

ÉTUDES SUR LES COÛTS EXTERNÉS GÉNÉRÉS PAR LE TRANSPORT TRANSALPIN

Rapport final

Réf. C1575

13-04-2026



PERSONNE DE CONTACT :

GEORGES FUCHS

DIRECTEUR D'ÉTUDES

+32 (0)4 87 57 34 46

georges.fuchs@stratec.eu



CONTENU

0.	RÉSUMÉ	5
1.	INTRODUCTION	8
1.1.	CONTEXTE	8
1.2.	CHAMP D'APPLICATION ET PÉRIMÈTRE	8
2.	REVUE DE LA LITTÉRATURE	16
2.1.	ÉTUDES PORTANT SUR LES ALPES	16
2.2.	ÉTUDES EUROPÉENNES ET NATIONALES	27
3.	DISPONIBILITÉ DES DONNÉES	29
3.1.	DONNÉES DE TRAFIC	29
3.2.	ÉNERGIE ET TYPES DE VÉHICULES.....	31
3.3.	CONGESTION ROUTIÈRE	33
3.4.	ACCIDENTS.....	34
3.5.	POPULATION	34
4.	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	35
4.1.	CONCLUSION	35
5.	TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES	35
5.1.	VALEURS DE COÛT	35
5.2.	FACTEUR ALPIN POUR LA POLLUTION DE L'AIR.....	38
5.3.	ÉMISSIONS FERROVIAIRES.....	42
5.4.	ESTIMATION DU BRUIT.....	43
5.5.	POPULATION AFFECTÉE.....	46
5.6.	CONGESTION ROUTIÈRE	49
5.7.	ACCIDENTS.....	50
5.8.	TRAFIC FERROVIAIRE VOYAGEURS.....	51
5.9.	TRANSPORT FERROVIAIRE.....	52
6.	RÉSULTATS	54
6.1.	VALEURS ABSOLUES	54
6.2.	FRAIS EXTERNES DE TRANSPORT PAR TONNE.KM	57
6.3.	COÛTS EXTERNES PAR PASSENGER.KM	59
6.4.	COÛTS EXTÉRIEURS ROUTIERS PAR TYPE DE VÉHICULE.....	60
6.5.	COÛTS EXTERNES FERROVIAIRES PAR TYPE DE SERVICE.....	61
7.	CONCLUSIONS	61

LISTE DES FIGURES :

FIGURE 1: OBSERVATOIRE TRANSALPIN - FLUX DE MARCHANDISES À TRAVERS LES ALPES (TRT 2019).....	9
FIGURE 2: DENSITÉ DE POPULATION LE LONG DES 6 CORRIDORS (RAYON DE 500 M LE LONG DES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES).....	11
FIGURE 3: DENSITÉ MOYENNE DE POPULATION LE LONG DES 6 CORRIDORS	12
FIGURE 4 : ENVIRONNEMENT URBAIN – RURAL SUR LES CORRIDORS	12
FIGURE 5 : TOPOGRAPHIE LE LONG DES 6 CORRIDORS.....	13
FIGURE 6: PENTE DE LA ROUTE	14
FIGURE 7: TYPE D'ENVIRONNEMENT MONTAGNEUX (PART DE LA LONGUEUR TOTALE DU CORRIDOR).....	15
FIGURE 8: TYPE D'ENVIRONNEMENT MONTAGNEUX (LONGUEUR TOTALE EN KM).....	15
FIGURE 9: FACTEURS ALPINS POUR LA ROUTE ET LE RAIL SELON L'ÉTUDE GRACE DE 2006	17
FIGURE 10: APPROCHE PAR IMPACT PATHWAY POUR DÉDUIRE LES FACTEURS DE MONTAGNE (INFRAS 2017).....	20
FIGURE 11. TROIS ROUTES FRANÇAISES ANALYSÉES PAR CEREMA (2018).....	23
FIGURE 12: COÛT DU BRUIT DES POIDS LOURDS SUR LES CORRIDORS FRANÇAIS EN MONTAGNE VS. PLAINES SELON CEREMA 2018 .	24
FIGURE 13: LOCALISATION DE L'ANALYSE DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES PAR OEKOSCIENCE 2013 (CARTE PAR STRATEC).....	25
FIGURE 14: RÉSULTATS DES FACTEURS ALPINS POUR LES IMMISSIONS EN NOX (OEKOSCIENCE 2013).....	25
FIGURE 15: SOURCE : OBSERVATION ET ANALYSE DES FLUX DE TRANSPORT DE MARCHANDISES TRANSALPINES, RAPPORT POUR 2023	29
FIGURE 16. SOURCE : OBSERVATION ET ANALYSE DES FLUX DE TRANSPORT DE MARCHANDISES TRANSALPINS, RAPPORT 2023.....	30
FIGURE 17. SOURCE : RAPPORT I MONITRAF 2024	30
FIGURE 18: COMPARAISON DES VALEURS ATTRIBUÉES AUX ÉMISSIONS DE GES PAR TROIS SOURCES EUROPÉENNES	36
FIGURE 19: PENTE ROUTIÈRE LE LONG DES SIX CORRIDORS	41
FIGURE 20: LES FACTEURS ALPINS PAR POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES SELON OEKOSCIENCE 2013.....	42
FIGURE 21: CORRIDORS ROUTIERS ANALYSÉS DANS L'ÉTUDE CEREMA 2018	44
FIGURE 22: FACTEURS ALPINS POUR LE BRUIT SELON L'ÉTUDE CEREMA 2018	45
FIGURE 23. COMMUNES SUISSES AVEC PLUS DE 20 % DE RÉSIDENCES SECONDAIRES	47
FIGURE 24. RÉPARTITION DES RÉSIDENCES SECONDAIRES EN HAUTE-SAVOIE, FRANCE	47
FIGURE 25. « FICHE OUTILS » FRANÇAISES (DGITM 2019).....	49
FIGURE 26: ESTIMATION DE LA CONGESTION ROUTIÈRE POUR LES VÉHICULES LÉGERS.....	50
FIGURE 27 : ESTIMATION DE LA CONGESTION ROUTIÈRE POUR LES VÉHICULES LOURDS.....	50
FIGURE 28: ESTIMATION DE LA CONGESTION ROUTIÈRE POUR LES VÉHICULES LÉGERS.....	50
FIGURE 29 : ESTIMATION DE LA CONGESTION ROUTIÈRE POUR LES VÉHICULES LOURDS.....	50
FIGURE 30: ACCIDENTS PAR 1 000 VEHICULE.KM DANS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS DE CORRIDORS	51
FIGURE 31: DÉCÈS DUS À DES ACCIDENTS PAR 1 000 VEHICULE.KM DANS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS DE CORRIDORS	51
FIGURE 32: ESTIMATION DES TRAINS DE VOYAGEURS ET DU TRAFIC FERROVIAIRE EN 2023 SUR LES CORRIDORS	52
FIGURE 33: CORRESPONDANCES FERROVIAIRES ENTRE MARSEILLE ET GÈNES SUR LE CORRIDOR DE VINTIMILLE	52
FIGURE 34: CONNEXIONS INTERMODALES À TRAVERS LES ALPES - CARTES EUROPÉENNES DES TRANSPORTS	53
FIGURE 35: COÛTS EXTÉRIEURS TOTAUX POUR TOUS LES MODES (PASSAGERS ET FRET) EN EUROS 2023 POUR 2023.....	55

FIGURE 36: COÛT EXTERNE TOTAL MOYEN POUR TOUS LES MODES DE TRANSPORT PAR KILOMÈTRE DE CORRIDOR POUR LES PASSAGERS ET LE FRET	55
FIGURE 37: RÉPARTITION DES COÛTS EXTERNES PAR TYPE POUR CHAQUE CORRIDOR (PASSAGERS ET FRET).....	56
FIGURE 38: COÛTS EXTERNES RÉPARTIS PAR MARCHÉ (PASSAGERS VS. FRET).....	57
FIGURE 39: COÛTS EXTERNES RÉPARTIS PAR MODE (ROUTE VS. RAIL)	57
FIGURE 40: COÛTS EXTERNES MOYENS PAR TONNE. KILOMÈTRE PAR MODE ET CORRIDOR POUR LE FRET	57
FIGURE 41: COÛTS EXTERNES DU TRANSPORT ROUTIER POUR LE TRANSPORT COMBINÉ NON ACCOMPAGNÉ	58
FIGURE 42: COÛTS EXTERNES MOYENS PAR TONNE. KILOMÈTRE PAR MODE ET CORRIDOR POUR LE FRET, SANS CONGESTION ROUTIÈRE NI TRAINS AVANT ET APRÈS LE TRANSPORT	58
FIGURE 43: COÛTS EXTERNES MOYENS PAR PASSAGER. KILOMÈTRE PAR MODE ET CORRIDOR	59
FIGURE 44: COÛTS EXTERNES MOYENS PAR PASSAGER. KILOMÈTRE PAR MODE ET CORRIDOR, HORS CONGESTION	60
FIGURE 45: COÛT MOYEN PAR VÉHICULE-KILOMÈTRE DE ROUTE	60
FIGURE 46: COÛT MOYEN PAR TONNE.KILOMÈTRE DE ROUTE PAR TYPE DE VÉHICULE	60
FIGURE 47: COÛTS EXTERNES DU RAIL PAR TYPE DE TRAIN (PASSAGERS ET FRET)	61

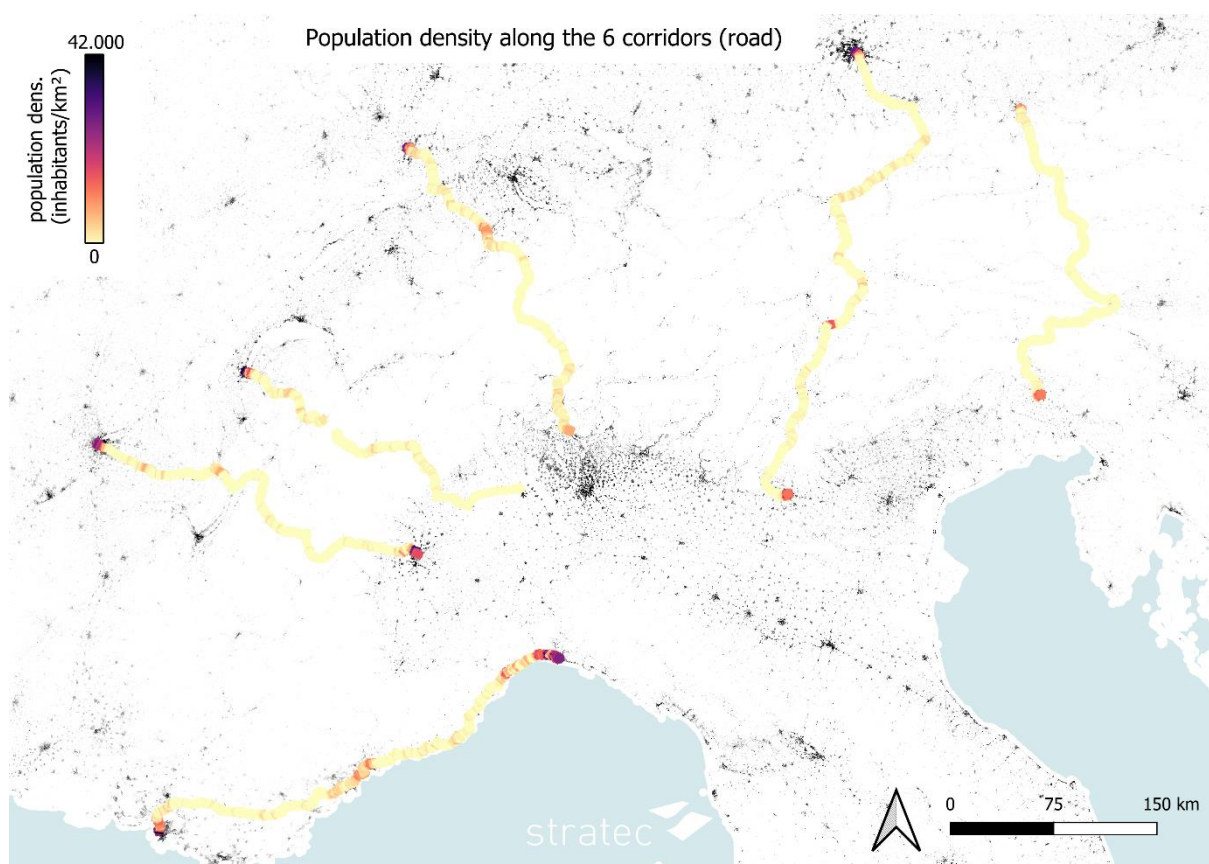
LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU 1: CONTENU DES PRINCIPALES ÉTUDES ALPINES SUR LES COÛTS EXTERNES.....	26
TABLEAU 2: CONTENU DES PRINCIPALES ÉTUDES EUROPÉENNES ET NATIONALES SUR LES COÛTS EXTERNES	28
TABLEAU 3: HYPOTHÈSES STRATÉGIQUES SUR LA NATIONALITÉ DES VÉHICULES ROUTIERS SUR CHAQUE CORRIDOR	31
TABLEAU 4: HYPOTHÈSES ADEME SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DES TRAINS DE MARCHANDISES	32
TABLEAU 5: INTENSITÉ CARBONE MOYENNE DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE DANS CHAQUE PAYS	33
TABLEAU 6: ÉVOLUTION DE LA CONGESTION SUR L'A2 ENTRE ERSTFELD ET BIASCA EN SUISSE (OFROU AVEC DONNÉES VMON ET VIASSUISSE)	34
TABLEAU 7: ANALYSE DE LA POPULATION OFFICIELLE COMPARÉE À LA POPULATION SAISONNIÈRE ESTIMÉE DANS LES CORRIDORS FRANÇAIS.....	48

0. RÉSUMÉ

L'**objectif de l'étude** est de **calculer les coûts externes du transport sur les principaux corridors alpins** pour les différents modes de transport disponibles, tant pour le transport de passagers que pour le transport de marchandises. Cette étude porte sur six corridors transalpins (voir carte ci-dessous) :

- Vintimille (FR/IT),
- Fréjus/Mont-Cenis (FR/IT),
- Chamonix/Mont-Blanc (FR/IT), unique itinéraire,
- Gothard (CH/IT),
- Brenner (AT/IT)
- Tauern/Katschberg (AT).



Cette étude est la première estimation complète des coûts externes du transport terrestre sur les corridors alpins. Elle s'appuie sur les données et études les plus récentes disponibles en 2025 et s'appuie fortement sur les études suivantes (entre autres) :

- Manuel européen sur les coûts externes (CE Delft 2019), actuellement en cours de mise à jour,
- Le bruit du transport routier dans un environnement alpin (Cerema 2018),
- La valeur de l'action climatique (France Stratégie, Quinet 2025).

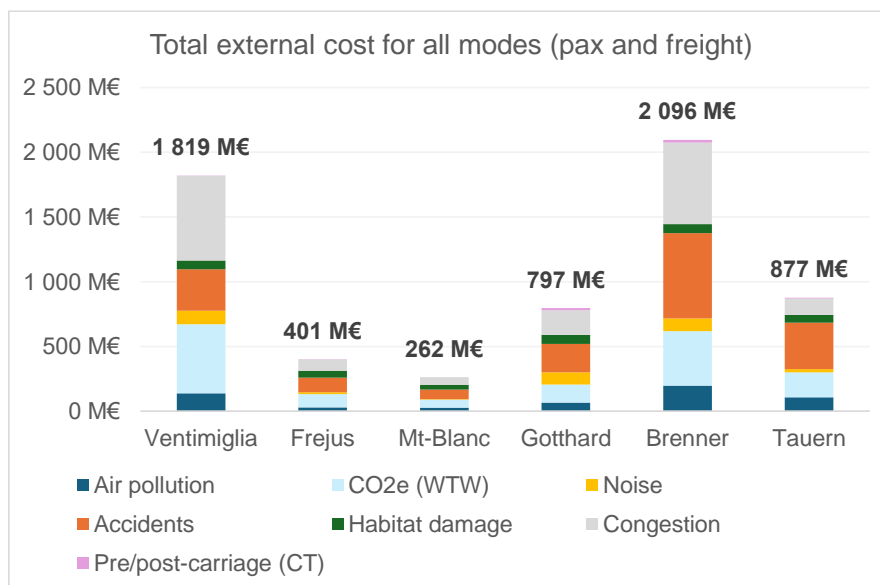
Une analyse SIG approfondie des corridors a été réalisée afin d'obtenir un calcul plus précis tenant compte des éléments suivants :

- Densité de population le long de chaque corridor,
- Caractéristiques de l'infrastructure (vitesse, nombre de voies, pente, altitude),

- Distinction des types d'environnements naturels (plaine / contreforts alpins / contreforts alpins côtiers / alpin).

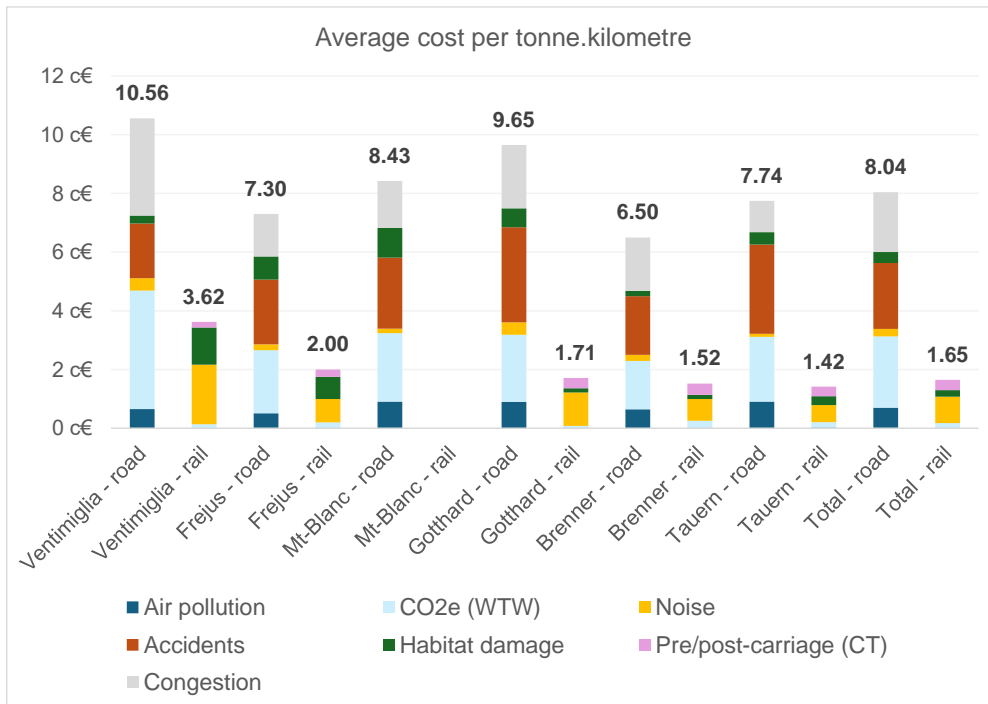
Le graphique ci-dessous présente les résultats en valeurs absolues des coûts externes pour chaque corridor. Les variations du coût externe total entre les corridors reflètent principalement :

- Le flux total de véhicules, en particulier le trafic routier – Brenner et Vintimille arrivant en tête,
- La longueur du corridor (les corridors plus longs ont un coût externe estimé plus élevé par véhicule traversant les Alpes),
- Les caractéristiques géographiques de chaque corridor (densité de population, pentes/gradients, environnement alpin, etc.).

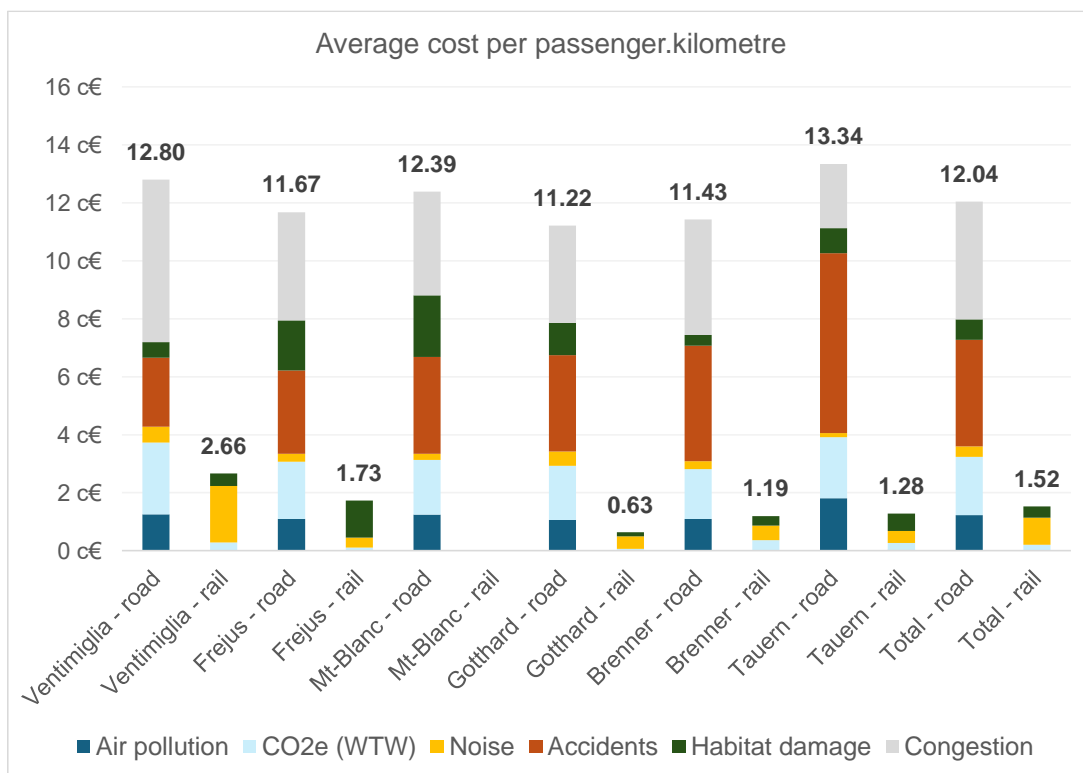


La comparaison des coûts externes par unité de demande (tonne-km ou passager-km)¹ nous permet de comparer l'impact relatif des différents modes de transport entre les corridors. Pour le fret, la route génère 5 fois plus de coûts externes par tonne-kilomètre que le rail, avec quelques variations entre les différents corridors en raison, entre autres, de la densité de population.

¹ 1 tonne-km = 1 tonne de marchandises transportées sur 1 kilomètre
 1 passager-km = 1 personne voyageant sur 1 kilomètre



Pour le transport de passagers, la route génère en moyenne 8 fois plus de coûts externes que le rail par passager-kilomètre.



1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Historiquement, les Alpes ont été à la fois une barrière et une interface entre différentes régions économiques européennes. Si la géographie oblige le trafic à emprunter certaines vallées alpines, le développement économique et l'intégration européenne ont entraîné une augmentation constante du trafic longue distance, qui reste largement dépendant du transport routier.

Les Alpes abritent des écosystèmes rares et fragiles (forêts, alpages, lacs, hautes montagnes rocheuses), mais aussi des vallées densément peuplées dont les habitants souffrent de la pollution et des nuisances causées par les activités de transport (pollution atmosphérique, bruit, accidents, etc.). L'altitude implique également une consommation d'énergie plus importante pour franchir les cols alpins, ainsi qu'une puissance de freinage plus importante pour redescendre dans les plaines.

