustratif, l’élasticité directe de la route varie de $-0,19$ pour les produits pétroliers à $-9,54$ pour les minerais, tandis que la voie navigable atteint $-8,37$ pour ce même groupe.

À l’inverse, les résultats obtenus au niveau NUTS 3 mettent en évidence des limites méthodologiques plus marquées. La forte corrélation entre coût et durée dans les données simulées rend le paramètre θ_{time} difficile à identifier, ce qui affecte directement la fiabilité des élasticités. Pour sept groupes sur dix, les élasticités routières deviennent ininterprétables. Seuls les groupes 2, 4 et 7 fournissent des résultats exploitables à ce niveau de désagrégation. Ces derniers confirment néanmoins que les élasticités sont sensibles au niveau d’agrégation géographique, rejoignant les observations de Beuthe et al. (2014) et Jourquin (2025).

Sur le plan méthodologique, la confrontation des ρ^2 avec les parts modales prédites s’est révélée indispensable pour distinguer un bon ajustement réel d’un surajustement apparent : c’est ce double critère, et non le ρ^2 seul, qui permet de juger de la fiabilité des élasticités estimées.

Dans l’ensemble, la comparaison entre les deux niveaux souligne l’importance d’une calibration adaptée au contexte local, plutôt que le recours direct à des paramètres estimés à un niveau plus agrégé.

Chapitre 5

Limites et recommandations

5.1 Introduction

Ce chapitre synthétise les principales limites identifiées au cours de ce travail et formule des recommandations concrètes pour les recherches futures. Ces limites sont de trois ordres : méthodologiques, liées aux données, et relatives au périmètre de l’analyse.

5.2 Limites méthodologiques

5.2.1 Colinéarité structurelle entre coût et durée

La limite la plus fondamentale de ce mémoire est la quasi-colinéarité parfaite entre les variables de coût et de durée dans les données simulées par le modèle NODUS. Cette corrélation structurelle, plus prononcée au niveau NUTS 3 qu’au niveau NUTS 2, empêche l’identification correcte du paramètre θ_{time} pour sept groupes sur dix au niveau le plus fin. Elle constitue une contrainte inhérente aux données simulées qui ne peut pas être résolue par un changement de méthode d’estimation, mais uniquement par l’imposition d’une valeur du temps exogène ou par l’utilisation de données observées intégrant une variabilité réelle des coûts et des durées indépendante des distances.

5.2.2 Spécification du modèle nul

La log-vraisemblance nulle a été calculée en supposant une probabilité égale pour chaque mode disponible ($P_i^0 = \frac{1}{k}$). Une convention alternative, consistant à utiliser les parts modales observées comme référence, aurait conduit à des ρ^2 plus faibles mais potentiellement plus conservateurs. Le choix de la convention influe sur la valeur absolue du ρ^2 mais pas sur les conclusions qualitatives tirées de la comparaison entre groupes.

5.2.3 Choix méthodologiques propres à ce travail

Au-delà des limites inhérentes aux données ou à l’environnement d’estimation, plusieurs choix méthodologiques ont été faits dans ce mémoire qui méritent d’être explicitement assumés, car ils conditionnent directement l’interprétation des résultats.

Convention retenue pour LL_0 . La log-vraisemblance nulle a été calculée en supposant une probabilité égale pour chaque mode disponible ($P_i^0 = 1/k$).

Ce choix, justifié par l’indisponibilité d’une LL_0 native pour les modèles à poids dans Biogeme 3.2.11, entraîne des ρ^2 potentiellement plus élevés qu’une convention fondée sur les parts modales observées. Les conclusions qualitatives restent valides, mais les valeurs absolues de ρ^2 ne sont pas directement comparables à celles d’études utilisant une convention différente.

Le cas particulier du groupe 8. Le groupe 8 (produits chimiques) présente un θ_{time} suspect dès le niveau NUTS 2, et un θ_{time} aberrant au niveau NUTS 3. Le choix a été fait de le conserver dans l’analyse tout en signalant explicitement son caractère non exploitable, plutôt que de l’exclure ou d’imposer $\theta_{time} = 0$. Ce choix illustre bien les difficultés que peut poser l’estimation pour certains groupes, mais implique que les résultats qui le concernent ne doivent en aucun cas être utilisés à des fins opérationnelles ou comparatives.

Une valeur du temps estimée, pas imposée. Pour les groupes où θ_{time} est identifiable, sa valeur a été estimée librement plutôt qu’imposée à partir de la littérature (de Jong & Ben-Akiva, 2007). Ce choix permet de préserver la cohérence interne du modèle et d’éviter d’introduire des hypothèses externes non vérifiables sur ces données, mais il a pour conséquence de rendre les résultats sensibles à la colinéarité structurelle documentée au chapitre 2. L’imposition d’une valeur exogène aurait conduit à des estimations plus stables pour l’ensemble des dix groupes, au prix d’une hypothèse additionnelle sur la valeur du temps.