Le **concept de coûts externes des transports** permet de prendre en compte et d'estimer les coûts générés par les activités d'un acteur mais supportés par d'autres acteurs. Ces coûts ne sont donc pas pris en compte par l'acteur responsable lorsqu'il prend une décision en matière de transport (choix du mode, choix de l'itinéraire, choix du moment du déplacement, etc.), puisqu'il n'a pas à en supporter les conséquences.

L'internalisation des coûts externes des transports est une solution préconisée par les économistes et un objectif politique de l'Union européenne. Elle vise à réintégrer les coûts externes d'une activité de transport sous la forme d'une tarification (redevances, taxes ou quotas d'émission négociables) correspondant au montant des coûts externes générés. L'opérateur de transport est alors tenu de prendre en compte ces coûts à travers le « **signal prix** ». L'objectif est d'améliorer le **bien-être de la communauté** en termes d'environnement et de santé sans pénaliser indûment l'économie par des réglementations (autorisations/interdictions, etc.).

L'**objectif de l'étude** est donc de **calculer les coûts externes du transport sur les principaux corridors alpins** pour les différents modes de transport disponibles, tant pour le transport de passagers que pour le transport de marchandises.

1.2. Champ d'application et périmètre

1.2.1. CORRIDORS

Six corridors ont été sélectionnés pour analyse parmi les huit corridors définis dans le rapport annuel iMONITRAF !, d'ouest en est :

- **Vintimille (FR/IT)** avec des infrastructures routières et ferroviaires le long de la mer Méditerranée reliant les villes de Marseille (France) et Gênes (Italie). Il s'agit du principal corridor routier entre la France et l'Italie (voir carte ci-dessous).
- **Fréjus/Mont-Cenis (FR/IT)** entre Lyon et Turin, avec à la fois une infrastructure ferroviaire (tunnel du Mont-Cenis) et routière (tunnel du Fréjus). Il s'agit du principal corridor ferroviaire entre la France et l'Italie.
- **Chamonix/Mont-Blanc (FR/IT)**, de Genève (Suisse) à la vallée du Pô à Ivrea (Italie), entre Milan et Turin. Avec le tunnel routier du Mont-Blanc, mais sans infrastructure ferroviaire, c'est le plus petit des corridors en termes de trafic, mais il est au cœur de l'environnement alpin.

- **Gotthard (CH/IT)**, de Bâle à Chiasso à la frontière italo-suisse, est le principal corridor de transport à travers les Alpes suisses, reliant le plateau suisse au canton du Tessin et plus loin à Milan (Italie) par des tunnels ferroviaires (tunnel de base et ancien tunnel alpin) et routiers.
- **Brenner (AT/IT)** : ce col de montagne situé à 1 370 m d'altitude est le corridor transalpin le plus important, car il relie l'Allemagne (Munich) à l'Italie (Vérone) par le rail et la route.
- **Tauern/Katschberg (AT)** est un important corridor de transport dans les Alpes orientales, dont la topographie est légèrement moins élevée. Il relie l'Autriche à l'Italie ou à la Slovénie et comprend à la fois des infrastructures routières (tunnel de Katschberg à l'est) et ferroviaires (tunnel de Tauern à l'ouest).

D'autres corridors autrichiens plus à l'est (Schoberpass, Semmering, Wechsel) sont également importants en termes de flux de trafic et ont été pris en considération, mais n'ont pas pu être inclus en raison de contraintes budgétaires.

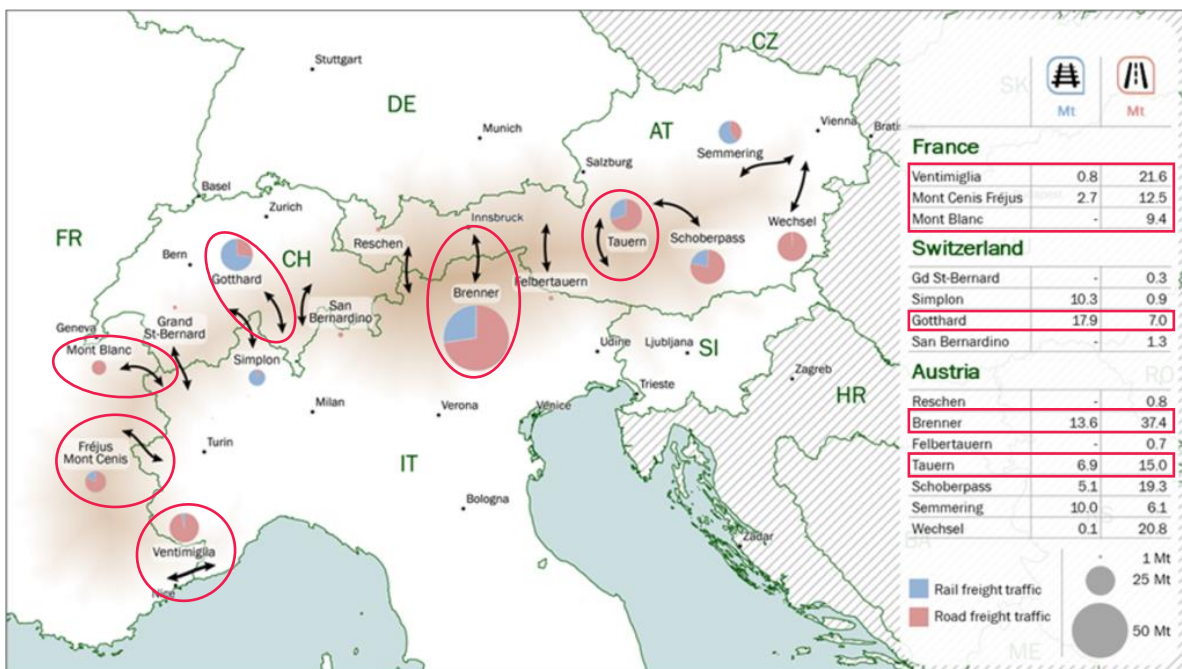


Figure 1: Observatoire Transalpin - Flux de marchandises à travers les Alpes (TRT 2019)

1.2.2. MODES DE TRANSPORT ET TYPES DE VÉHICULES

Pour le fret, les catégories suivantes sont analysées :

- **Itinéraire :**
 - Véhicules utilitaires lourds (VUL)
 - Véhicules utilitaires légers (VUL), bien qu'ils ne soient utilisés que de manière marginale pour le transport longue distance.
- **Rail :**
 - Trains complets (conventionnels)
 - Combinés (conteneurs maritimes ou caisses mobiles) et autoroute ferroviaire non accompagnée (semi-remorques uniquement),
 - Autoroute ferroviaire accompagnée (semi-remorque + tracteur + chauffeur).

Pour le segment passagers, nous avons sélectionné les catégories suivantes :

- **Route :**

- Voiture privée (PC), en distinguant le diesel, l'essence ou l'électrique (les hybrides étant considérés comme des moteurs à combustion),
- Autocars (diesel),
- **Rail :**
 - Trains à grande vitesse (TGV, Frecciarossa, ICE, etc.),
 - Train régional (TER, IR, etc.),
 - Train interurbain (IC) ou train de nuit (longue distance conventionnel).

1.2.3. TYPES DE COÛTS EXTERNES

L'étude prend en compte un éventail complet de catégories de coûts externes pertinentes pour le transport alpin :

- **Le changement climatique** dû aux émissions de gaz à effet de serre exprimées en termes monétaires.
- **Pollution de l'air** : coûts sanitaires et environnementaux dus aux émissions du tuyau d'échappement et à l'usure des freins/pneus.
- **Émissions du puits au réservoir** : émissions en amont issues de la production et de la livraison d'énergie.
- **Bruit** : impacts sur la santé et le bien-être humains, particulièrement dans les vallées étroites.
- **Accidents** : coûts liés à la sécurité routière et ferroviaire, blessures et décès.
- **Biodiversité et impacts sur les écosystèmes** : dégradation des habitats et des paysages par les infrastructures.
- **Congestion routière** : productivité et perte de temps dues aux goulots d'étranglement du trafic. Ce dernier coût est externe aux individus, mais interne au mode de transport, car il n'impacte ni les voisins ni le reste du monde.

1.2.4. ANALYSE GÉOGRAPHIQUE DES CORRIDORS

1.1.1.a. • Densité de population le long des corridors

La densité de population le long des corridors est un facteur majeur des coûts externes, les habitants locaux étant affectés par le bruit et la pollution atmosphérique. Elle a été estimée pour chaque section de corridor en identifiant la population dans une zone tampon de 500 mètres de chaque côté des infrastructures routières et ferroviaires. Les données démographiques proviennent du Global Human Settlement Layer (GHSL) Data Package pour 2023 publié par le Joint Research Centre de la Commission européenne.²

² Carioli, Alessandra ; Schiavina, Marcello ; MacManus, Kytt J ; Freire, Sergio (2023) : GHS-POP R2023A - Grille de population GHS multitemporelle (1975-2030). Commission européenne, Centre conjoint de recherche (JRC) [Jeu de données] doi : [10.2905/2FF68A52-5B5B-4A22-8F40-C41DA8332CFE](https://doi.org/10.2905/2FF68A52-5B5B-4A22-8F40-C41DA8332CFE)
PID : <http://data.europa.eu/89h/2ff68a52-5b5b-4a22-8f40-c41da8332cfe>

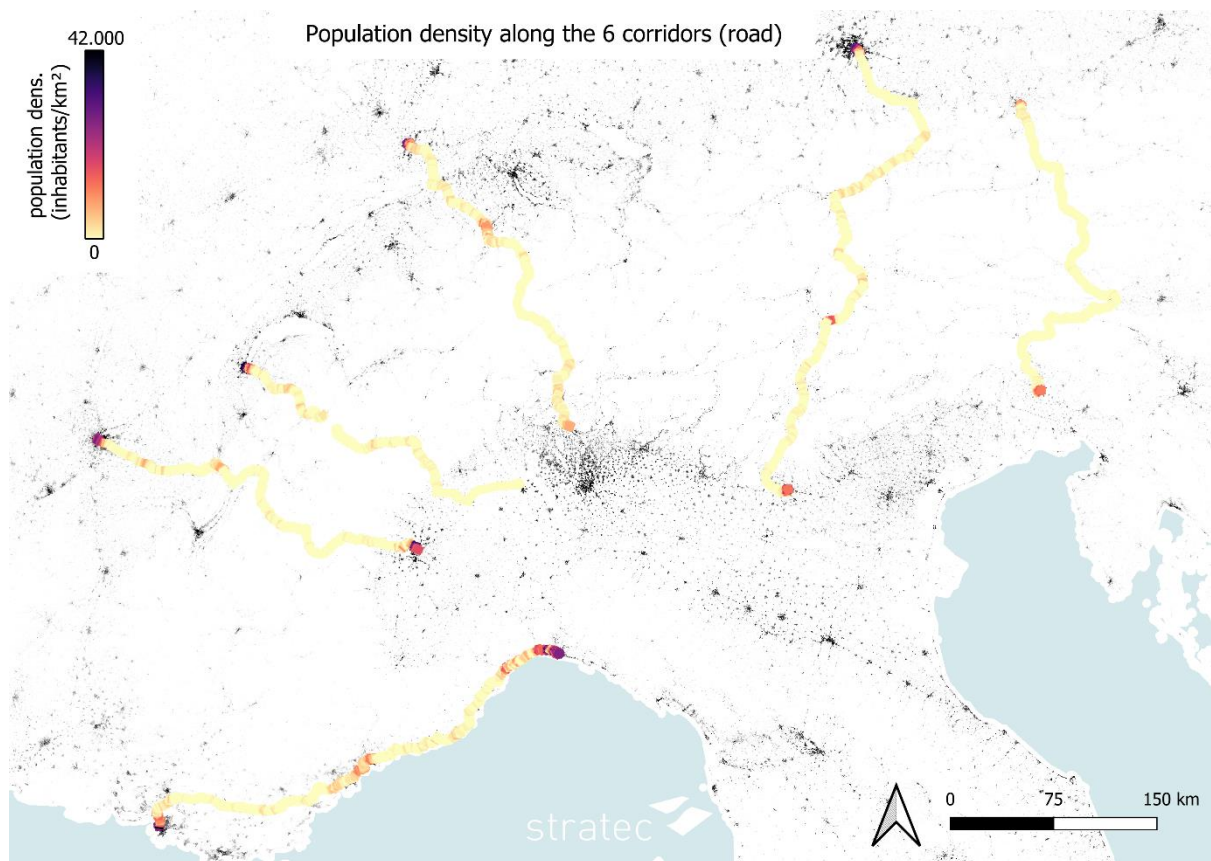


Figure 2: Densité de population le long des 6 corridors (rayon de 500 m le long des infrastructures routières)

Les 6 corridors présentent des différences notables de densité de population. Le corridor de Vintimille (Marseille – Gênes), le long de la côte méditerranéenne, traverse les zones les plus densément peuplées avec des villes comme Cannes et Nice, ainsi qu'une urbanisation quasi constante. Fréjus (Lyon – Turin) vient ensuite avec des villes secondaires telles que Chambé et Suse. Elle est suivie par le Gothard (Bâle – Chiasso) qui traverse le plateau suisse densément peuplé. Le Mont-Blanc (Genève – Ivree) et le Brenner (Munich – Vérone) viennent ensuite, tandis que Tauern (Salzbourg – Udine) est le corridor le moins peuplé.

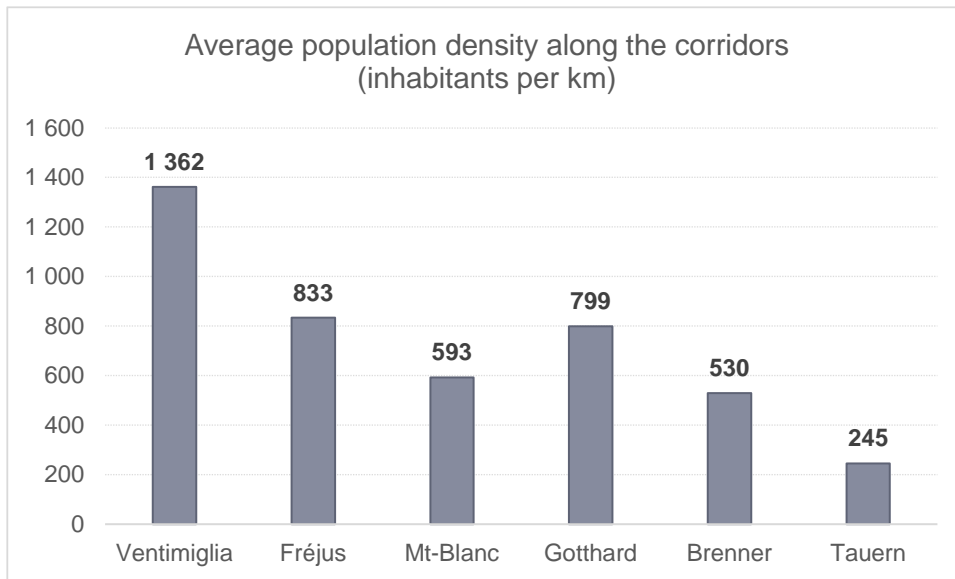


Figure 3: Densité moyenne de population le long des 6 corridors

En utilisant un seuil de 250 habitants par kilomètre carré comme limite entre zones rurales et urbaines (et suburbaines), ces données peuvent être résumées dans la répartition des environnements urbanisés le long de chaque corridor (voir graphique ci-dessous). Cette distinction, bien que quelque peu arbitraire, est importante pour plusieurs coûts externes pour lesquels les valeurs utilisées sont fixées pour les environnements urbains et ruraux.

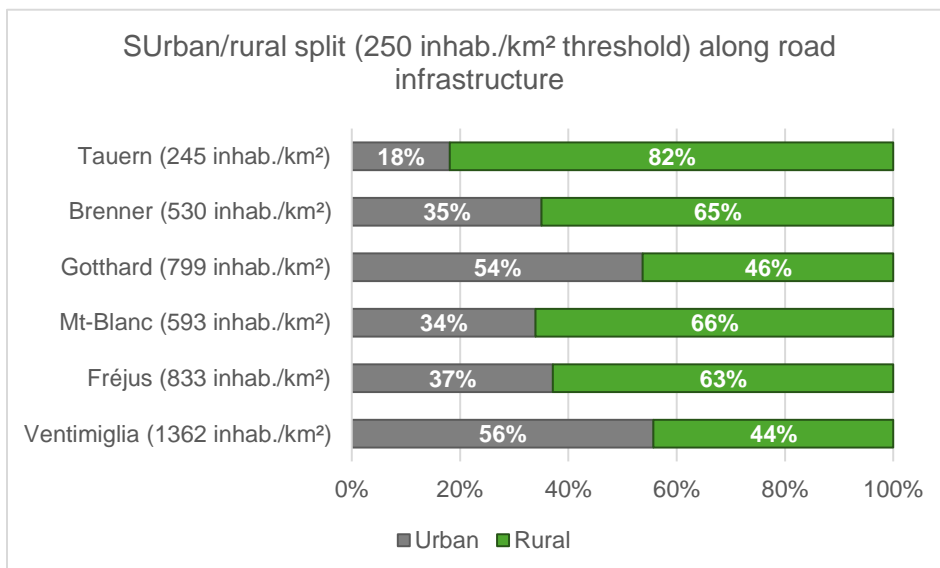


Figure 4 : Environnement urbain – rural sur les corridors

1.1.1.b. Infrastructures et topographie

Les infrastructures routières et ferroviaires sont décrites dans une base de données indiquant l'altitude, la pente moyenne (recalculée avec l'altitude à chaque extrémité d'une section), les tunnels, les vitesses maximales et le nombre de voies extraites d'OpenStreetMap avec un choix d'itinéraire calculé avec

OpenRouteService. Il existe un lien étroit entre infrastructures et pente, car les tunnels permettent aux véhicules d'éviter les itinéraires plus élevés à travers les cols de montagne.

Le tableau suivant présente l'altitude maximale et l'ascension cumulée totale sur chaque corridor routier. Fait intéressant, le corridor de Vintimille est à la fois le plus bas en altitude et celui qui a le plus d'ascension. Cela s'explique par le fait que ce corridor longe la lisière des Alpes le long de la côte et doit donc traverser de nombreuses crêtes, tandis que les autres corridors restent généralement au fond des vallées et n'ont qu'un seul grand col ou tunnel à traverser.

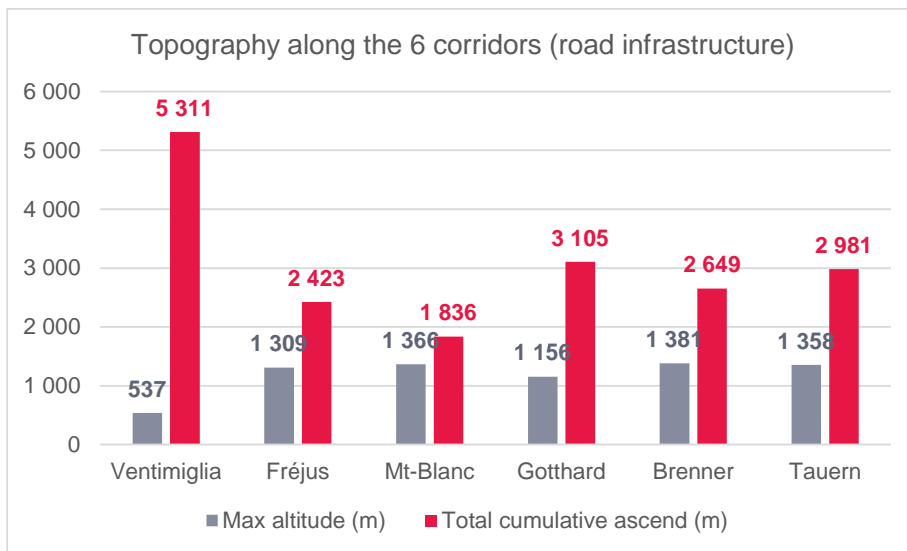


Figure 5 : Topographie le long des 6 corridors

La carte suivante montre les variations de la pente routière le long des couloirs en direction de l'Italie (pour chaque section, la valeur de la pente correspond bien sûr au panneau opposé dans l'autre direction). Des cartes affichant chaque corridor sont disponibles en annexe.

Pente routière le long des 6 corridors (en direction de

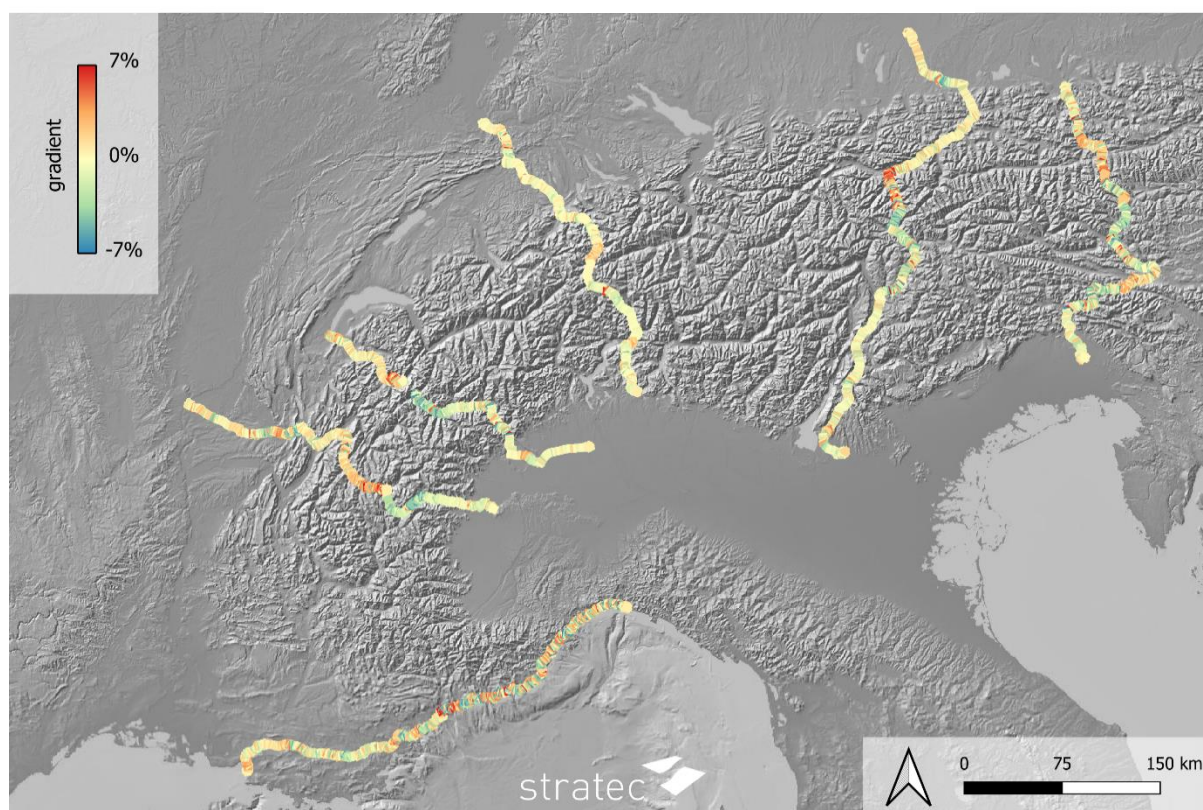


Figure 6: Pente de la route

1.1.1.c. Environnement naturel

Le type d'environnement montagneux est un facteur important pour certains coûts externes, tels que la pollution de l'air et le bruit. Pour cette étude, les sections de corridor ont été divisées en quatre catégories : plaine, contreforts alpins (catégorie intermédiaire entre plaine et montagnes proprement hautes), alpins, alpins côtiers (en raison de la différence de vent le long de la côte). Cette distinction repose sur l'appréciation propre des consultants de la géographie naturelle selon les cartes des principaux massifs.

Le graphique ci-dessous montre la part de chacune de ces catégories pour les corridors. Ces parts varient également selon la longueur de chaque corridor, car les couloirs plus longs tendent à s'éloigner plus loin des Alpes.

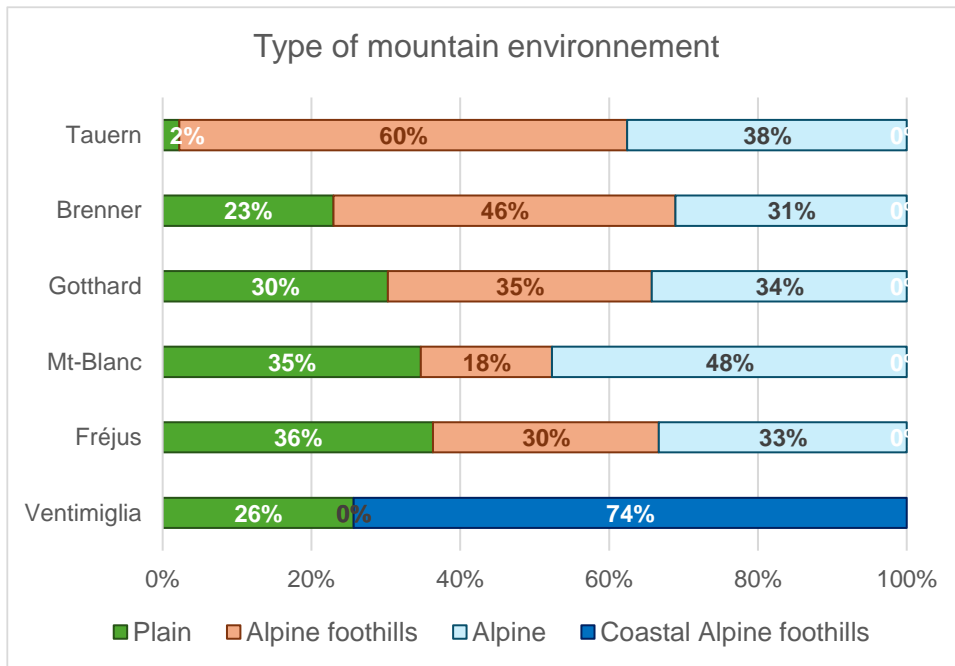


Figure 7: Type d'environnement montagneux (part de la longueur totale du corridor)

Le graphique suivant présente les valeurs absolues en valeurs absolues, c'est-à-dire les kilomètres de longueur du corridor.

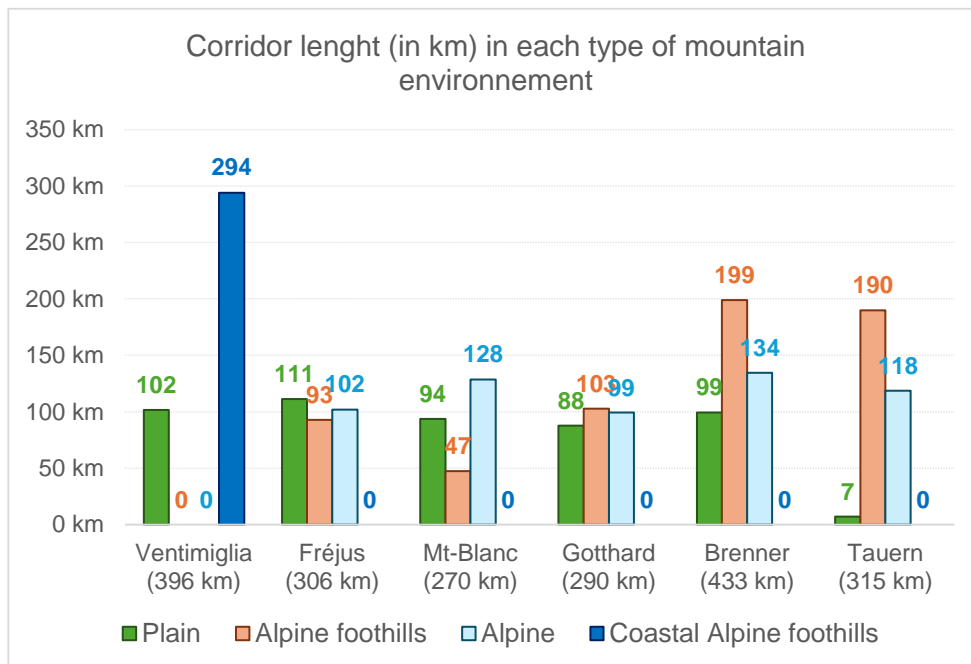


Figure 8: Type d'environnement montagneux (longueur totale en km)

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Une revue de la littérature a été réalisée pour développer et documenter le cadre méthodologique et définir la portée et les corridors qui seront étudiés en détail.

L'espace alpin se caractérise par des conditions géographiques, climatiques et socio-économiques uniques qui rendent particulièrement difficile l'évaluation des externalités liées au transport. Les travaux présentés ici visent à poser les bases d'une évaluation robuste et comparable des coûts externes supportés par le transport de marchandises et de passagers traversant les Alpes.

Le cadre méthodologique adopté dans cette étude s'appuie sur les valeurs de référence européennes existantes pour les coûts externes, complétées par des ajustements spécifiques aux Alpes. Le processus a débuté par une revue approfondie de la littérature des études antérieures consacrées aux coûts environnementaux et socio-économiques dans les régions montagneuses. S'appuyant sur ces connaissances, un inventaire systématique des sources de données a été réalisé pour évaluer la faisabilité des estimations quantitatives.

Les catégories de coûts externes ont été définies selon les normes européennes, mais une attention particulière a été portée à leur adaptation au contexte alpin. Par exemple, le gradient, l'altitude et les contraintes topographiques peuvent influencer la consommation d'énergie, la dispersion des polluants et la propagation du bruit. De plus, des corridors spécifiques ont été sélectionnés pour capturer la diversité des flux de transport alpins. Cette approche combine donc une base méthodologique paneuropéenne avec des raffinements locaux ciblés.

2.1. Études portant sur les Alpes

Les études examinées peuvent être divisées en plusieurs catégories principales selon leurs zones géographiques d'intérêt. Nous commençons par présenter des études spécifiques aux Alpes :

- GRACE, 2006. Generalisation of Research on Accounts and Cost Estimation (GRACE): Deliverable 3 - Environmental costs in sensitive areas.
- CEREMA, 2016. External Environmental Costs.
- EUSALP, 2017. [External costs in mountain areas](#). on behalf of EUSALP (EU Strategy for the Alpine Region), Zurich : INFRAS and Herry Consult.
- CEREMA, 2018. Assessment of external costs induced by noise in mountainous areas
- Oekoscience, 2013. The « Alpine factor » : Higher emissions per emission unit in Alpine valleys – Analysis of 2004-2012, on behalf of the Federal Office for the Environment FOEN.

1.1.1.d. GRACE 2006

Le projet GRACE (2006) a été parmi les premiers à analyser systématiquement les coûts environnementaux dans des zones sensibles. L'objectif de l'étude était de comparer les régions alpines et plates pour le transport routier et ferroviaire, et d'identifier les principales raisons des différences de coûts. Sa méthodologie, basée sur l'approche du « impact-pathway », identifiait les facteurs clés de montagne et les différenciait selon le transport de passagers et de fret. Les coûts étudiés concernaient la pollution de l'air, le bruit, l'intrusion visuelle, la valeur récréative des zones montagneuses / le tourisme, ainsi que les effets non environnementaux (accidents et coûts d'infrastructures).

Figure 5-1: Factors Alpine / flat for the different effects for road (car and HGV) and rail transport (passenger and freight transport)

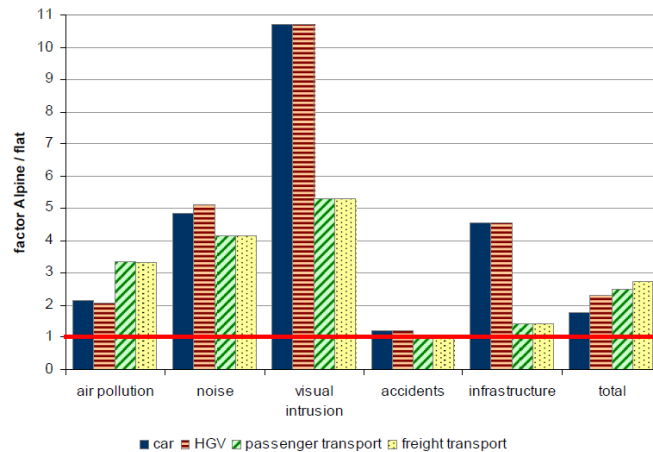


Figure 9: Facteurs alpins pour la route et le rail selon l'étude GRACE de 2006

Comme indiqué dans les tableaux ci-dessous, les auteurs ont spécifié les aspects suivants pour chaque coût externe :

- Pourquoi les coûts diffèrent entre les zones montagneuses et non montagneuses,
- Résumé de la méthodologie et des sources de données utilisées pour évaluer un « facteur montagne » (multiplicateur de coût externe dans un contexte alpin),
- Résultats de l'analyse.

Tableau 1: Particularités des coûts externes dans les Alpes selon l'étude GRACE 2006 (C. Nash et al.)

Coût externe	Facteurs de coût	Spécificité des zones montagneuses	Méthode	Route	Rail
Pollution de l'air	Gradients	Plus prononcé pour les voitures que pour les poids lourds	Calcul basé sur UBA et BUWAL 2004	x	
	Altitude	Émissions d'échappement plus élevées des moteurs à combustion interne à 1000 m d'altitude à cause d'une densité d'oxygène plus faible.	Calcul basé sur le BUWAL 1995 et l'EMPA 2002	x	
	Conditions topographiques et météorologiques	Les dégâts sont plus élevés dans les zones alpines parce que le même niveau d'émissions conduit à des concentrations (immissions) plus élevées, principalement dues à l'inversion de température entre le fond des vallées et les niveaux supérieurs.	Étude de cas basée sur deux études du projet iMONITRAF : évaluer les données provenant de différentes stations de mesure suisses	x	x
	Densité de population	Densité de population plus faible dans les zones alpines	Analyse de la densité de population dans la zone de peuplement permanent (définie comme la zone d'habitation,	x	x

			d'infrastructures et d'agriculture, ou en d'autres termes, la zone excluant les forêts, les terres agricoles alpines, les lacs et rivières, ainsi que les zones à faible ou pas de végétation).		
Bruit	Gradients	Les gradients augmentent la consommation d'énergie des véhicules. L'impact est plus important pour les poids lourds transportant des charges lourdes que pour les voitures plus légères.	Notre propre calcul basé sur l'EMPA 1997	x	
	Conditions topographiques et météorologiques	Deux effets sont pris en compte : l'inversion de température et l'effet d'amphithéâtre et les réflexions	Basé sur des données suisses, allemandes et autrichiennes trouvées dans une revue de littérature	x	x
	Densité de population	Densité de population plus faible dans les zones alpines	Calcul propre basé sur les données de l'autoroute du Gothard pour la route et de la ligne ferroviaire du Gothard pour le rail	x	x
Intrusion visuelle	Coût moyen uniquement	Plus sévère dans les zones alpines où les routes de circulation sont visibles de beaucoup plus loin. Volume de trafic plus élevé dans les Alpes	Analyser l'intrusion visuelle de l'autoroute du Gothard (ou de la ligne ferroviaire) en comparant le paysage scénétique avec et sans l'itinéraire de circulation selon la méthode NISTRA	x	x
Valeur récréative	Coût moyen uniquement	L'attrait touristique de la région alpine est fortement corrélé aux possibilités d'activités de plein air sans perturbation	Impossible de monétiser pour l'instant.	x	x
Accident	Taux de causalité	Les accidents dans les tunnels et les ponts peuvent entraîner des conséquences plus graves	Évaluer les données détaillées des accidents provenant des autoroutes suisses (nombre d'accidents et de victimes sur des tronçons de 500 m de l'autoroute suisse entre 1994 et 1998)	x	

Infrastructures	Coûts d'entretien	Les coûts d'entretien des routes sont plus élevés dans les zones alpines en raison des ponts, des tunnels et des ornières dues au trafic lent de poids lourds.	A évalué les données détaillées de la compagnie ferroviaire suisse (SBB) sur x		
			371 tronçons entre 2003 et 2005		

1.1.1.e. CEREMA 2016

La deuxième étude de cette revue de littérature a été menée par CEREMA en 2016. L'accent était mis sur les coûts environnementaux externes (pollution de l'air et bruit) liés aux véhicules lourds de marchandises. Cerema a mené 15 études entre 2003 et 2015, dont 4 études portant sur la région montagneuse. Dans ces études, des méthodes ont été développées pour calculer les coûts externes et les auteurs ont procédé à une comparaison des valeurs de pollution de l'air et de bruit avec les valeurs de référence de la directive européenne Eurovignette III.

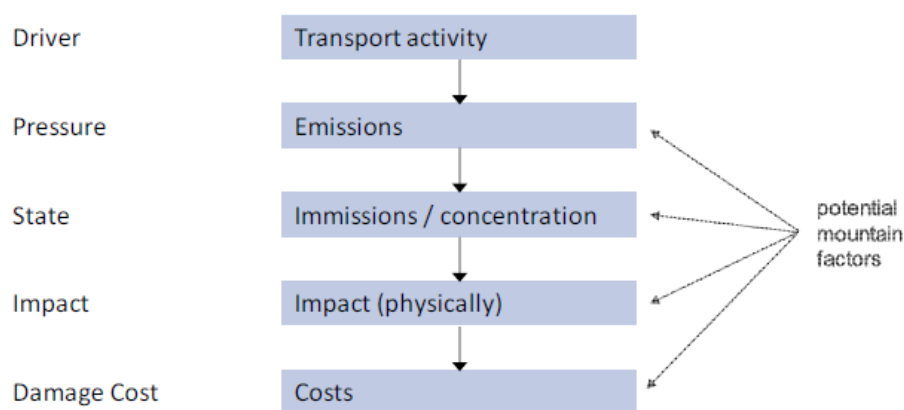
1.1.1.f. EUSALP (INFRAS 2017)

L'objectif de la troisième étude, l'étude EUSALP menée par INFRAS en 2017, était de valider et de mettre à jour les facteurs de montagne pour les coûts externes, c'est-à-dire le facteur par lequel les coûts externes en plaine peuvent être multipliés pour estimer le montant du coût externe en montagne. L'étude s'est principalement concentrée sur l'approche méthodologique de l'étude GRACE (2006) : une méthodologie basée sur les facteurs de coût et les « facteurs de différence de coût » (facteurs de montagne) le long du parcours d'impact. Les coûts externes étudiés étaient la pollution de l'air, le bruit, la nature et le paysage, les accidents et le changement climatique. L'accent était mis sur le transport ferroviaire et de fret, et l'étude reposait sur une approche par corridor (axée sur le Gothard et le Brenner).

Les auteurs ont conclu sur ces potentiels facteurs de montagne :

- Émissions : niveau d'émission plus élevé, par exemple dû aux pentes et à l'altitude,
- Concentration/immissions : concentration plus élevée de polluants atmosphériques, par exemple en raison des conditions topographiques et météorologiques,
- Impacts : impacts différents selon les preuves dose(concentration)-réponse, par exemple en raison d'autres densités de population ou d'autres facteurs de risque,
- Coût des dommages : différents facteurs de coût pour les coûts des dommages, c'est-à-dire en raison de facteurs de monétisation spécifiques à chaque pays, des prix spécifiques, etc.

Figure S-1: Impact pathway approach to derive mountain factors



Source : INFRAS.

Figure 10: Approche par impact pathway pour déduire les facteurs de montagne (INFRAS 2017)

Prendre en compte les facteurs montagneux spécifiques pour chaque niveau de l'approche par voie d'impact conduit à l'établissement d'un facteur global. Ce facteur exprime le coût par unité de performance du transport (véhicule-kilomètre) dans les régions montagneuses, comparé aux régions non montagneuses ou à la moyenne nationale.

L'analyse aboutit ainsi à la détermination d'un « facteur montagne » spécifique à une catégorie donnée de coûts externes (par exemple, coûts de pollution de l'air, coûts de bruit, coûts d'accidents) et à un mode de transport (route, rail).

Comme le montre le tableau ci-dessous, pour chaque coût externe, l'étude explique :

- Les raisons des différences : principaux facteurs de coût (par exemple, la pente et l'altitude de la pollution de l'air),
- La méthode d'évaluation : comment le « facteur montagne » a été calculé pour chaque conducteur,
- Les résultats : facteur montagne et comparaison avec des études antérieures.

Tableau 2: Particularités des coûts externes dans les Alpes selon l'étude EUSALP menée par INFRAS en 2017

Coût externe	Facteurs de coût	Spécificité des zones montagneuses	Méthode
Pollution de l'air	Gradient	Émissions plus élevées de PM10 dans les régions alpines en raison des pentes	Une fonction polynomiale décrivant les facteurs d'émission des poids lourds en fonction des pentes routières selon des facteurs d'émission spécifiques des poids lourds pour les pentes moyennes de 0 %, ±2 %, ±4 % et ±6 %. Inclinaison longitudinale calculée selon un modèle d'élévation SIG de la région -> Gradient moyen calculé (pondéré par la longueur de la section)

Pollution de l'air	Altitude	Les émissions des poids lourds augmentent avec l'altitude en raison d'une pression atmosphérique plus faible et d'une teneur en oxygène plus faible en altitude	D'après la recherche littéraire
Pollution de l'air	Conditions topographiques et météorologiques	Les inversions météorologiques ainsi que les flancs des vallées peuvent entraver la propagation verticale et horizontale des émissions de polluants atmosphériques et entraînent ainsi une concentration accrue dans les vallées montagneuses (pour la route et le rail).	Basé sur une étude portant spécifiquement sur les niveaux d'émissions mesurés dans différentes régions alpines et non alpines (Oekoscience 2013)
Pollution de l'air et bruit	Densité de population	Le nombre d'habitants touchés est plus faible dans les régions alpines en raison d'une densité de population plus faible	Population analysée dans les deux types de régions dans un rayon de 500 m de la route ou du chemin de fer (hors tunnels) : analyse SIG. Cela dépend en grande partie du choix de distance par rapport à l'autoroute ou au chemin de fer inclus
Bruit	Gradient	Les émissions de bruit augmentent avec les pentes montées et diminuent avec les pentes descendantes	Nouveaux modèles (projet sonRoad et CNOSSOS-EU) Ou modèle développé par EMPA (Grace 2006) + mise à jour de la valeur du gradient et des valeurs de vitesse du véhicule + multipliés par 0,5 pour prendre en compte les pentes montantes et descendantes
Bruit	Conditions topographiques et météorologiques	Niveaux d'émission sonore plus élevés dans les régions alpines en raison des inversions et de l'effet amphithéâtre	Aucune nouvelle étude depuis GRACE (2006)
Nature et paysage	Perte d'habitat, fragmentation de l'habitat et intrusion visuelle	Effets négatifs différemment pertinents dans les zones montagneuses : la perte et la fragmentation de l'habitat dépendent du type et de la qualité de l'écosystème perçu. L'intrusion visuelle	Les études suisses sur les coûts externes de la perte d'habitat de transport sont monétisées selon une approche de coût de restauration : - Approche du coût de restauration - Les photos d'aujourd'hui ont été comparées à des photos des années 1950 et les types (et zones)

		dépend de la qualité du paysage.	d'écosystèmes perdus ou fragmentés ont été analysés
Accidents	Coûts de construction et d'entretien	Basé sur les coûts de réduction : coût plus élevé en partie dû aux mesures de sécurité	Estimation du facteur montagne (réseau autoroutier autrichien, 2014) : - estimation de la part de la longueur du tunnel avec la nécessité d'un second tube pour des raisons de sécurité et non du volume de trafic - coûts unitaires pour les éléments d'infrastructure pertinents pour la sécurité et le fonctionnement hivernal
Changement climatique	Vulnérabilité (résilience)	La vulnérabilité des régions montagneuses au changement climatique est clairement plus élevée (risque accru d'événements météorologiques extrêmes et coûts d'adaptation plus élevés, ...)	Le changement climatique est un enjeu mondial avec des effets mondiaux dus aux émissions locales - > recommander de ne pas prendre en compte un facteur montagne pour les coûts liés au changement climatique, car cela ne serait méthodologiquement pas approprié

1.1.1.g. CEREMA 2018

La quatrième étude a également été menée par l'institut français CEREMA en 2018. L'objectif de cette étude était de poursuivre l'analyse de la revue de la littérature de 2016 en évaluant les coûts externes induits par le bruit sur deux routes transalpines françaises par rapport à une route en plaine :

- Pont d'Ain à Chamonix via Scientrier (corridor du Mont-Blanc),
- Portion française de l'axe Lyon-Turin (corridor de Fréjus),
- A7 entre Chasse-sur-Rhône et Valence Sud (corridor plain pour comparaison).



Figure 11. Trois routes françaises analysées par Cerema (2018)

Les résultats ont été obtenus en modélisant la topographie et le trafic routier afin d'évaluer l'exposition des populations.

La première étape de cette étude a été de calculer le coût de la pollution sonore due au trafic. Pour cela, deux méthodes ont été utilisées. Le premier est un calcul détaillé et sert à estimer les péages en raison de coûts externes supérieurs aux valeurs de référence. La seconde est l'application de valeurs unitaires supplémentaires (différenciées entre nuit/jour et route suburbaine/interurbaine) et elles sont multipliées par un maximum de 2 dans les zones montagneuses, justifiées par la dispersion, la pente routière, l'altitude ou les inversions de température.

La deuxième étape de cette étude a été l'évaluation du coût de l'exposition au bruit des populations. Cette méthode est expliquée en 4 étapes :

1. La valeur de référence appliquée en France s'exprime en €/personne exposée/an selon le niveau d'exposition au bruit
2. Indicateur d'exposition au bruit : Cartes stratégiques du bruit
3. Méthode de calcul des niveaux de bruit :
 - Modélisation des sources acoustiques,
 - Modélisation 3D de l'environnement,
 - Calcul des niveaux de bruit à 4 mètres au-dessus du sol et sur les façades des bâtiments résidentiels,
 - En comptant les populations exposées,
4. Facteur d'équivalence pour les HGV (Heavy Goods Vehicles, poids lourds) / VL (Véhicules Légers) : basé sur la méthode de calcul française (NMPB08).

Les résultats sont résumés dans les deux tableaux suivants. La comparaison entre l'environnement plat (plaine) et l'environnement montagneux montre que l'impact du bruit sur la population locale par habitant est plus faible dans la plaine, mais la densité de population plus faible compense largement cet effet par le coût externe total par véhicule.