Absence de validation externe. Les élasticités estimées n’ont pas été confrontées à des élasticités observées ou à des estimations issues d’enquêtes directes auprès des chargeurs pour les mêmes groupes de marchandises. Cette absence de validation externe tient à la rareté des données de référence désagrégées à l’échelle NUTS pour le fret multimodal, et non à un oubli méthodologique. Elle implique que les résultats doivent être interprétés comme des estimations cohérentes avec la structure du modèle et des données, mais dont la validité prédictive reste à confirmer par des travaux empiriques ultérieurs.

5.3 Limites liées aux données

5.3.1 Périmètre géographique asymétrique

La comparaison entre le niveau NUTS 2 européen et le niveau NUTS 3 allemand introduit une asymétrie géographique : le premier couvre l’ensemble du continent, tandis que le second se concentre sur un seul pays. L’Allemagne, en tant que première économie européenne et nœud logistique continental, présente des caractéristiques de réseau spécifiques (réseau fluvial rhénan dense, forte orientation ferroviaire pour les marchandises lourdes) qui ne sont pas nécessairement représentatives de l’ensemble de l’Europe.

Les conclusions sur l'effet du niveau d'agrégation doivent donc être interprétées dans ce contexte particulier.

5.3.2 Absence de modes complémentaires

L'analyse se concentre sur trois modes de transport intérieur (route, rail, voie navigable) et ne prend pas en compte le transport maritime côtier ou le transport aérien, qui jouent un rôle croissant pour certains flux de marchandises à haute valeur ajoutée. Cette limitation est cohérente avec l'objet d'étude (transport continental de fret en vrac), mais elle restreint la portée des conclusions pour les groupes de marchandises à forte valeur unitaire comme les machines manufacturées (groupe 9).

5.4 Recommandations pour les recherches futures

5.4.1 Imposer une valeur du temps exogène

La recommandation la plus immédiate est d'imposer θ_{time} à partir de valeurs issues de la littérature, telles que celles proposées par de Jong et Ben-Akiva (2007), pour les groupes où l'identification est impossible. Cette approche permettrait d'obtenir des élasticités fiables pour l'ensemble des dix groupes, au prix d'une hypothèse supplémentaire sur la valeur du temps. Elle est particulièrement recommandée pour les applications pratiques du modèle en politique de transport.

5.4.2 Étendre l'analyse à d'autres pays NUTS 3

L'application du modèle à d'autres pays disposant d'un réseau fluvial dense, comme les Pays-Bas ou la Belgique, offrirait des points de comparaison utiles au niveau NUTS 3 et permettrait de tester si les conclusions sur la colinéarité structurelle sont spécifiques à l'Allemagne ou généralisables à l'ensemble de l'Europe du Nord-Ouest.

5.4.3 Explorer des spécifications alternatives

L'exploration de spécifications alternatives constitue une piste prometteuse pour contourner les problèmes d'identification documentés dans ce mémoire. Le modèle logit emboîté, regroupant par exemple le rail et le fluvial dans un même nid, permettrait de mieux représenter leur proximité concurrentielle. L'utilisation de données de transport observées plutôt que simulées, si elles étaient disponibles à une granularité suffisante, réduirait mécaniquement la colinéarité entre coût et durée et améliorerait l'identification de θ_{time} .

5.4.4 Utiliser des versions récentes de Biogeme

Les versions récentes de Biogeme (3.2.13 et suivantes) ou d'autres logiciels de choix discret comme Apollo (R) ou Larch (Python) produisent les indicateurs de qualité d'ajustement de façon native pour les modèles pondérés, ce qui éviterait le recalcul manuel de LL_0 et garantirait une meilleure comparabilité des résultats.

5.5 Conclusion

Malgré ces limites, les résultats obtenus dans ce mémoire apportent une contribution méthodologique utile à la littérature sur les élasticités de fret multimodal. La démonstration que le niveau d'agrégation géographique influence significativement les paramètres estimés, et que le pseudo- R^2 seul ne suffit pas à valider un modèle de choix modal, constitue un enseignement transférable à d'autres contextes d'analyse. Les recommandations formulées ci-dessus tracent une feuille de route claire pour les travaux futurs visant à améliorer la robustesse et la généralisabilité de ces estimations.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif d’estimer les élasticités de coût du transport de fret multimodal et d’évaluer dans quelle mesure ces élasticités sont sensibles au niveau d’agrégation géographique des données. La comparaison entre le niveau NUTS 2 européen et NUTS 3 allemand a permis d’apporter plusieurs réponses, tant sur le plan des résultats économiques que sur le plan méthodologique.

En ce qui concerne les résultats au niveau NUTS 2, le modèle à coûts généralisés fournit des estimations robustes pour la grande majorité des groupes de marchandises. Les élasticités directes sont toutes négatives, conformément aux attentes théoriques, et varient dans des proportions économiquement significatives : de $-0,19$ pour les produits pétroliers, dont les contraintes logistiques limitent les alternatives, à $-9,54$ pour les minerais et ferrailles, fortement concentrés sur des corridors où route, rail et voie navigable sont en concurrence directe. Les élasticités croisées confirment une logique de substituabilité entre modes, plus marquée pour les marchandises pondéreuses. Ces résultats s’inscrivent dans la continuité des travaux de Beuthe et al. (2001, 2014) et Jourquin (2025).