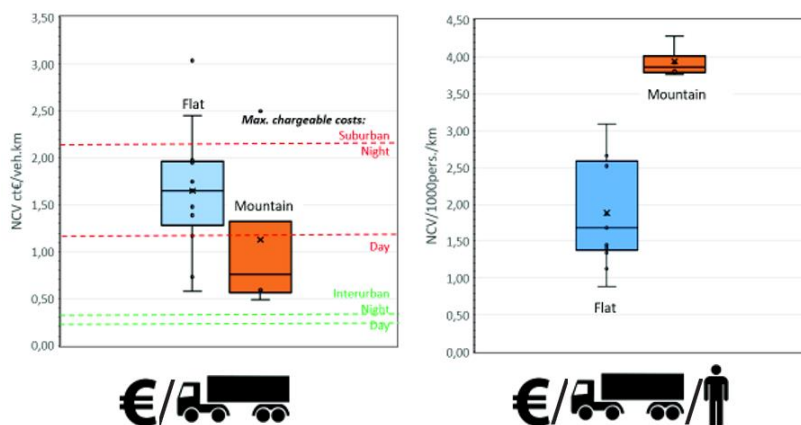


Figure 12: Coût du bruit des poids lourds sur les corridors français en montagne vs. plaines selon CEREMA 2018

Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous fournissent les détails de chaque section de route analysée. Les sections routières sont divisées en trois catégories : plates (plaines), mixtes plate/montagne (catégorie intermédiaire équivalente aux contreforts alpins) et montagne.

Tableau 3: Coût du bruit du transport routier sur les corridors français selon CEREMA 2018

Motorway	Subsections	Mountain/Flat	Length (km)	AADT Annual average daily traffic (veh/day)	%HDV (Heavy Duty Vehicles)	Exposed population density (inh./km ²)	Noise cost NCVj (ct€/veh.km)	NCVj/1000 Pers/km (ct€/veh./pers)
E21-E25	Pont d'Ain / Tunnel Vuache	Mix Flat/Mountain	11.8	20 307	14.1%	654	1.65	2.52
	Tunnel Vuache / Scientrier	Mix Flat/Mountain	38.7	29 061	8.6%	418	1.39	2.67
	Scientrier / Cluses	Mix Flat/Mountain	23.6	26 396	8.8%	983	3.04	3.09
	Cluses / Le Fayet	Mountain	21.1	17 216	11.2%	665	2.5	3.76
	Le Fayet / Chamonix	Mountain	35.6	13 876	15.3%	149	0.59	3.92
E70	St Priest N346/ A43-A48 Coiranne	Flat	26.2	73 170	10.5%	1 204	1.75	1.45
	A43-A48 Coiranne/L'Epine	Flat	12.6	71 874	13.1%	820	0.73	0.89
	L'Epine / A41-A43	Flat	5.5	47 387	12.7%	1 156	1.95	1.68
	A41-A43 / Aiton	Mix Flat/Mountain	32	32 040	12.0%	920	2.45	2.66
	Aiton / St-Jean-M	Mountain	37.4	10 229	22.0%	129	0.49	3.8
	St-Jean-M / Fréjus	Mountain	25	7 220	36.0%	217	0.93	4.28
E15	Chasse/Reventin	Flat	15.6	109 005	15.4%	1 311	1.48	1.13
	Reventin/St Rambert d'Albon	Flat	20.6	70 141	18.3%	870	1.17	1.34
	St Rambert d'Albon / Tain l'Hermitage	Flat	29.2	65 315	18.0%	311	0.58	1.87
	Tain l'Hermitage/Valence Sud	Flat	18.4	62 233	18.1%	1 350	1.98	1.41
Average (std. dev.)							1.51 (0.78)	2.43 (1.13)
Average « Flat »							1.26	1.39
Average « Mix Flat/Mountain »							2.13	2.74
Average « Mountain »							1.13	3.92
Ratio « Mountain/Flat »							0.897	2.82
Ratio « Mix/Flat »							1.69	1.97

1.1.1.h. Oekoscience 2013

Enfin, la dernière étude sur les Alpes examinée a été réalisée par Oekoscience en 2013. L'auteur a proposé des analyses détaillées du trafic routier et des émissions et d'émissions de polluants atmosphériques (PM10, carbone noir et composants organiques) dans les plaines suisses et les vallées alpines à 6 endroits en Suisse (voir carte ci-dessous).

Une comparaison des émissions estimées du trafic routier et des immissions mesurées localement (concentration mesurée) sur les routes transalpines (notamment le Gothard) a été réalisée. L'objectif de cette analyse était d'estimer un facteur pour prendre en compte l'effet de dispersion locale.



Figure 13: Localisation de l'analyse des polluants atmosphériques par Oekoscience 2013 (carte par Stratec)

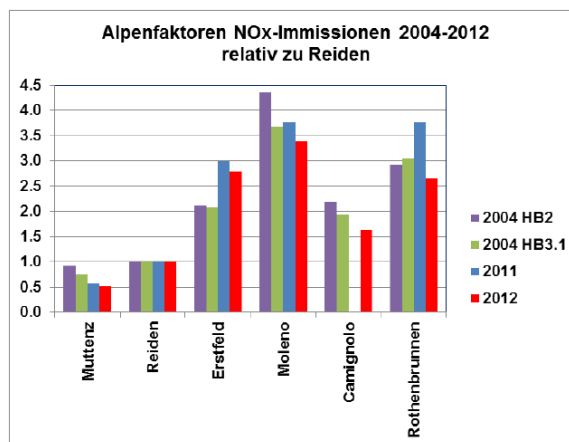


Figure 14: Résultats des facteurs alpins pour les immissions en NOx (Oekoscience 2013)

Les résultats complets sont présentés dans le tableau ci-dessous, pour lequel nous avons identifié le type d'environnement naturel selon la catégorie que nous utilisons pour notre propre analyse.

Tableau 4: Facteurs alpins de pollution de l'air selon Oekoscience 2013

Emplacement à Suisse	Alpine Environnement (Stratec)	NOx	PM10	EC	OC	Moyenne
Muttenz	Plaine	0.50	0.45	0.55	0.43	0.48
Reiden	Plaine	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Erstfeld	Alpine	2.80	1.70	2.20	1.60	2.08
Moleno	Alpine	3.38	1.90	3.20	2.40	2.72
Camignolo	Contreforts alpins	1.60	1.25	1.60	1.25	1.43
Rothenbrunnen	Alpine	2.65	3.10	2.90	3.15	2.95
	Plaine	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Contreforts alpins	2.1	1.7	2.1	1.7	1.9
	Alpine	3.9	3.1	3.6	3.3	3.5

1.1.1.i. Résumé du contenu des études alpines

Tableau 1: Contenu des principales études alpines sur les coûts externes

Sources	Type de coûts externes							Monétarisation ?	Marché	
	Accidents	Climat (GES/CO2)	Polluants atmosphériques	Bruit	Congestion	Amont / aval	Écosystèmes		Fret	Passagers
GRACE, 2006. Generalisation of Research on Accounts and Cost Estimation (GRACE): Deliverable 3 - Environmental costs in sensitive areas	X		X	X				X	X	X
CEREMA, 2016. External environmental costs of Transport			X	X				X	Poids lourds	
EUSALP, 2017. External costs in mountain areas. on behalf of EUSALP (EU Strategy for the Alpine Region), Zurich: INFRAS and Herry Consult	X	X	X	X			X		X	
CEREMA, 2018. Assessment of external costs induced by noise in mountainous areas				X				X	Poids lourds	
Oekoscience, 2013. The "Alpine factor": Higher emissions per emission unit in Alpine valleys			X						X	X

2.2. Études européennes et nationales

Le second type d'études inclus dans cette revue est constitué d'études européennes générales ou nationales sur les coûts externes. Cela inclut les éléments suivants :

- **Union européenne** : CE Delft, 2019. Manuel européen sur les coûts externes du transport.
Le Manuel européen de 2019 reste la référence pour l'évaluation des coûts externes, couvrant tous les principaux modes de transport ainsi que tous les États membres ainsi que la Suisse et la Norvège. Au moment de la présente étude, le manuel européen est en cours de mise à jour.
- **Suisse** : Ecoplan & Infrac 2024, Externe Effekte des Verkehrs 2021 - Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekte des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs.
Cette étude pour la fédération suisse fournit des estimations des coûts externes du transport de tous modes en termes d'environnement, d'accidents et de santé. Bien que ce soit intéressant, il ne se concentre pas sur le contexte alpin.
- **Allemagne** : Umweltbundesamt (UBA, ministère de l'environnement)
 - Convention méthodologique 3.1 pour déterminer les coûts environnementaux (travaux en cours sur une nouvelle version 4.0), 2020
 - TREMOD 2024 - Determination of transport emission values in 2023
- **France** :
 - DGITM 2019, Fiches outils pour l'évaluation socio-économique de projets d'infrastructures de transport. Il s'agit du cadre national pour l'analyse coûts-bénéfices des projets d'infrastructures de transport.
 - France Stratégie 2025, La valeur de l'action pour le climat, Rapport de la commission présidée par A. Quinet. Cette étude réévalue le coût du carbone selon la méthode d'évitement.
- **Autre** : Le Manuel des facteurs d'émission pour le transport routier (HBEFA) estimé par INFRAS fournit une vaste base de données des émissions et de la consommation d'énergie des véhicules routiers en Suisse, en Allemagne, en Autriche et en France. Elle prend en compte les principaux facteurs, en particulier : le type de route, la flotte (normes, type de moteur), la pente et la congestion.

Le tableau a été créé pour résumer les informations fournies par ces études :

Tableau 2: Contenu des principales études européennes et nationales sur les coûts externes

Sources	Type de coûts externes							Monétarisation ?	Marché		28SSSSSS donc les Alpes ?
	Accidents	Climat (GES/CO2)	Air Polluants	Bruit	Congestion	Amont / aval	Écosystèmes		Fret	Passagers	
CE Delft, 2019. Manuel européen sur les coûts extérieurs du transport	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Focus
Umweltbundesamt (UBA), 2024 (Allemagne). TREMOD emission values		X	X						X	X	
Umweltbundesamt (UBA), 2020. Convention méthodologique 3.1 pour déterminer les coûts environnementaux		X	X	X				X	X	X	
DGITM 2019, Fiches outils pour l'évaluation socio-économique de projets d'infrastructures de transport	X	X	X	X		X		X	X	X	
Ecoplan & Infras 2024, External effects of transport in 2021 – environmental, accident and health effects of road, rail, air and inland waterway transport	X	X	X	X		X	X	X	X	X	

3. DISPONIBILITÉ DES DONNÉES

La disponibilité des données est un enjeu majeur en raison du contexte multinational et du grand nombre de paramètres à prendre en compte (données de fret et de passagers, données spécifiques aux modes...).

3.1. Données de trafic

Les données de trafic différencient le nombre de véhicules (voitures, poids lourds, trains, etc.) et la demande (passagers ou tonnes), ainsi que le trafic transalpin (objet de l'étude) et le trafic local (hors champ de compétence, mais parfois important à prendre en compte).

Pour le transport de marchandises, tant routier que ferroviaire, il existe une grande disponibilité de données sur le trafic transalpin, comme le rapport 2023 « Observation and analysis of transalpine freight transport flows » publié par l'UE et la Suisse.³ Ce rapport fournit des données en tonnage pour la route et le rail pour tous les corridors pour 2023. Pour la route, les comptages de trafic sont disponibles pour les véhicules lourds (HGV) et pour le rail, il existe une distinction selon les différents marchés (conventionnel, combiné et accompagné).

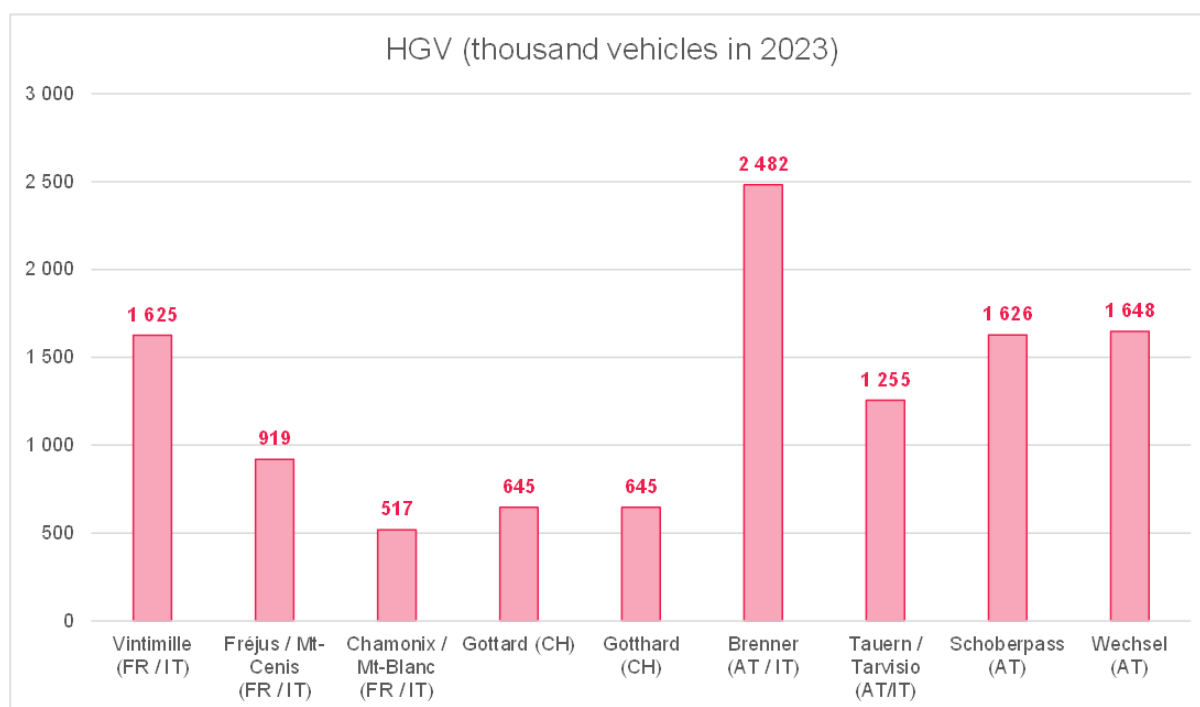


Figure 15: Source : Observation et analyse des flux de transport de marchandises transalpines, rapport pour 2023

³ Dörnenburg et al., 2025, Observation et analyse des flux de transports de marchandises transalpines - Rapport annuel 2023 bav.admin.ch/dam/fr/sd-web/uMdlIdtelmaeB/alpenobservatorium-2023.pdf

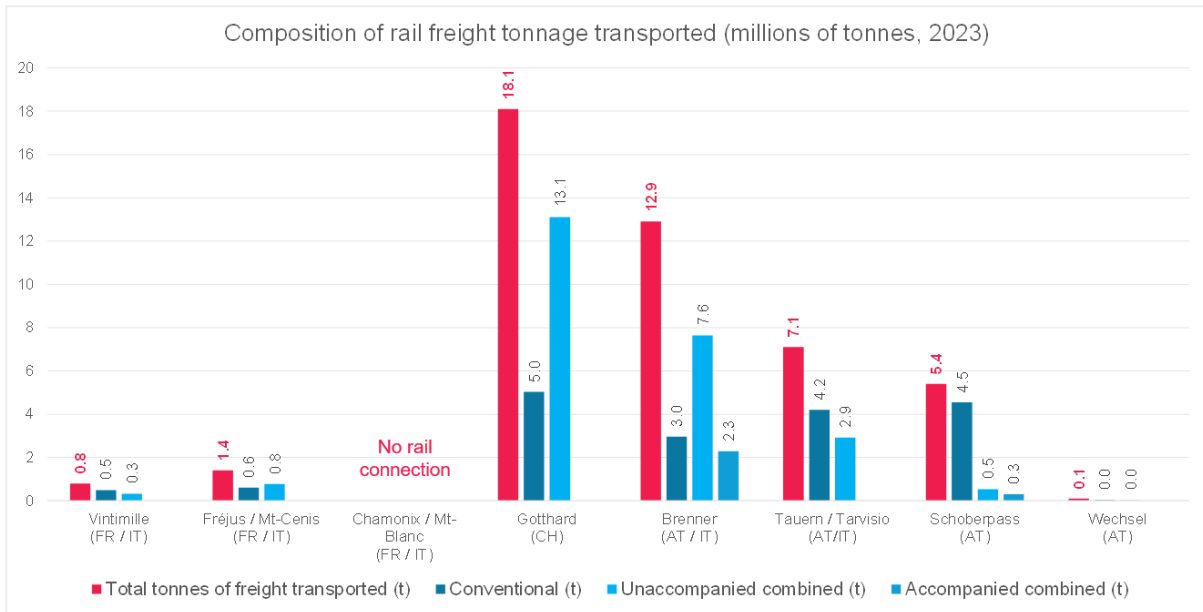


Figure 16. Source : Observation et analyse des flux de transport de marchandises transalpines, rapport 2023

Pour le transport de passagers, la disponibilité des données est plus faible. Les décomptes du trafic routier sont disponibles pour les véhicules légers (LV) pour la plupart des corridors pour l'année 2023 dans le rapport iMONITRAF.⁴ Certains comptages de trafic peuvent également être disponibles dans des sources locales (au cas par cas). Les décomptes du trafic routier ne font pas de distinction entre les poids lourds (marchandises) et les voitures (passagers) dans les décomptes.

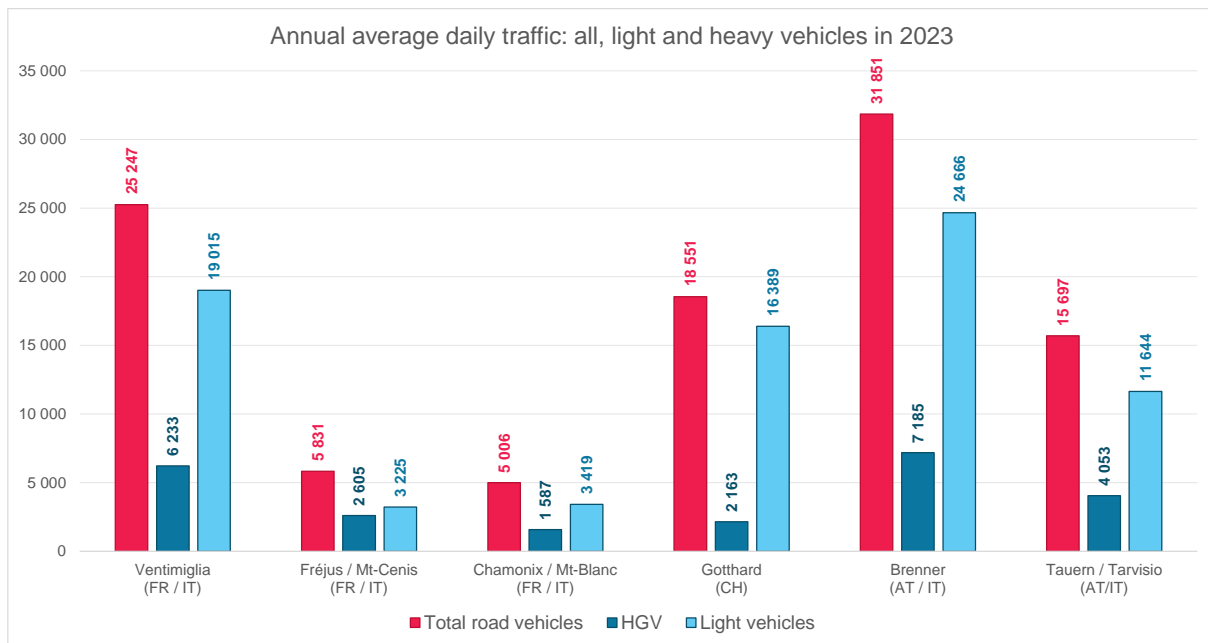


Figure 17. Source : rapport iMONITRAF 2024

⁴ Lückge et al., iMONITRAF ! rapport annuel 2024, 16 février 2025
imonitraf.org/fileadmin/downloads/3-Publications/AnnualReports_Studies/Annual_Reports/iMONITRAF_Annual_Report_2024.pdf

Pour le rail, aucune donnée publique n'a pu être trouvée. Les propriétaires de données dépendent du type de service ferroviaire :

- Les trains régionaux sont exploités sous le PSO (Public Service Obligation) et les données appartiennent aux autorités régionales,
- Les services commerciaux longue distance sont exploités en accès libre (TGV, Frecciarossa, ICE) et les données détenues par les opérateurs sont donc un secret d'affaires.

Cependant, il existe des données publiques sur les services ferroviaires (horaires), et des hypothèses peuvent être faites sur la capacité des trains et les taux d'occupation pour estimer le nombre de passagers.

3.2. Énergie et types de véhicules

Aucune donnée concernant les types de véhicules sur les différents corridors transalpins n'a été identifiée. Pour le transport routier, les données sur les flottes de véhicules sont disponibles par pays (type de moteur et classes européennes). Il est donc nécessaire de faire une hypothèse sur une répartition moyenne par pays pour chaque corridor selon notre propre compréhension de l'origine et destination probable des écoulements transalpins. Le tableau ci-dessous présente nos hypothèses.

Tableau 3: Hypothèses stratégiques sur la nationalité des véhicules routiers sur chaque corridor

		Vintimille (FR / IT)	Fréjus / Mt- Cenis (FR / IT)	Chamonix / Mt-Blanc (FR / IT)	Gotthard (CH)	Brenner (AT/IT)	Tauern / Tarvisio (AT/IT)
		Marseille (FR)	Lyon (FR)	Genève (CH/FR)	Bâle (CH)	Munich (DE)	Slazburg (AT)
		Genova (IT)	Torino (IT)	Novare (IT)	Chiasso (IT)	Vérone (IT)	Udine (IT)
Véhicules légers (LV)	AT					34%	40%
	CH			10%	50%		
	DE				25%	33%	20%
	FR	50%	50%	45%			
	ÇA	50%	50%	45%	25%	33%	40%
Volume total		100%	100%	100%	100%	100%	100%
Véhicules lourds de marchan dises (HGV)	AT					20%	30%
	CH			0%	20%		
	DE				40%	40%	30%
	FR	50%	50%	50%			
	ÇA	50%	50%	50%	40%	40%	40%
Poids lourds totaux		100%	100%	100%	100%	100%	100%

La consommation d'énergie routière et les émissions peuvent être mieux évaluées grâce à la base de données Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA) fournie par INFRAS pour les 5 pays, à l'exception de l'Italie.

Pour le transport ferroviaire, les données sur le matériel roulant dépendent dans chaque cas de l'entreprise ferroviaire. Il existe en tout cas un manque général de données sur la consommation d'énergie et les émissions du rail. Seule une consommation générale d'un ordre de grandeur de trains par kilomètre (kWh/train.km) des différents opérateurs nationaux est disponible pour les trains de

voyageurs, sans distinction selon le type de train, la vitesse ou la pente. Nous utilisons la valeur de **9,79 kWh/train.km** recalculée par Stratec avec les données suisses publiées par le CFF/SBB sur la consommation d'énergie par passager.km (7,77 kWh/100pax.km) et le nombre moyen de passagers par train (126 pax/train) en 2023.

Pour le fret, nous nous appuyons sur deux sources de données. Tout d'abord, l'étude de 2025 sur l'efficacité énergétique menée par le cabinet de conseil HERRY pour EUSALP, qui indique :

- « Force de traction requise pour déplacer (et non accélérer) une tonne brute en plaine : 35 Newtons (N) par tonne brute totale (GT) [c'est-à-dire 0 972 kWh par tonne brute pour une vitesse de 100 km/h],
- Force de traction requise, en plus de la force dans le plan par un millième de gradient pour déplacer une tonne brute sur cette pente (et non accélérer) : 10 N/Gbt [c'est-à-dire 0 278 kWh par tonne brute pour chaque ‰ de pente supplémentaire] »

Des recherches supplémentaires montrent cependant que « comparé au matériel de passagers, le potentiel de freinage régénératif dans les trains de marchandises est très limité. La principale raison est le rapport plus faible entre essieux moteurs et non motorisés. [...] Même en comparaison avec les trains de voyageurs tractés par locomotive, les trains de marchandises ont un inconvénient car ils sont beaucoup plus longs, plus lourds et ont une plus grande masse à freiner par des essieux non motorisés. »⁵

Deuxièmement, les valeurs publiées par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) française sur la consommation d'énergie des trains de marchandises (voir tableau ci-dessous) fournissent des valeurs moyennes par tonne.km par charge.⁶

Tableau 4: Hypothèses ADEME sur la consommation d'énergie des trains de marchandises

Charge	Tonnage associé	Consommation - Traction diesel (l/t.km)	Consommation – traction électrique (kWh/t.km)
Marchandises denses	600 t	0.0076	0.0278
Marchandises moyennes	520 t	0.0088	0.0322
Marchandises légères	400 t	0.0113	0.0415

Nous avons choisi de combiner ces deux sources en utilisant la consommation moyenne des trains de 600 tonnes fournie par l'ADEME comme valeur de référence, à laquelle nous ajoutons la consommation d'énergie supplémentaire par pour mille de pente positive. Nous utilisons ainsi une estimation prudente de la consommation d'énergie des trains de marchandises.

Enfin, des données sur les émissions d'électricité de la puissance à l'eau (production d'énergie) sont disponibles pour tous les pays européens pour l'année 2023 sur le site electricitymaps.com.

⁵ UIC, Regenerative braking in freight trains railway-energy.org/static/Regenerative_braking_in_freight_trains_43.php

⁶ Données en ligne d'ADEME sur la consommation d'énergie des transports prod-basecarbonesolo.ademe-dri.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?ferroviaire.htm

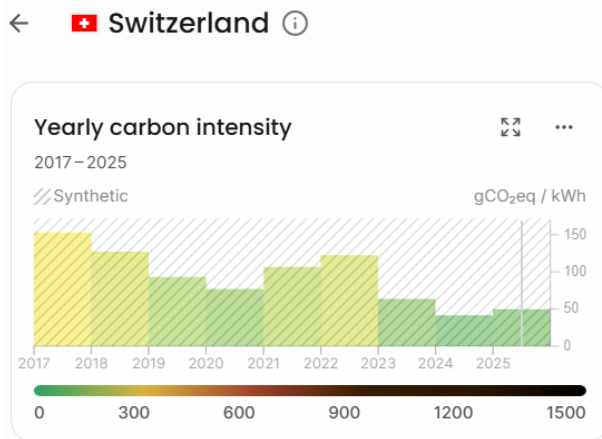


Tableau 5: Intensité carbone moyenne de l'énergie consommée dans chaque pays

Pays	Intensité carbone (CO ₂ eq/kWh)
AT	113
CH	62
DE	370
FR	53
ÇA (Nord)	296

Pour le transport ferroviaire, la consommation d'énergie correspond pour chaque kilomètre au pays dans lequel le train circule et est alimenté en électricité par la caténaire. Pour la route, la liaison est moins directe car les véhicules électriques peuvent se recharger à différentes étapes de leur trajet. Nous supposons que la recharge a lieu dans chaque pays selon les mêmes hypothèses que le pays d'origine des véhicules.

3.3. Congestion routière

Aucune étude générale ou données n'ont été trouvées sur la congestion routière alpine. Certaines informations sont disponibles à certains goulots d'étranglement, avec des prévisions destinées aux usagers de la route lors des journées vertes, jaunes ou rouges pendant les saisons idéales à Gotthard, Brenner, Fréjus et Mont-Blanc. De plus, la congestion en temps réel peut être mesurée par applications en ligne et des caméras.

La difficulté avec la congestion est qu'elle n'est pas linéaire et qu'un jour donné n'est pas nécessairement représentatif d'un autre jour ou de l'année. Pour estimer les moyennes annuelles, il faudrait des données sur les temps de trajet annuels et/ou un modèle de trafic fin avec différentes périodes, ce qui dépasse le cadre de cette étude.

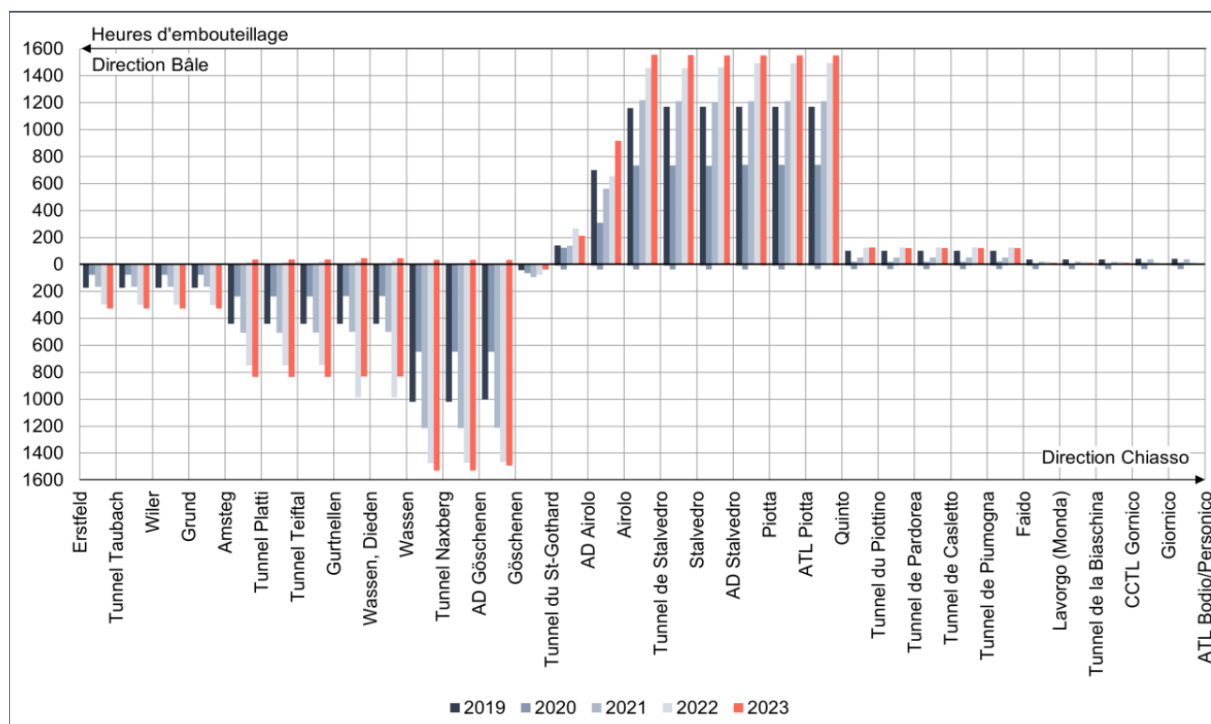
L'ALPIFRET 2011, Observatoire du trafic de marchandises transalpin - rapport annuel 2010, fournit certaines données sur la congestion routière à la frontière franco-italienne, exprimées en heure.km (voir ci-dessous), mais celles-ci sont trop anciennes et trop limitées géographiquement pour être utilisées.

La Suisse publie des données précieuses sur la fluidité du trafic routier pour 2023, en se concentrant sur le tunnel du Gotthard (voir graphique ci-dessous).⁷

⁷ Office fédéral des routes (OFROU), Évolution et fluidité du trafic en 2023, février 2025

astra.admin.ch/dam/astra/fr/dokumente/abteilung_strassennetzallgemein/verkehrsentwicklung_verfuegbarkeit_nationalstrassen_jahresbericht_2023.pdf.download.pdf/Trafic_et_disponibilite_des_routes_nationales-Rapport_annuel_2023.pdf

Tableau 6: Évolution de la congestion sur l'A2 entre Erstfeld et Biasca en Suisse (OFROU avec données VMON et Viassuisse)



3.4. Accidents

Pour le transport routier, Eurostat publie le nombre d'accidents de la route par région NUTS 3 entre 1999 et 2023, mais il n'existe aucune autre information sur les types de véhicules ni sur la localisation précise des accidents. Des ensembles de données nationaux sont disponibles, mais sous différents formats et avec des variations dans le type d'informations fournies. Stratec a réussi à accéder et à traiter les données SIG sur les accidents de la route pour la Suisse, l'Italie et la France. Des données pour l'Autriche ont également été trouvées, mais dans un format SIG différent qui ne pouvait pas être exploité.

Les bases de données nationales utilisées sont les suivantes :

- Suisse : [carte des accidents de la circulation suisse](#)
- Italie : [lis.aci.it/#/datiLocalizzati/2023/01/001](#)
- Autriche : [statistik.at/atlas/verkehrsunfall/](#)
- France : [onisr.securite-routiere.gouv.fr/en/crash-map](#)

Les accidents ferroviaires sont des phénomènes rares et ne peuvent être analysés que sur un large périmètre géographique et sur une longue période. Bien qu'un accident de train de marchandises ait eu lieu dans le tunnel de la base du Gotthard en 2023 (sans victimes), nous supposons que les accidents ferroviaires sont trop rares pour être évalués.

3.5. Population

Des données sur la population sont disponibles auprès de sources européennes et nationales selon les frontières administratives. Les données démographiques proviennent du Global Human Settlement

Layer (GHSL) Data Package pour 2023 publié par le Joint Research Centre de la Commission européenne.⁸

4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'estimation des coûts externes sera réalisée selon une approche structurée. L'approche est divisée en trois phases. La première phase consiste à obtenir les valeurs standard européennes pour les effets externes. La deuxième phase consiste à ajuster ces valeurs standard au contexte alpin et à ajouter les spécificités des débits et itinéraires observés par corridor et mode. Enfin, la troisième phase consiste à estimer les effets externes par corridor et à comparer ces résultats aux effets externes observés localement.

4.1. Conclusion

La phase 1 a défini la base méthodologique pour l'analyse des coûts externes dans les corridors alpins. Ont été examinées les études les plus pertinentes, a été évalué la disponibilité des données et ont été sélectionnés des corridors représentatifs. Les phases suivantes mettront en œuvre ce cadre afin de quantifier les coûts externes par corridor et mode de transport. Un accent particulier sera mis sur l'adaptation des valeurs moyennes européennes aux conditions alpines et sur le comblement des lacunes de données grâce à des méthodes d'estimation innovantes.

5. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

5.1. Valeurs de coût

5.1.1. VALEURS MONÉTAIRES POUR LES COÛTS EXTERNES

Les points d'indication pour la plupart des valeurs utilisées sont le Manuel européen (CE Delft 2019) qui est présenté en euros 2016 pour 2016. La seule exception concerne le changement climatique, qui est basé sur la valeur française la plus récente (voir ci-dessous).

Les valeurs ont été sélectionnées et mises à jour avec les données d'Eurostat pour répondre à notre objectif :

- Les valeurs pour chacun des pays où les coûts externes sont réalisés (IT, FR, CH, DE ou AT, selon le corridor), aucun ajustement local du PIB régional par habitant n'a été effectué,
- Valeurs monétaires de 2023 (indice des prix à janvier 2023) pour l'année de base 2023 (année de référence), selon l'évolution du PIB par habitant dans chaque pays,

Le manuel européen fournit des valeurs pour les environnements urbains et ruraux (ou interurbains) mais n'indique pas les critères utilisés pour distinguer les deux catégories. Nous utilisons un seuil de 250 habitants par kilomètre carré, ce qui correspond aux zones suburbaines à faible densité.

⁸ Carioli, Alessandra ; Schiavina, Marcello ; MacManus, Kytt J ; Freire, Sergio (2023) : GHS-POP R2023A - Grille de population GHS multitemporelle (1975-2030). Commission européenne, Centre conjoint de recherche (JRC) [Jeu de données] doi : [10.2905/2FF68A52-5B5B-4A22-8F40-C41DA8332CFE](https://doi.org/10.2905/2FF68A52-5B5B-4A22-8F40-C41DA8332CFE)

PID : <http://data.europa.eu/89h/2ff68a52-5b5b-4a22-8f40-c41da8332cfe>

Le facteur alpin par coût externe a été tiré de la meilleure littérature disponible (voir ci-dessous), réestimé lorsque possible et généralisé à d'autres corridors.

5.1.2. VALEUR DE TCO2EQ

La valeur attribuée aux émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables du changement climatique est un sujet délicat, et les valeurs ont tendance à être réévaluées à la hausse au fil du temps. Bien que nous basions la plupart de nos estimations de coûts sur les valeurs du manuel européen sur les coûts externes, il semble nécessaire de considérer une valeur plus récente et plus élevée. Quatre sources ont été consultées :

1. Manuel européen (CE Delft 2019), actuellement mis à jour,
2. Valeur allemande de UBA 2020, actuellement mise à jour,
3. Valeur française de France Stratégie en 2019 et 2025, récemment mise à jour selon le coût d'évitement.

Le résultat de la comparaison est présenté dans le tableau suivant. Cela montre que la valeur la plus récente de France Stratégie est supérieure aux autres valeurs plus anciennes. Une valeur plus élevée pour le CO2eq. (encore inconnue à ce stade) est également attendue pour la prochaine mise à jour du manuel européen. **Nous utilisons donc la valeur française de 2025 pour l'estimation actuelle des coûts externes de transport sur les corridors transalpins.**

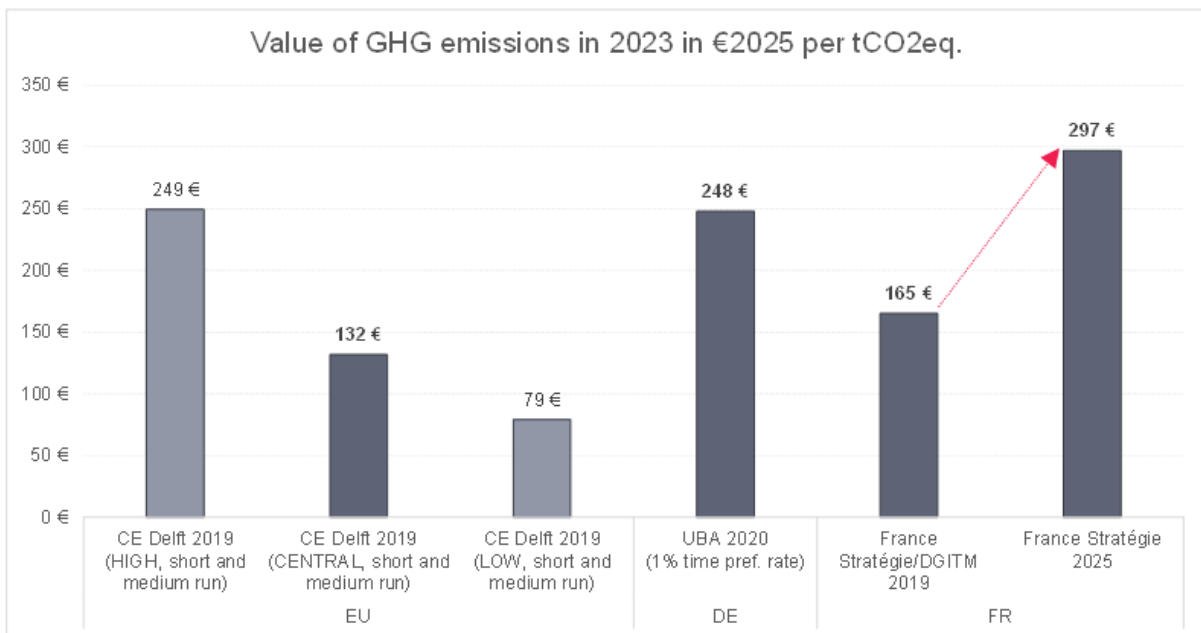


Figure 18: Comparaison des valeurs attribuées aux émissions de GES par trois sources européennes

5.1.3. APERÇU DES SOURCES UTILISÉES POUR LES VALEURS DE COÛT

Le tableau ci-dessous présente les sources qui ont été utilisées pour les valeurs de coût :

	Type de coûts externes	Mois	Marché
--	------------------------	------	--------

Sources	Accidents	Climat (GES/CO2)	Polluants atmo	Bruit	Congestion	Écosystèmes		Fret	Passagers
CE Delft, 2019. Manuel européen sur les coûts extérieurs du transport	X	X	X	X	X	X	X	X	X
France Stratégie 2025, La valeur de l'action pour le climat, Rapport commission A. Quinet		X							
EUSALP, 2017. External costs in mountain areas. on behalf of EUSALP (EU Strategy for the Alpine Region), Zurich: INFRAS and Herry Consult	X	X	X	X		X		X	
CEREMA, 2018. Assessment of external costs induced by noise in mountainous areas				X			X	Poids lourds	
Oekoscience, 2013. The "Alpine factor": Higher emissions per emission unit in Alpine valleys			X					X	X

5.1.4. CALCUL DES COÛTS EXTERNES

Pour le coût extérieur, les valeurs des coûts européens (CE Delft 2019), ajustées par pays et pour 2023 (ajustées avec l'indice d'inflation et le PIB/habitant), ont été prises. Les types de moteurs, l'âge de la flotte et la pente ont été pris à partir de la HBEFA 4.2 pour les émissions par véhicule routier. Les données sur la consommation d'énergie des trains proviennent de l'étude d'efficacité énergétique pour le fret et de l'hypothèse Stratec.

Les facteurs alpins tirés de la littérature ou mesurés sont :

- Pollution de l'air : réduction de la dispersion des polluants atmosphériques (inversion)
- Combustion sous-optimale due à l'altitude
- Bruit : impact plus élevé en raison de la géographie
- Densité de population issue de l'analyse SIG
- Sous-estimation de la population locale dans les Alpes due aux résidents saisonniers

De plus, des données sur les corridors ont été collectées pour calculer les effets selon :

- Caractéristiques des infrastructures (distances, vitesses, pentes, tunnels, altitude)
- Densité de population (corridor de 1 km, soit 500 m de chaque côté)
- Environnement naturel (plaine / contreforts alpins / contreforts alpins côtiers / alpin)

Enfin, le trafic annuel pour 2023 est basé sur des données collectées (fret routier et ferroviaire) ou des estimations de Stratec (pax rail).

5.2. Facteur alpin pour la pollution de l'air

5.2.1. FACTEUR ALPIN POUR LA POLLUTION DE L'AIR

Lors de l'EUSALP 2017, les coûts externes dans les zones montagneuses ont été sélectionnés et parfois ajustés :

Voie d'impact	Facteur de coût	Facteur montagne	Brève description (Source)	Choix méthodologique Stratec
Pression (émissions)	Gradient	1.03 (1.01 - 1.20)	Émissions plus élevées de PM10 provenant des véhicules lourds dues à des pentes plus élevées dans les régions alpines (basé sur le modèle d'élévation SIG et HBEFA 3.3)	Valeurs recalculées pour chaque section de route selon la pente et les valeurs HBEFA (4.2.2)
	Altitude	1.34 (1.10 - 1.80)	Émissions plus élevées de PM10 provenant des poids lourds dues à des altitudes plus élevées dans les régions alpines (selon Lieb et al. (2006) et Chao et al. (2011))	La valeur est linéarisée de 1 au niveau de la mer à 1,34 à une altitude de 1 000 m
	Flotte	-(1.0)	<i>Une composition différente de la flotte pourrait entraîner des émissions différentes. Cependant, cela devrait être directement couvert par le péage des poids lourds (facteurs de coût différenciés)</i>	Valeurs recalculées pour chaque corridor selon les valeurs HBEFA (4.2.2) Pour l'Italie, les valeurs françaises ont été utilisées en tenant compte des différences de composition de la flotte (types de moteurs)
État (immissions, concentrations)	Inversion	4,36 (2,37 - 7,30)	Niveaux d'émission plus élevés dus aux inversions et aux flancs de vallée dans les régions alpines (selon Oekoscience (2013))	Des valeurs proviennent de la même source, mais avec une distinction plus fine selon le type d'environnement naturel (plaine, contreforts alpins, alpin)
Impact	Densité de population	0,7 (0,5 - 0,9)	Nombre réduit de résidents touchés en raison d'une densité de population plus faible dans les régions alpines (selon l'analyse SIG)	Analyse de la densité de population par corridor par propre groupe. Correction supplémentaire pour les non-résidents
	Risques pour la santé	-(1.0)	<i>Aucune preuve d'un risque sanitaire plus élevé dans les régions montagneuses.</i>	Identique

Coûts	Coûts spécifiques des dommages	-(1.0)	Les différences régionales de facteurs de coût dues à des niveaux de revenus différents ne sont pas appropriées.	Identique
-------	--------------------------------	--------	--	-----------

5.2.2. VALEURS DES ÉMISSIONS ROUTIÈRES

Pour la route, les valeurs d'émission ont été extraites de HBEFA :

- Autoroutes, 80 à 130 km/h, circulation libre ou intensité
- Gradients +/- 6 %, +/- 4 %, +/- 2 %, 0 %
- Principaux composants d'émission (CO2eq, PM, NOx, SO2, NMHC) et consommation d'énergie (MJ)
- 11 types de motorisation sont recensés, mais seules les 5 principales catégories de moteurs sont prises en compte : essence, diesel, électricité (batterie), GPL et GNC (les 2 derniers sont plus courants en Italie, voir ci-dessous).
- Pour l'Autriche, la Suisse, l'Allemagne et la France (Italie non disponible, associée à la France)

Tableau 5: Données Eurostat sur le type de moteur par État membre

Code Eurostat Nom HBEFA	PET essence (4S)	MOURIR Diesel	ELC Électricité	GPL GPL/essence bicarburant	GAS GNC	Total 2023
AT	46%	51%	3%	0%	0%	99.9%
CH	67%	29%	3%	0%	0%	99.8%
DE	66%	30%	3%	1%	0%	100.0%
FR	45%	51%	2%	0%	0%	98.7%
ÇA	48%	42%	1%	7%	2%	100.0%
AT	46%	51%	3%	0%	0%	100.00%
CH	68%	29%	3%	0%	0%	100.00%
DE	66%	30%	3%	1%	0%	100.00%
FR	46%	52%	2%	0%	0%	100.00%
ÇA	48%	42%	1%	7%	2%	100.00%

Les cinq premières valeurs ont été corrigées pour obtenir un total de 100 % pour chaque pays.

Pour les pays d'origine supposés par corridor, les données HBEFA ont été étudiées pour l'Autriche, la Suisse, l'Allemagne et la France (Italie non disponible, associée à la France). Une proposition a été faite pour diviser le pays par corridor car aucune donnée n'était disponible sur les origines et destinations réelles du trafic.

Les autocars sont comptés comme véhicules lourds dans les données de trafic, leur numéro précis n'est pas disponible et est supposé petit et en déclin, ainsi, comme dans d'autres études, les autocars étaient associés aux poids lourds.

Tableau 6: Ses propres hypothèses sur les cas HBEFA à appliquer pour chaque corridor

Cas HBEFA utilisés (TI assimilé à FR)		Vintimille (FR / IT)	Fréjus / Mt-Cenis (FR / IT)	Chamonix / Mt-Blanc (FR / IT)	Gotthard (CH)	Brenner (AT/IT)	Tauern / Tarvisio (AT/IT)
		Marseille (FR)	Lyon (FR)	Genève (CH/FR)	Bâle (CH)	Munich (DE)	Slazburg (AT)
		Genova (IT)	Torino (IT)	Novare (IT)	Chiasso (IT)	Vérone (IT)	Udine (IT)
Véhicules légers (VL)	AT					34%	40%
	CH			10%	50%		
	DE				25%	33%	20%
	FR / IT	100%	100%	90%	25%	33%	40%
Volume total		100%	100%	100%	100%	100%	100%
Véhicules lourds de marchandises (HGV)	AT					20%	30%
	CH			0%	20%		
	DE				40%	40%	30%
	FR / IT	100%	100%	100%	40%	40%	40%
Poids lourds totaux		100%	100%	100%	100%	100%	100%

Pour le réseau routier, les données utilisées sont l'OpenStreetMap (OSM) pour la vitesse maximale et OpenRouteService de l'Institut de Heidelberg pour la géotechnologie de l'information (HeiGIT) pour la pente moyenne.