À l’échelle NUTS 3, les résultats sont plus contrastés. Pour trois groupes (combustibles solides, minerais, engrais), les estimations sont exploitables et cohérentes avec le niveau NUTS 2, bien qu’elles révèlent des différences d’amplitude liées à l’échelle d’analyse. Pour sept groupes sur dix, en revanche, la quasi-colinéarité parfaite entre coût et durée dans les données simulées empêche l’identification correcte de la valeur du temps, conduisant à des valeurs statistiquement significatives mais économiquement aberrantes.

Ce travail présente tout de même plusieurs limites qu’il est préférable de signaler. D’une part, la log-vraisemblance nulle (LL_0) n’étant pas produite par Biogeme 3.2.11 pour les modèles à poids personnalisés, a donc été recalculée manuellement en supposant une probabilité égale pour chaque mode disponible ($P_i^0 = 1/k$). Une convention alternative basée sur les parts modales observées, aurait donné lieu à des ρ^2 plus conservateurs et aurait ainsi limité la comparabilité directe avec d’autres études. Enfin, l’analyse ne se concentre que sur trois modes de transport et ne prend pas en compte le transport maritime ou aérien, dont le rôle est croissant dans certains flux de marchandises à haute valeur ajoutée.

Des pistes de recherche s’ouvrent à partir de ces résultats. En appliquant le modèle à d’autres pays dotés d’un réseau fluvial dense, comme les Pays-Bas ou la Belgique, on disposerait de points de comparaison utiles au niveau NUTS 3. Enfin, l’exploration de spécifications alternatives, comme le modèle logit emboîté ou l’imposition de valeurs du temps exogènes provenant de la littérature, offre une voie prometteuse pour éviter les problèmes d’identification documentés dans ce mémoire.

Bibliographie

- BEUTHE, M., JOURQUIN, B., GEERTS, J.-F., & KOUL À NDJANG' HA, C. (2001). Freight transportation demand elasticities : A geographic multimodal transportation network analysis. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 37(4), 253-266. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00022-3)
- BEUTHE, M., JOURQUIN, B., & URBAIN, N. (2014). Estimating Freight Transport Price Elasticity in Multi-mode Studies : A Review and Additional Results from a Multimodal Network Model. *Transport Reviews*, 34(5), 626-644. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.946459>
- BIERLAIRE, M. (2003). BIOGEME : A free package for the estimation of discrete choice models. *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*.
- COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN. (2025). Transport fluvial de marchandises. <https://inland-navigation-market.org/chapitre/2-transport-fluvial-de-marchandises-2/>
- de JONG, G., & BEN-AKIVA, M. (2007). A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. *Transportation Research Part B : Methodological*, 41(9), 950-965. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.05.002>
- EUROPEAN COMMISSION. (2025). Statistical pocketbook 2025 — EU Transport in Figures. https://transport.ec.europa.eu/facts-funding/studies-data/eu-transport-figures-statistical-pocketbook/statistical-pocketbook-2025_en
- EUROSTAT. (2007). Glossaire : Standard goods classification for transport statistics (NST). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Standard_goods_classification_for_transport_statistics_\(NST\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Standard_goods_classification_for_transport_statistics_(NST))
- FRIEDLAENDER, A. F., & SPADY, R. H. (1980). A Derived Demand Function for Freight Transportation. *The Review of Economics and Statistics*, 62(3), 432-441. <https://doi.org/10.2307/1927111>
- GREENE, W. H. (2020). *Econometric Analysis* (Global edition). Pearson.
- JOURQUIN, B. (2022). Mode choice in strategic freight transportation models : A constrained Box-Cox meta-heuristic for multivariate utility functions. *Transportmetrica A : Transport Science*, 18(3), 1325-1345. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1937375>

- JOURQUIN, B. (2025). Direct and cross cost elasticity estimations for freight transport in Europe using constructed dependent variables. *Research in Transportation Economics*, 111, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2025.101566>
- JOURQUIN, B., & BEUTHE, M. (2019). Cost, transit time and speed elasticity calculations for the European continental freight transport. *Transport Policy*, 83, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.08.009>
- LAROUSSE. (s.d). Définitions : Transport — Dictionnaire de français Larousse [Consulté le 13 janvier 2026]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/transport/79212>
- LE ROBERT. (s.d). Fret — Définitions, synonymes, prononciation | Dico en ligne Le Robert [Consulté le 13 janvier 2026]. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/fret>
- MANKIW, N. G. (2015). *Principes de l'économie* (4^e éd.). De Boeck.
- McFADDEN, D. (1974). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In P. ZAREMBKA (Éd.), *Frontiers in Econometrics* (p. 105-142). Academic Press.
- OUM, T. H., WATERS, W. G., & YONG, J.-S. (1992). Concepts of Price Elasticities of Transport Demand and Recent Empirical Estimates : An Interpretative Survey. *Journal of Transport Economics and Policy*, 26(2), 139-154.
- TRAIN, K. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation* (Second edition). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805271>
- VARIAN, H. R. (2010). *Intermediate Microeconomics : A Modern Approach* (8th ed.). Norton.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique | www.uclouvain.be/lsm