Road gradient along the six corridor (towards Italy)

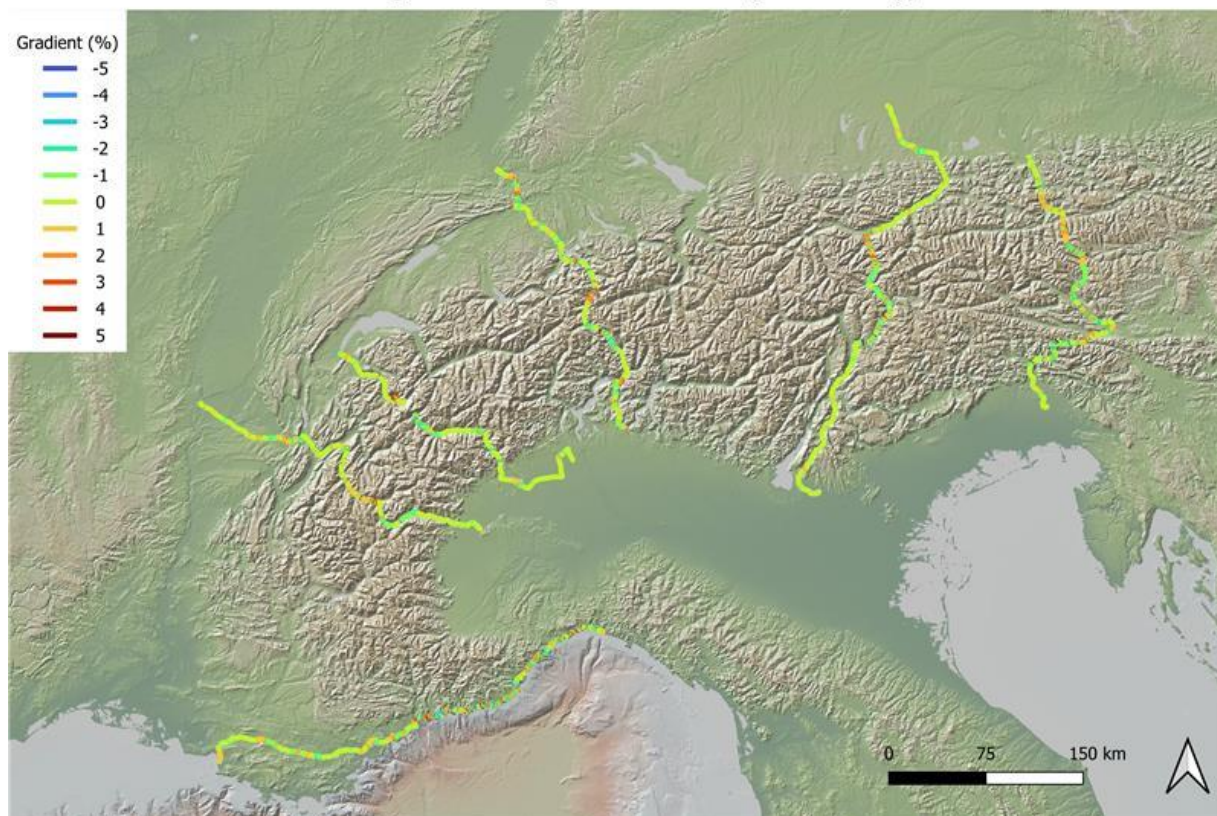


Figure 19: Pente routière le long des six corridors

5.2.3. FACTEUR ALPIN POUR LA POLLUTION DE L'AIR

Pour la pollution de l'air, nous utilisons l'environnement géographique en 5 types décrits précédemment :

- Plaine
- Contreforts alpins (pré-Alpes)
- Alpine
- Contreforts alpins côtiers (corridor de Vintimille uniquement).

L'effet de dispersion locale basé sur une étude suisse (Oekoscience, 2013) et les catégories Stratec sont :

- Une moyenne pour tous les polluants atmosphériques
- Environnement côtier assimilé à la plaine

Tableau 7: Facteur alpin par polluant atmosphérique selon Oekoscience 2013

Situation en Suisse	Environnement alpin (Stratec)	NOx	PM10	EC	OC	Moyenne
Muttenz	Plaine	0.50	0.45	0.55	0.43	0.48
Reiden	Plaine	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Erstfeld	Alpine	2.80	1.70	2.20	1.60	2.08
Moleno	Alpine	3.38	1.90	3.20	2.40	2.72
Camignolo	Contreforts alpins	1.60	1.25	1.60	1.25	1.43
Rothenbrunnen	Alpine	2.65	3.10	2.90	3.15	2.95
	Plaine	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Contreforts alpins	2.6	2.5	2.4	2.6	2.5
	Alpine	5.9	5.0	5.0	5.5	5.4

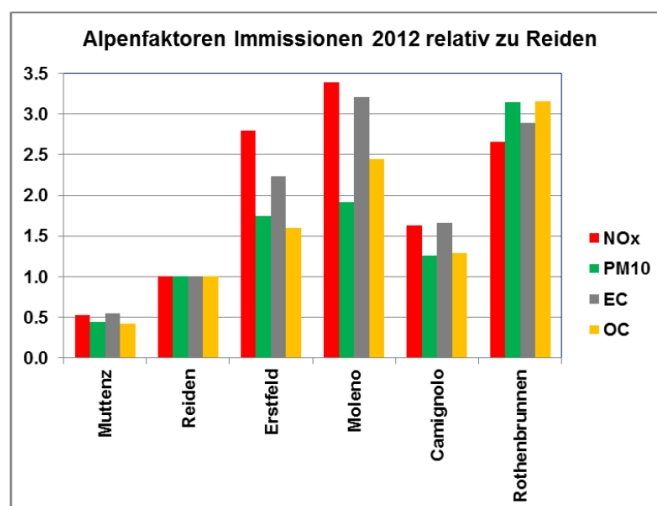


Figure 20: Les facteurs alpins par polluants atmosphériques selon Oekoscience 2013

5.3. Émissions ferroviaires

5.3.1. CONSOMMATION D'ÉNERGIE FERROVIAIRE ET ÉMISSIONS

Dans le Manuel européen des coûts externes (CE Delft, 2019), des hypothèses de TREMOD sont utilisées. Ce sont des estimations allemandes moyennes. Mais il fournit aussi des valeurs de pollution atmosphérique provenant des rails électriques, ce qui n'est pas mentionné dans TREMOD et la source n'est pas fournie.

Le freinage (et la pente des voies) est parmi les principaux facteurs de pollution de l'air ferroviaire (UIC 2025⁹) et il y a plus de pollution de l'air sur les itinéraires alpins en raison de la forte pente. Mais les

⁹ Union internationale des chemins de fer (UIC) - Atelier sur la gestion de la qualité de l'air dans le secteur ferroviaire, 13 mars 2025

uic.org/events/IMG/pdf/20250313_uic_air_quality_workshop.pdf

trains électriques sont aussi capables de limiter une partie de l'énergie récupérée du freinage régénératif et de limiter son utilisation du freinage mécanique, mais avec des limites, notamment pour le fret comme expliqué par l'Union internationale des chemins de fer :

« En raison des poids moyens élevés des trains de marchandises et du fait que seuls les essieux des locomotives sont moteurs, une grande part de la puissance de freinage provient des freins mécaniques des wagons de marchandises, et seule une petite part est ajoutée par la locomotive elle-même. Basé sur les trains de fret conventionnels, il existe un potentiel limité pour augmenter la part de l'énergie de freinage récupérée. » (UIC 2002)¹⁰.

Pour simplifier, l'hypothèse suivante est faite : 0 énergie récupérée pour les trains de marchandises. Aussi, les valeurs européennes moyennes (manuel) faute de mieux.

Pour la consommation énergétique des trains électriques (kWh/trains.km) pour le fret, hypothèse issue de l'étude d'efficacité énergétique (incluant les pentes, mais avec une valeur plancher de 0 kWh/train). Pour pax, consommation moyenne d'énergie par type de train estimée par les trains français (SNCF 2024),¹¹ pente non prise en compte.

Pour l'estimation de la pente, aucune donnée exploitable n'a été trouvée pour le rail (par exemple, SNCF Réseau fournit des pentes aux points de mesure précis mais pas des moyennes sur des sections entières).

En ce qui concerne la route, nous nous appuyons donc sur notre propre analyse SIG basée sur l'altitude pour calculer les pentes moyennes.

5.4. Estimation du bruit

5.4.1. IMPACT DU BRUIT ROUTIER

Pour ce sujet, deux études ont été comparées : Eusalp 2017 et Cerema 2018. Dans le premier, les auteurs ont réalisé une revue de littérature et une modélisation, dans le second, ils ont fait une modélisation du bruit le long de 3 corridors français.

Voici les facteurs de montagne de la première étude :

Dans la deuxième étude, trois corridors français ont été examinés :

Tableau 8: Facteur alpin pour le bruit routier selon l'étude EUSALP 2017

Voie d'impact	Facteur de coût	Facteur montagne	Brève description / Source	Commentaire
Pression (émissions)	Gradient	1.16 (1.05 – 1.31)	Émissions sonores plus élevées (bruit de roulement et de moteur) dans les	1,16 x 5,0 = 5,8

¹⁰ Union internationale des chemins de fer (UIC) - Freinage régénératif dans les trains de marchandises railway-energy.org/static/Regenerative_braking_in_freight_trains_43.php

¹¹ Information sur la quantité de gaz à effet de serre émise à l'occasion d'une prestation de transport, version 2024

snCF-voyageurs.com/medias-publics/2025-01/sncf_voyageurs_methodologiegenerale-infoges_2024.pdf

		régions alpines (basé sur EMPA 1997)	
État (immissions, concentrations)	Conditions topographiques et météorologiques	5 (2,5 - 12,5)	Niveaux d'émission sonore plus élevés dans les régions alpines grâce aux inversions et à l'effet amphithéâtre (basé sur GRACE 2006, Lieb et al. 2006) [du modèle 1997]
Impact	Densité de population	0,7 (0,5 - 0,9)	Nombre réduit de résidents touchés en raison d'une densité de population plus faible dans les régions alpines (selon l'analyse SIG)
	Risques pour la santé	-(1.0)	Aucune preuve d'un risque sanitaire plus élevé dans les régions montagneuses.
Coûts	Coûts spécifiques des dommages	-(1.0)	Les différences régionales de facteurs de coût dues à différents niveaux de revenu ne sont pas appropriées.
Facteur total de montagne pour le coût du bruit		4.1 (1.3 – 14.7)	« 0,61 pour le corridor du Gothard avec transport routier »



Figure 21: Corridors routiers analysés dans l'étude Cerema 2018

Cerema a identifié trois facteurs :

- Gradient + conditions topographiques et météorologiques : 2,8
- Densité de population : 0,32
- Facteur total de montagne pour le coût du bruit : 0,9

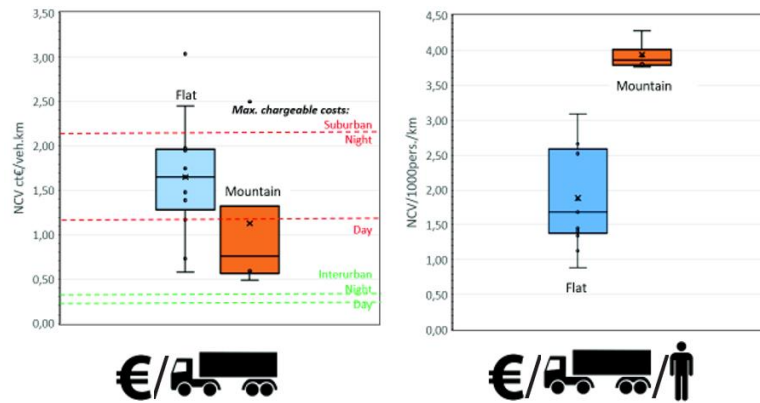


Figure 22: Facteurs alpins pour le bruit selon l'étude Cerema 2018

Pour l'impact sur le bruit routier, nous suggérons d'utiliser l'estimation de Cerema 2018, ajustée pour :

- Correspondre aux valeurs de coût européennes du manuel, plutôt qu'aux anciennes valeurs françaises
- Prendre en compte l'impact sur les résidents saisonniers (en plus de la population)
- Inclure les véhicules légers, avec une réduction (+4) selon la méthodologie française (DGITM 2019)
- Être réévalué à la valeur de €2023
- Être ajusté à la densité de population par corridor (comparaison avec les corridors français basée sur l'analyse SIG de Stratec)).

5.4.2. IMPACT DU BRUIT FERROVIAIRE

Dans l'étude Eusalp 2017, ces facteurs d'impact sur le bruit ferroviaire étaient disponibles :

Tableau 9: Facteur alpin pour le bruit ferroviaire selon l'étude EUSAL de 2017

Voie d'impact	Facteur de coût	Facteur montagne	Brève description / Source	Commentaire
Pression (émissions)	Gradient	- (1.0)	Aucune donnée disponible	
État (immissions, concentrations)	Conditions topographiques et météorologiques	5 (2,5 - 12,5)	Niveaux d'émission sonore plus élevés dans les régions alpines en raison des inversions et de l'effet amphithéâtre (basé sur GRACE 2006, Lieb et al. 2006)	
Impact	Densité de population	0,6 (0,4 - 0,9)	Nombre réduit de résidents touchés en raison d'une densité de population plus faible dans les régions alpines (selon l'analyse SIG)	Population : « 0,41 ou 0,43 pour le corridor ferroviaire du Gothard avec l'ancien tunnel Scheiteltunnel ou le nouveau tunnel de base du Gothard »
	Risques pour la santé	- (1.0)	Aucune preuve d'un risque sanitaire plus élevé dans les régions montagneuses.	

<i>Coûts</i>	<i>Coûts spécifiques des dommages</i>	- (1.0)	<i>Les différences régionales de facteurs de coût dues à des niveaux de revenu différents ne sont pas appropriées.</i>
--------------	---------------------------------------	------------	--

Aucune autre étude comparable pour le rail n'a été trouvée.

Concernant cette étude, la décision prise a été d'utiliser :

- Valeurs de coût européennes du manuel, réévaluées aux valeurs de 2023
- Avec la montagne et le mélange (contreforts alpins), les facteurs ont été réajustés
- Ajusté pour prendre en compte l'impact sur les résidents saisonniers (en plus de la population)
- Ajusté à la densité de population par corridor (analyse Stratec SIG)

5.5. Population affectée

5.5.1. ESTIMATION DE LA POPULATION IMPACTÉE

Bien que les données sur la population soient facilement accessibles puisqu'elles sont collectées et mises à disposition par les bureaux nationaux de statistiques, nous considérons qu'il existe une sous-estimation du nombre de personnes affectées par le transport dans l'environnement alpin en raison du grand nombre de non-résidents séjournant dans les zones alpines.

Ce phénomène peut être observé sur les cartes suivantes présentant, pour la Suisse et la France (département de Haute-Savoie), la part des résidences secondaires dans le parc immobilier local.

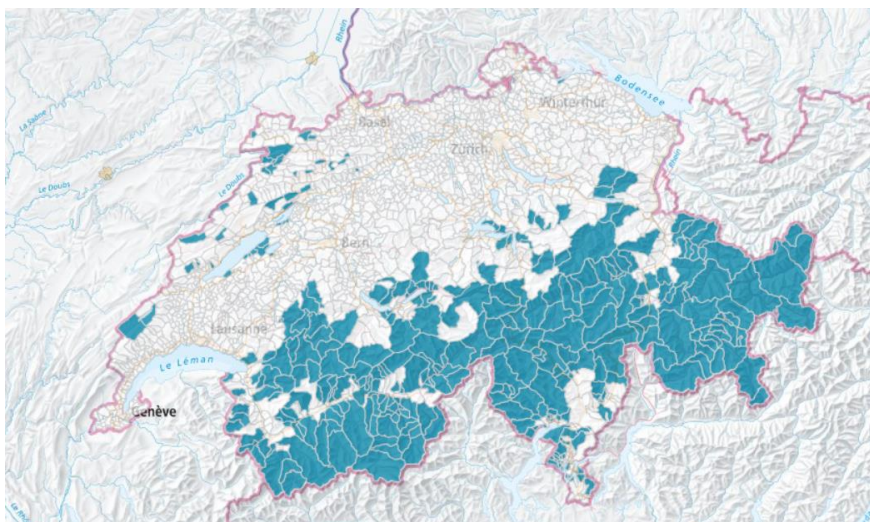


Figure 23. Communes suisses avec plus de 20 % de résidences secondaires

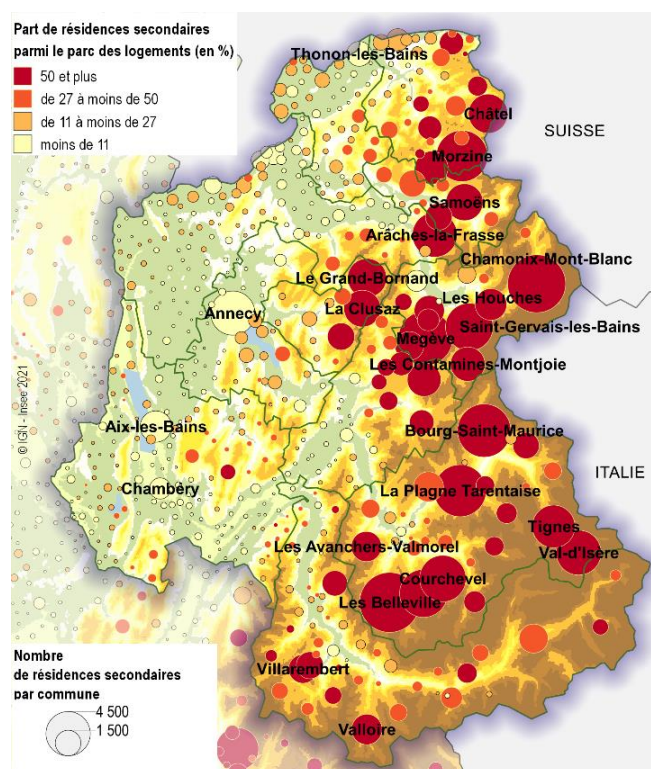


Figure 24. Répartition des résidences secondaires en Haute-Savoie, France

Pour confirmer cette intuition et estimer le facteur alpin potentiel résultant, une petite analyse a été réalisée avec des données françaises pour 31 communes sur les 3 corridors français. En raison de la variation de la nature et de la disponibilité des données selon les pays, cette analyse a dû être limitée à la France mais est supposée pertinente pour les autres corridors alpins.

Cette analyse compare la population municipale officielle à une estimation du nombre de résidents secondaires (ou visiteurs saisonniers) basée sur :

- La part des résidences secondaires, avec des hypothèses de 2,5 personnes par résidence présentes 5 semaines par an,

- L'offre touristique dans les hôtels, le camping et autres (taux d'occupation de 63 %, mesuré par le tourisme Auvergne Rhône-Alpes pour la Savoie et la Haute-Savoie pour 2024).¹²

Pour ce sujet, cinq catégories de communes ont été comparées selon leur environnement naturel et humain : métropolitaine (Lyon, Marseille), plaine, contreforts alpins, alpine et côtière. Cela conduit à un **facteur de 1,20 pour les municipalités alpines**, comparé aux plaines et aux zones métropolitaines, mais aussi à un **facteur de 1,08 pour les municipalités côtières**. Les municipalités des contreforts alpins présentent des valeurs similaires à celles des plaines et des zones métropolitaines (facteur de 1,0).

Tableau 7: Analyse de la population officielle comparée à la population saisonnière estimée dans les corridors français

Environment	Municipalities analysed	Official population (2021)	Total		correction ((visitors + secondary pop) / official population)				Correction factor to population
			Visitors (tourists) ¹	Secondary population ²	Average	Min	Max	Max municipality	
Metropolitan	4	1 504 635	23 995	8 062	2.1%	0.9%	3.1%	Lyon	1.00
Plain	5	96 486	1 062	310	1.4%	0.4%	3.9%	Les Abrets en Dauphiné	1.00
Alpine foothills	5	98 163	1 297	371	1.7%	0.3%	1.9%	Chambéry	1.00
Alpine	9	54 413	8 146	4 032	22.4%	2.1%	82.5%	Chamonix-Mont-Blanc	1.20
Coastal Alpine foothills	8	607 988	35 153	24 526	9.8%	2.1%	28.0%	Fréjus	1.08
Total	31	2 361 685	69 654	37 301	4.5%	0.3%	82.5%	Chamonix-Mont-Blanc	
Mont-Blanc	7	110 660	8 057	3 882	10.8%	1.4%	82.5%	Chamonix-Mont-Blanc	
Fréjus/Mont-Cenis	14	716 052	15 629	5 166	2.9%	0.3%	36.5%	Modane	
Ventimiglia	10	1 534 973	45 967	28 252	4.8%	0.9%	28.0%	Fréjus	

¹ Estimated by Stratec with the share of secondary residencies (assumptions of 2,5 persons per residency present 5 weeks per year)

² Based on touristic offer in hotels, hostels, campings and such (63% occupancy rate)

5.5.2. ENVIRONNEMENT URBAIN VS. RURAL

Dans le manuel européen, on trouve des valeurs de coût pour l'environnement urbain vs. rural, mais il ne fournit pas les valeurs correspondantes de densité de population.

Sur la base d'une analyse de la nomenclature des régions Eurostat et des valeurs françaises :

- Urbain : ≥250 habitants par km²
- Rural : <250 habitants par km²

¹² pro.auvergnerhonealpes-tourisme.com

2023 Geo	Pop (1 000)				Superficie (1 000 km ²)				Densité de population (hab./km ²)			
	RUR	INT	URB	Total	RUR	INT	URB	Total	RUR	INT	URB	Total
	Régions principal ement rurales	Régions intermédiaire es	Régions principaleme nt urbaines	Total	Régions principal ement rurales	Régions intermédiaire es	Régions principal ement urbaines	Total	Régions principal ement rurales	Régions intermédiaire es	Régions principal ement urbaines	Total
AT	3 270	2 764	3 071	9 105	62	15	6	83	53	190	529	110
CH	276	3 949	4 590	8 815	8	24	8	40	35	162	607	221
FR	18 296	25 461	24 521	68 277	328	257	50	634	56	99	494	108
ÇA	4 924	23 507	30 566	58 997	82	153	62	298	60	153	493	198
Total	26 767	55 680	62 748	145 195	480	449	125	1 054	56	124	502	138

	Interurbain	Urbain dispersé	Urbain	Urbain dense	Urbain très dense
Répartition (hab./km ²)	< 37	37-450	450-1'500	1'500-4'500	> 4'500
Densité moyenne (hab./km ²)	25	250	750	2 250	6 750

Figure 25. « Fiche outils » françaises (DGITM 2019)

5.6. Congestion routière

En l'absence de meilleures alternatives, les valeurs du manuel européen de 2019 sont utilisées pour estimer le coût de retard causé par la congestion routière. Il convient de noter que la congestion routière n'est pas un coût externe typique, car les usagers de la route se causent eux-mêmes le coût mutuellement et les autres acteurs ne sont pas affectés.

Pour des analyses futures, deux solutions pourraient être déployées pour une estimation plus fine de la congestion routière :

- Achat de Floating Car Data (FCD) sur chaque corridor pour mesurer précisément le temps perdu
- Un exercice complet de modélisation du transport routier, qui nécessiterait également un budget et des données supplémentaires.

Une tentative rapide de modélisation du trafic routier a cependant été menée par Stratec sur les 4 corridors de l'Ouest, en utilisant les données de circulation routière (AADT) déjà collectées et traitées pour l'analyse des accidents de la route.

Les graphiques suivants présentent les valeurs obtenues grâce à un exercice limité de modélisation routière dans Excel utilisant des courbes standard speed-slow. Les valeurs résultantes sont similaires à celles calculées avec le coût de délai du manuel européen, à l'exception du corridor du Gothard où la modélisation entraînait des coûts bien plus élevés.

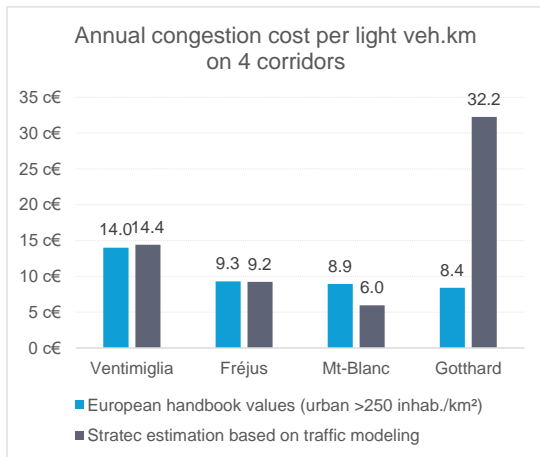


Figure 26: Estimation de la congestion routière pour les véhicules légers

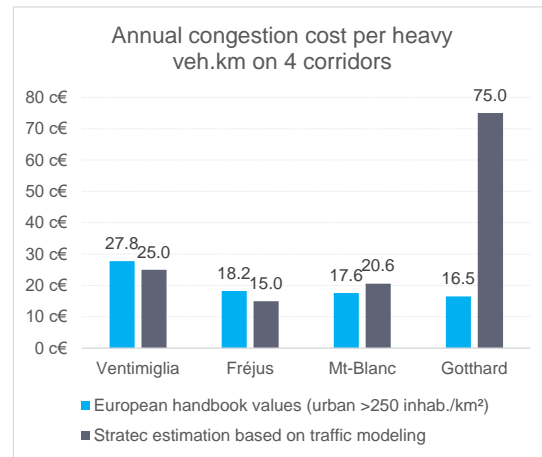


Figure 27 : Estimation de la congestion routière pour les véhicules lourds

Une comparaison supplémentaire avec les données suisses sur la congestion montre des valeurs encore plus élevées pour la congestion routière sur le corridor du Gotthard (voir les graphiques ci-dessous).

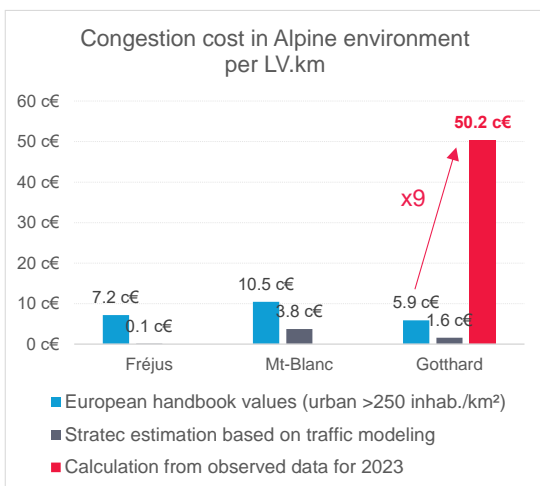


Figure 28: Estimation de la congestion routière pour les véhicules légers

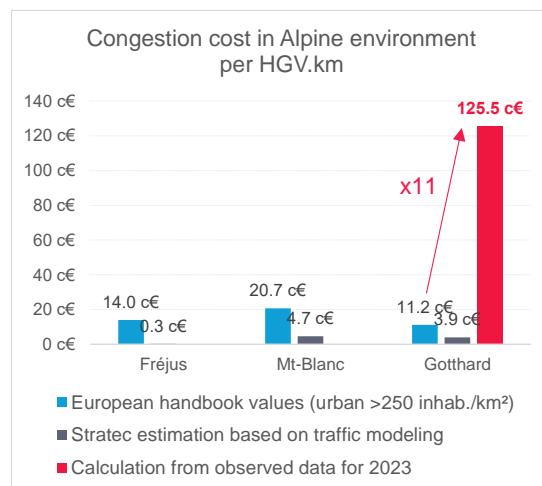


Figure 29 : Estimation de la congestion routière pour les véhicules lourds

5.7. Accidents

Les données routières suisses, italiennes et françaises ont été intégrées dans une base de données SIG commune. Les données autrichiennes ne pouvaient pas être exploitées en raison de leur différence de format SIG (raster).

Une analyse a été réalisée pour évaluer le taux d'accidents dans différents environnements géographiques. La méthodologie utilisée a consisté à sélectionner les accidents sur les corridors pendant plusieurs années (2019, 2022 et 2023) et à comparer le nombre d'accidents au trafic annuel quotidien moyen (AADT), y compris le trafic local. Les graphiques ci-dessous présentent les résultats obtenus, qui ne semblent révéler aucun schéma.

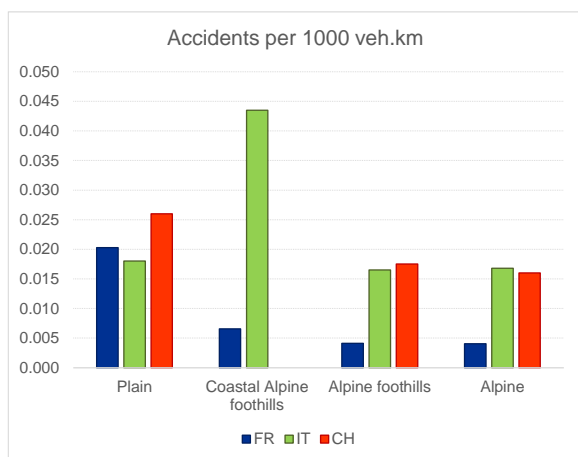


Figure 30: Accidents par 1 000 véhicule.km dans différents environnements de corridors

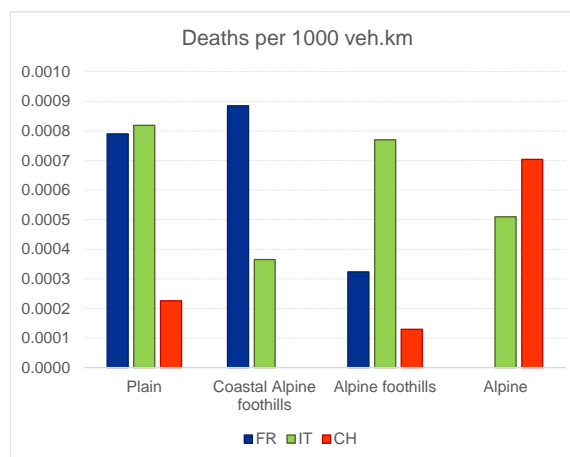


Figure 31: Décès dus à des accidents par 1 000 véhicule.km dans différents environnements de corridors

Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les infrastructures alpines bénéficient de mesures supplémentaires pour réduire les risques d'accidents (voir EUSALP 2017). Ainsi, les coûts supplémentaires des accidents dans l'environnement alpin sont généralement supportés par les gestionnaires d'infrastructures, qui doivent investir dans des équipements de sécurité supplémentaires. Selon l'étude Eusalp de 2017, ce coût supplémentaire alpin est estimé à 3,9 % du coût externe du transport en plaine.

Cependant, **étant donné que la plupart des infrastructures routières sur les corridors alpins ont des péages pour les véhicules légers et lourds sous une forme ou une autre (vignette, kilométrique, portails), nous considérons que ces coûts supplémentaires d'infrastructure sont déjà intégrés** (c'est-à-dire supportés par les usagers de la route).

5.8. Trafic ferroviaire voyageurs

En l'absence de données publiques sur les passagers ferroviaires (sauf pour la Suisse pour le corridor du Gothard), le trafic ferroviaire a été estimé pour tous les corridors sauf le Gothard avec les étapes suivantes :

- Enquête sur l'offre de trains de voyageurs sur les corridors transalpins (source : bahn.de),
- Recherche de bureau sur les types de matériel roulant utilisés par les exploitants et leur capacité,
- Hypothèse sur les taux d'occupation moyens tirée des données françaises publiées par l'ART¹³
 - 33 % pour les trains régionaux (moyenne pour les trains de la région PACA en 2023 selon l'ART),
 - 63 % pour les trains interurbains,
 - 76 % pour les trains à grande vitesse (TGV, ICE, Frecciarossa).

¹³ Autorité de régulation des transports (ART), *Le marché du transport ferroviaire en France en 2023*, décembre 2024
autorite-transport.fr/actualites/le-transport-ferroviaire-bat-des-records-de-frequentation-en-2023/

Pour le corridor du Gothard, la méthodologie consiste à utiliser les données CFB/CFF publiques sur le nombre de trains (2018-2024) et de passagers (2024).

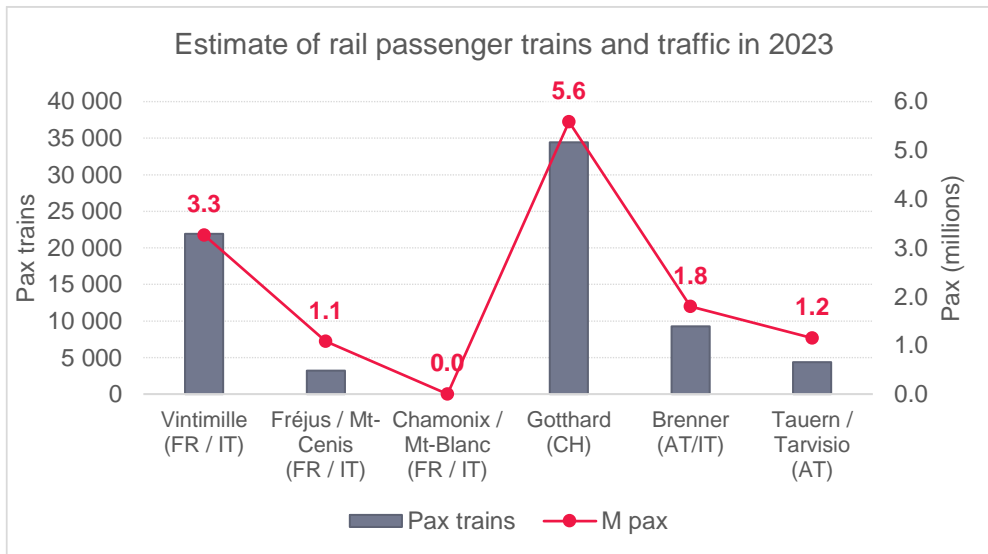


Figure 32: Estimation des trains de voyageurs et du trafic ferroviaire en 2023 sur les corridors

Concernant les trains à considérer pour l'estimation du trafic, il est rare qu'un service ferroviaire relie un bout du corridor à l'autre (la seule exception étant le Frecciarossa Lyon – Turin/Milan). Les estimations du trafic passagers doivent correspondre aux trains traversant effectivement les Alpes (col de montagne / tunnel / frontière), comme pour le fret routier ou ferroviaire. Ainsi, d'autres trains le long du corridor (comme les trains régionaux Marseille – Nice, voir ci-dessous) sont utilisés pour desservir les fonctions locales, et non pour traverser les Alpes, et ne doivent pas être pris en compte dans les coûts externes transalpins. Seuls les trains traversant les Alpes au point frontalier, au col de montagne ou au tunnel principal sont pris en compte dans le calcul des coûts externes, même lorsqu'ils ne couvrent pas toute la longueur du corridor.

11:57 – 18:17 | 6h 20min | 2 Transfers



Figure 33: Correspondances ferroviaires entre Marseille et Gênes sur le corridor de Vintimille

5.9. Transport ferroviaire

5.9.1. AVANT/APRÈS LA MISE EN PRODUCTION

Le transport combiné ferroviaire comprend le transport routier nécessaire avant et après le transport ferroviaire principal. Pour présenter une comparaison équitable des coûts externes des différents modes de transport, ce transport routier doit être pris en compte. Nous avons donc utilisé un ensemble d'hypothèses sur les distances couvertes par mode (route / rail) et le type de service (voir tableau ci-dessous).

Tableau 10: Hypothèse sur la circulation avant et après la route pour le transport combiné et l'autoroute roulante

Type de transport ferroviaire	Taux de rendement vide	Accès routier moyen Italie Nord/Ouest des Alpes
-------------------------------	------------------------	---

Autoroute roulante combinée et non accompagnée	30%	30 km	50 km
Autoroute roulante accompagnée	0%	50 km	70 km

Cependant, la plupart des services intermodaux dépassent largement les limites du corridor. Par exemple, les services entre les ports d'Anvers ou de Rotterdam et le nord de l'Italie constituent une part importante des activités de transport combiné transalpin (voir carte ci-dessous).

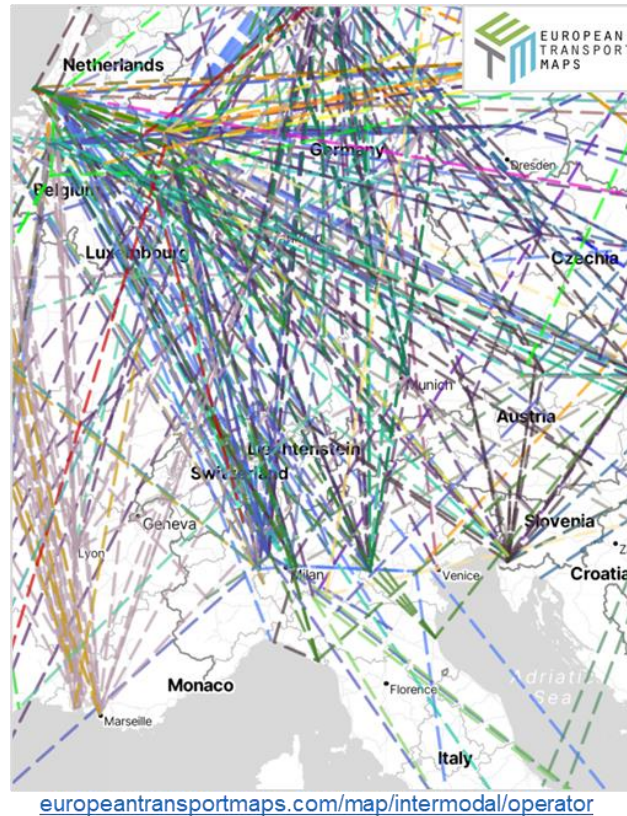


Figure 34: Connexions intermodales à travers les Alpes - Cartes européennes des transports

Par conséquent, l'estimation des coûts d'avant/après la suspension ne peut être entièrement attribuée aux corridors transalpins. Comme nous ne disposons pas de données sur l'origine-destination des débits, les coûts du transport routier ont été pondérés selon les distances pour une connexion intermodale moyenne de référence (voir tableau ci-dessous).

Tableau 11: Hypothèses sur la part de transport routier avant et après à considérer pour chaque corridor

Service de référence pour le transport combiné	Longueur (km)	La part du coût des voitures routières, à considérer sur le corridor	Pays de coûts pré/post-transport
Lyon - Marseille - Gênes	710 km	54%	FR ÇA
Paris - Turin	748 km	40%	FR ÇA
Cologne - Milan	826 km	35%	DE ÇA

Cologne - Vérone	926 km	44%	DE	ÇA
Linz - Trieste	490 km	64%	AT	ÇA

5.9.2. IMPACT DES TERMINUS FERROVIAIRES

Aucune étude spécifique n'a été trouvée quantifiant les coûts externes des terminaux intermodaux en tant que tels. Les évaluations existantes des impacts liés au transport reposent généralement sur des méthodologies conventionnelles axées sur les flux de transport eux-mêmes plutôt que sur l'exploitation des terminaux. Dans ce contexte, les impacts du transport routier sont déjà pris en compte par les activités pré- et post-transport (voir ci-dessus), tandis que la principale portion de transport longue distance est assurée par le rail.

Cependant, certains aspects ne sont que partiellement pris en compte ou exclus. Par exemple, bien que la traction principale se fasse par rail, les manœuvres sur le dernier kilomètre sont souvent réalisées à l'aide de locomotives diesel de manœuvre ou de tracteurs ferroviaires. Ces opérations ne sont généralement pas incluses dans les évaluations actuelles, malgré leur contribution (limitée) aux émissions locales et à la consommation d'énergie.

Au-delà de ces éléments, des coûts externes supplémentaires peuvent être remis en question. Les impacts sonores sur les zones voisines sont généralement limités, car les activités intermodales ne sont pas particulièrement bruyantes, et les terminaux sont généralement situés dans des zones industrielles à faible ou pas de population résidentielle (voir tableau ci-dessous). Néanmoins, de nombreux terminaux fonctionnent en soirée ou en nuit, les trains partant parfois aussi tard que minuit, ce qui pouvait provoquer des perturbations localisées.

Tableau 12: Population située autour des terminaux de transport combiné impliqués dans le transport combiné transalpin

Terminal		Population à moins de 500 m du terminal	Superficie (km ²)	Densité de population (habitation/km ²)
Aiton	FR	362	1.42	254
Fribourg	DE	7 004	1.42	4 938
Novare	ÇA	589	1.15	514
Orbassano	ÇA	7	1.37	5

La consommation d'énergie et les émissions liées aux opérations terminaux—telles que celles provenant des empileuses à portée, des grues et des équipements de manutention horizontale—méritent également d'être pris en compte. Ces activités sont souvent électrifiées, ce qui signifie que leur impact environnemental est probablement faible. Bien que de tels impacts puissent être estimés à partir d'hypothèses raisonnables, ils resteraient probablement marginaux par rapport à ceux des tronçons de transport eux-mêmes. Enfin, l'artificialisation des terres associée aux terminaux intermodaux constitue un autre coût externe potentiel, bien que cet aspect ne soit généralement pas pris en compte pour d'autres modes ou formes de transport non plus.

6. RÉSULTATS

6.1. Valeurs absolues

Le graphique ci-dessous présente les résultats en termes de valeur absolue des coûts externes estimés pour chacun des 6 corridors. Les variations du coût extérieur total entre les corridors reflètent principalement :

- Le flux total de véhicules, en particulier le trafic routier – avec Brenner et Vintimille en tête,
- La longueur des corridors (les corridors plus longs ont un coût externe estimé plus long par véhicule traversant les Alpes),
- Les caractéristiques géographiques de chaque corridor (densité de population, pentes/pentes, environnement alpin, etc.).

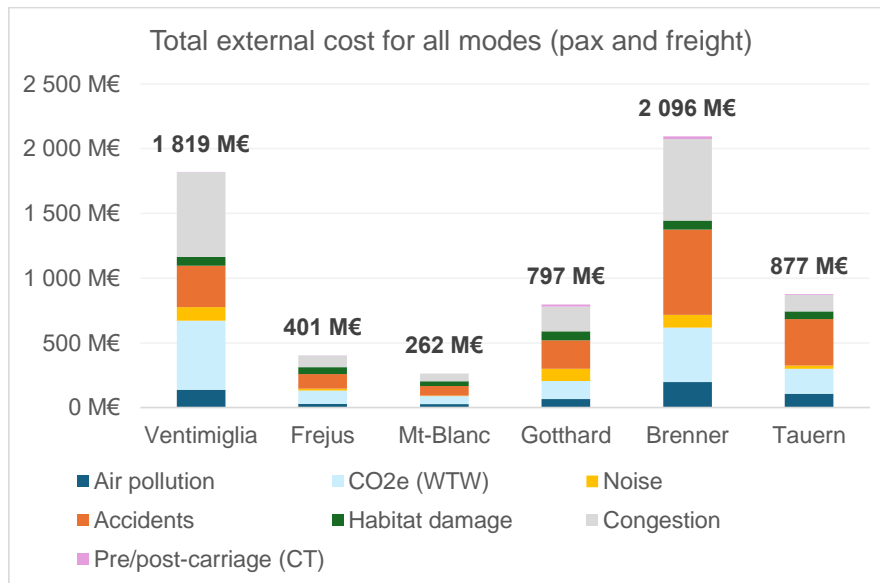


Figure 35: Coûts extérieurs totaux pour tous les modes (passagers et fret) en euros 2023 pour 2023

Pour présenter une comparaison plus équitable entre les corridors, le tableau suivant présente les coûts externes moyens par kilomètre de corridor. Ce sont les mêmes valeurs présentées ci-dessus mais divisées par la longueur du corridor en kilomètres. Les différences de volume de trafic expliquent la plupart des différences restantes.

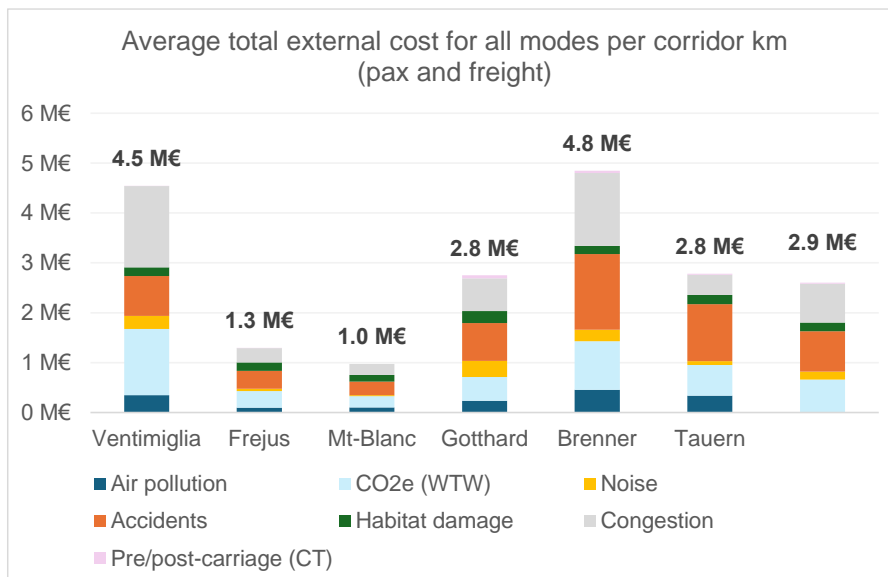


Figure 36: Coût externe total moyen pour tous les modes de transport par kilomètre de corridor pour les passagers et le fret

Il existe des différences notables dans la répartition des différents types de coûts externes. Les différences suivantes sont visibles :

- Des valeurs plus élevées liées aux accidents en Autriche, issues des valeurs du manuel européen de 2019,
- Congestion sur le corridor de Vintimille (zones urbaines densément peuplées), sans qu'aucun facteur alpin ne prenne en compte la congestion,
- Bruit sur le corridor du Gothard dû à la plus grande part du transport ferroviaire.

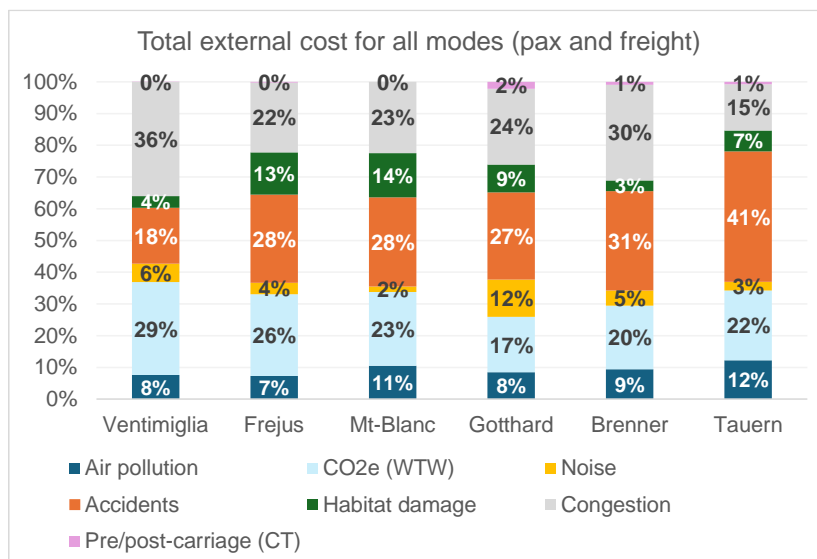


Figure 37: Répartition des coûts externes par type pour chaque corridor (passagers et fret)

Les graphiques suivants révèlent la répartition des coûts externes par type de marché (passagers vs. fret) et par mode de transport (route vs. rail). La route constitue de loin la principale composante des coûts externes, tandis que le fret génère un peu plus de coûts externes que les passagers (sauf sur le corridor du Gothard). Cependant, cette présentation tend à sous-estimer les coûts externes générés par les passagers, car de nombreux passagers longue distance traversent les Alpes en les survolant, avec des émissions importantes de gaz à effet de serre qui ne sont pas calculées ici.¹⁴

¹⁴ Le fret aérien pose aussi problème, mais c'est un marché de niche et les volumes sont bien plus faibles que ceux des activités passagers aériens.

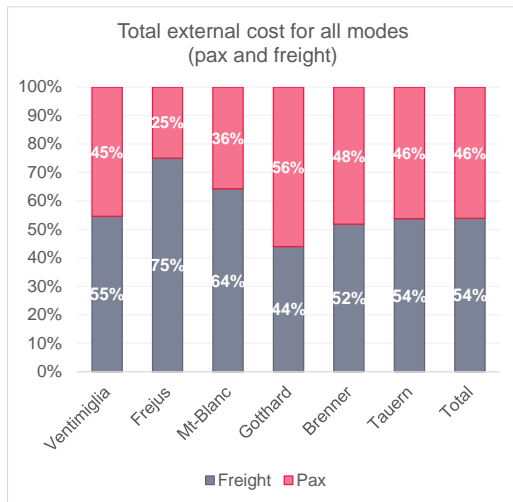


Figure 38: Coûts externes répartis par marché (passagers vs. fret)

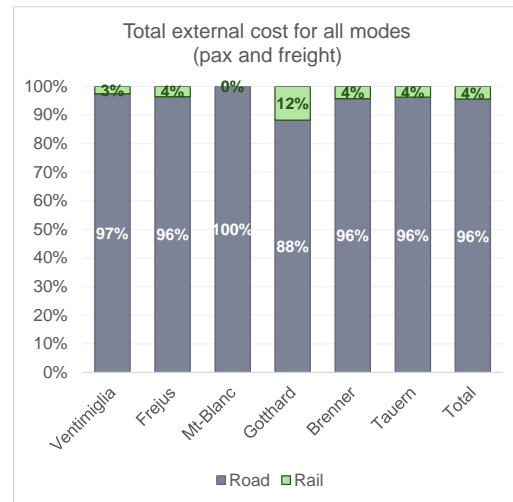


Figure 39: Coûts externes répartis par mode (route vs. rail)

6.2. Frais externes de transport par tonne.km

Une analyse par tonne.kilomètre nous permet de mieux comprendre les différences de coûts externes selon les corridors et les modes de transport pour le fret. Ce sont les coûts générés par le déplacement d'une tonne sur un kilomètre. Ainsi, les **routes génèrent environ cinq fois plus de coûts externes que le rail**.

Les coûts extérieurs plus élevés pour la route se trouvent sur le corridor de Vintimille en raison de la forte densité de population le long de la côte, tandis que le corridor du Gothard arrive en second lieu pour la même raison (notamment sur le plateau suisse), mais aussi en raison de son PIB par habitant plus élevé (sur lequel reposent les valeurs des coûts locaux).

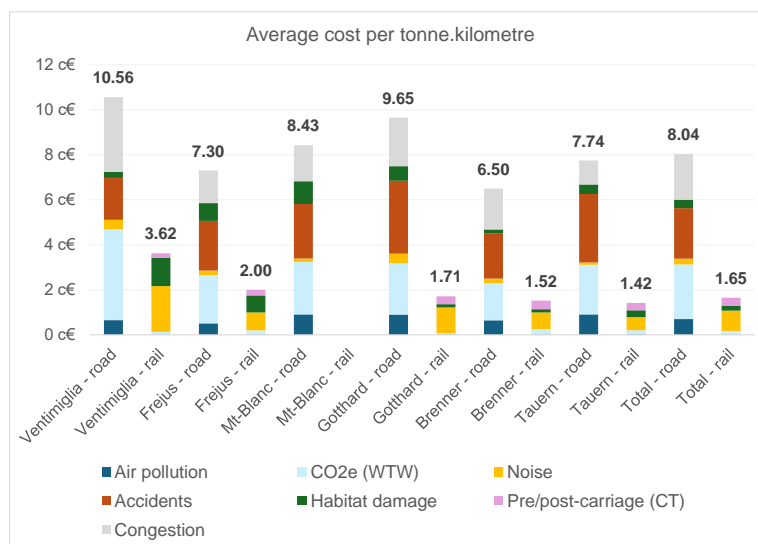


Figure 40: Coûts externes moyens par tonne. kilomètre par mode et corridor pour le fret

La catégorie de coût « Avant/après le transport (CT) » désigne les coûts externes générés par la portion routière nécessaire du transport combiné avant et après le chargement des trains aux terminus ferroviaires. Cette catégorie est un agrégat de différents coûts externes, présentés dans le graphique

suivant. Bien que prendre en compte ce transport routier semble nécessaire pour une comparaison équitable entre le rail et le transport entièrement routier, il est délicat car nous manquons de données sur les distances et l'emplacement des services ferroviaires.

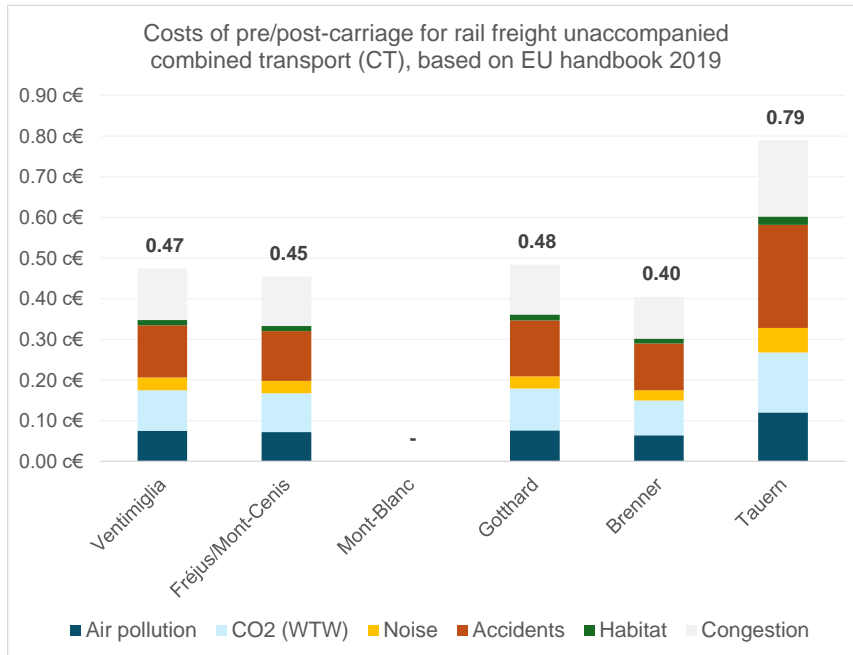


Figure 41: Coûts externes du transport routier pour le transport combiné non accompagné

Puisque le niveau de confiance dans les estimations est plus faible pour la congestion routière (25 % des coûts externes routiers, probablement sous-estimés et un coût externe atypique car il n'affecte que les usagers de la route) et le rail avant/après la circulation (21 % du rail rail), le graphique suivant présente les valeurs sans ces deux catégories.

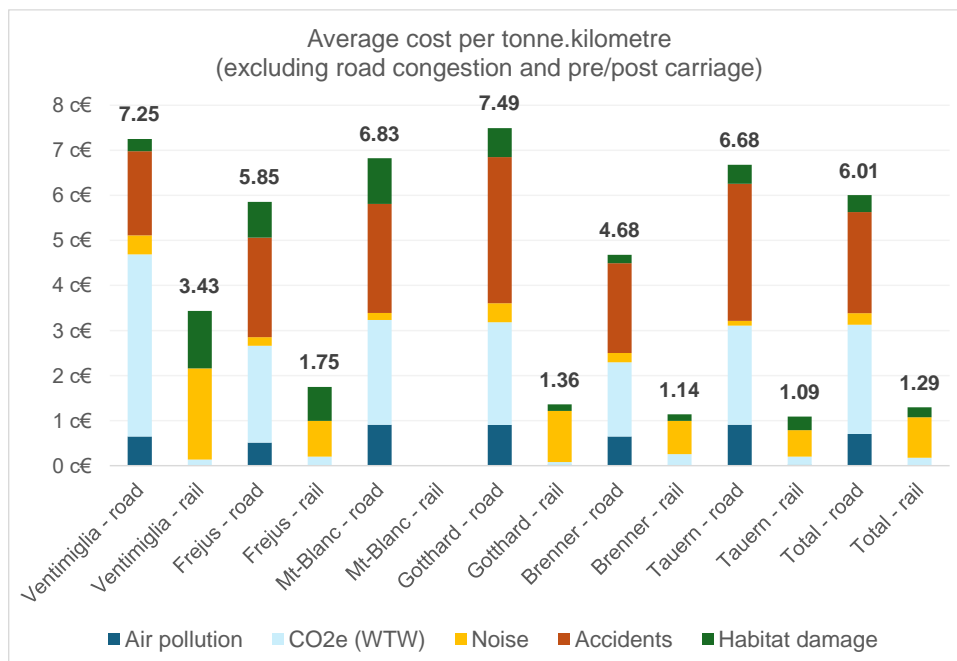


Figure 42: Coûts externes moyens par tonne.kilometre par mode et corridor pour le fret, sans congestion routière ni trains avant et après le transport

6.3. Coûts externes par passager.km

En ce qui concerne le fret, une présentation des coûts externes par kilomètre passager annule les différences de volume entre les corridors et les modes de transport. Les différences entre les corridors sont moins marquées que pour le fret, mais les coûts entre les modes de transport sont plus élevés, la **route générant 8 fois plus de coûts externes que le rail par kilomètre**. Cependant, il faut garder à l'esprit que la comparaison n'est pas toujours entièrement pertinente, car il n'existe pas toujours des services ferroviaires longue distance circulant d'un bout à l'autre d'un corridor. Sur le corridor de Ventimiglia, les trains régionaux ne circulent que de Nice à Vintimille, bien qu'il existe des correspondances avec d'autres services régionaux vers Marseille et Gênes.

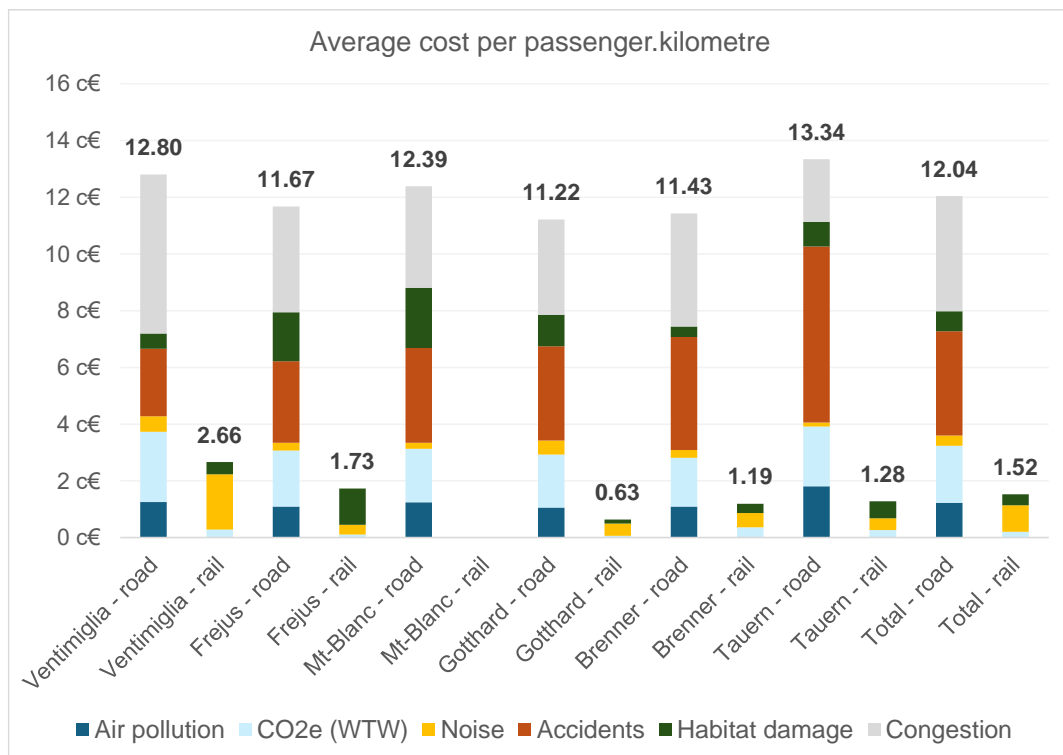


Figure 43: Coûts externes moyens par passager. Kilomètre par mode et corridor

Quant au fret, les coûts externes sont également présentés sans congestion, ce qui n'est pas un coût externe évident, car cela n'impacte que les usagers de la route (voir graphique ci-dessous). Hors congestion, les coûts externes du transport routier restent en moyenne cinq fois supérieurs au coût du train par kilomètre passager.

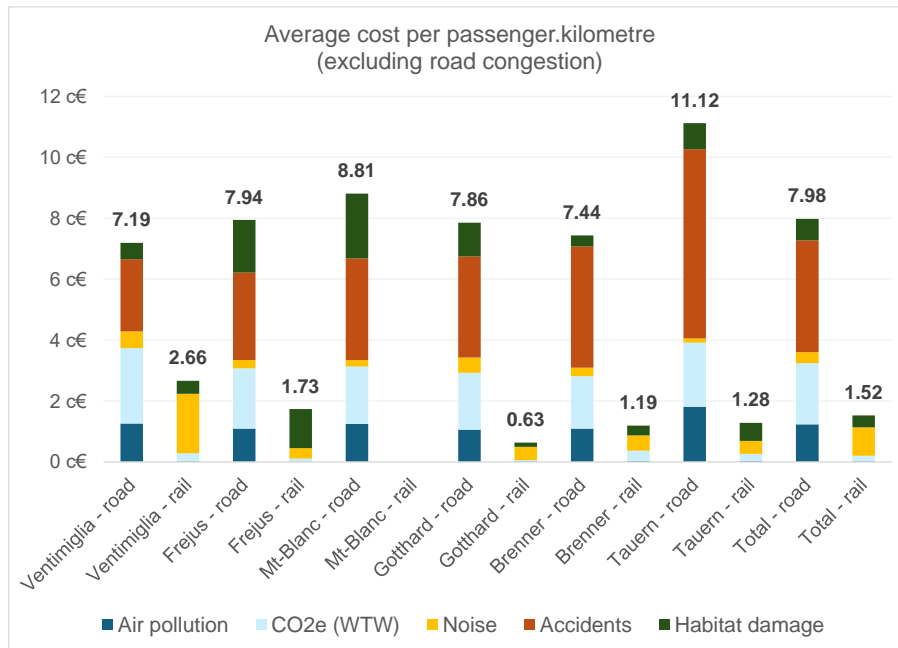


Figure 44: Coûts externes moyens par passager. Kilomètre par mode et corridor, hors congestion

6.4. Coûts extérieurs routiers par type de véhicule

Les graphiques suivants présentent un focus sur les coûts du transport routier par type de véhicule. En termes de coût par kilomètre de véhicule, les véhicules lourds (poids lourds, camions) présentent les valeurs les plus élevées en raison de leur taille et de leur charge lourde. Mais les valeurs de coût des poids lourds sont bien inférieures à celles des véhicules utilitaires légers (VLC) lorsque la charge est prise en compte en termes de coûts par tonne.kilomètre.

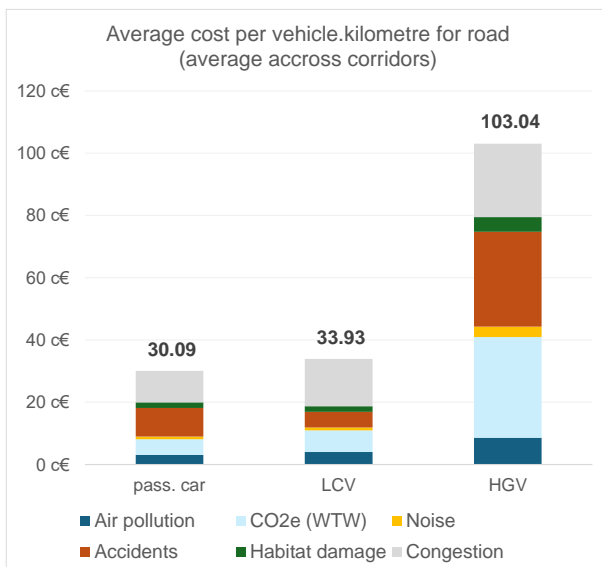


Figure 45: Coût moyen par véhicule.kilomètre de route

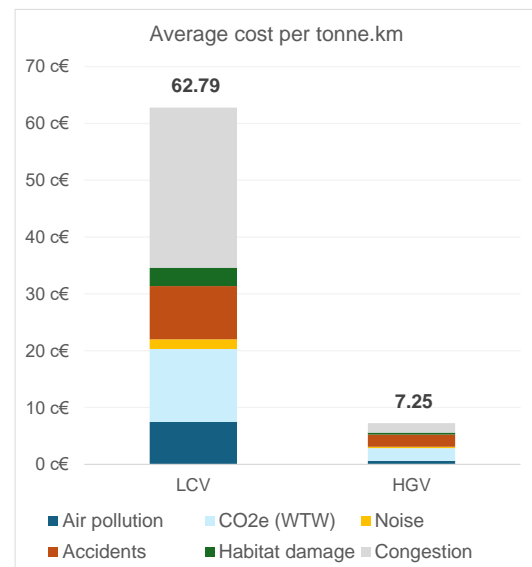


Figure 46: Coût moyen par tonne.kilomètre de route par type de véhicule

6.5. Coûts externes ferroviaires par type de service

Pour le rail, les coûts par type de train (voyageurs ou fret) sont présentés dans le tableau ci-dessous. Il convient de noter qu'il existe de nombreux sous-types de trains pour chaque catégorie, et que nous manquons de données et d'hypothèses pour mener une analyse plus fine.

Par exemple, le freinage régénératif permet aux trains électriques de récupérer de l'énergie grâce au freinage. C'est une question potentiellement clé pour les trains de voyageurs, et elle est particulièrement importante dans un contexte alpin où les pentes sont nombreuses et souvent raides. Mais cet aspect n'a pas pu être pris en compte dans la présente étude.

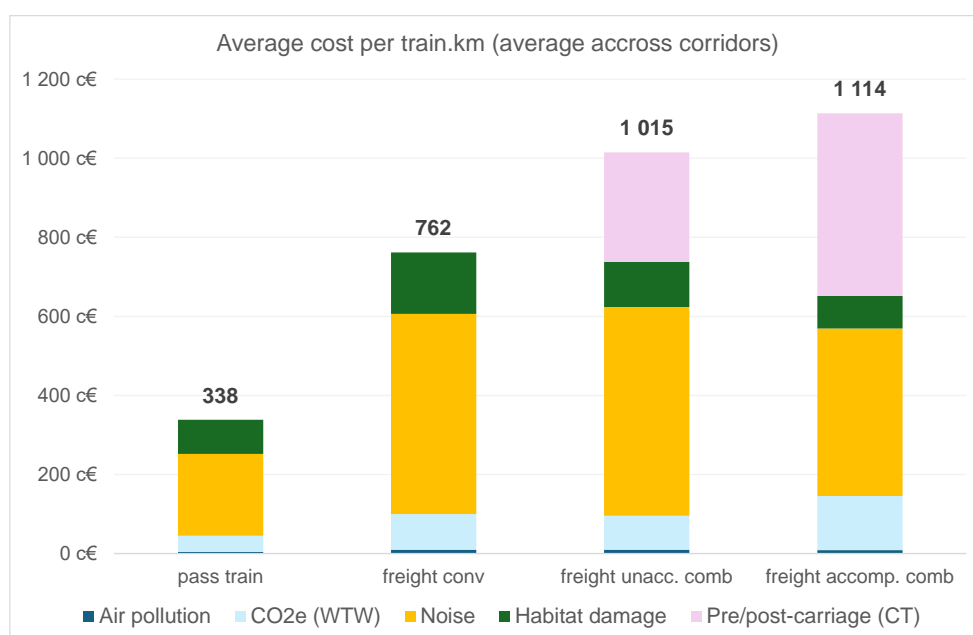


Figure 47: Coûts externes du rail par type de train (passagers et fret)

7. CONCLUSIONS

Cette étude constitue la première estimation complète des coûts externes du transport terrestre sur les corridors alpins. Elle est basée sur les données et études les plus récentes disponibles en 2025 et s'appuie fortement sur les études suivantes :

- Manuel européen des coûts externes (CE Delft 2019), actuellement mis à jour,
- Bruit du transport routier dans un environnement alpin (Cerema 2018),
- La valeur de l'action climatique (France Stratégie, Quinet 2025).

Une analyse SIG approfondie des corridors a été réalisée pour un calcul plus précis en tenant compte de :

- Densité de population le long de chaque corridor,
- Caractéristiques de l'infrastructure (vitesse, nombre de voies, pente, altitude),
- Distinction du type d'environnement naturel (plaine / contreforts alpins / contreforts alpins côtiers / alpin).

Ce travail présente encore des limites dues à certaines incertitudes. Premièrement, il y a un manque de données publiques et d'hypothèses sur le transport ferroviaire en termes de consommation d'énergie par kilomètre, d'impact sonore dans un environnement alpin et de demande de passagers. Certains coûts externes sont également moins connus, avec des incertitudes concernant le facteur alpin à appliquer pour le bruit ainsi que pour la congestion sur les routes transalpines.

Enfin, cette étude se concentre sur les modes de transport terrestres et n'évalue pas les coûts externes du transport aérien (environ 10 millions de passagers ont volé entre l'Allemagne et l'Italie en 2023 selon Eurostat) ni du transport maritime, qui est largement utilisé sur certaines routes comme Espagne – Italie (pour lesquelles il existe également des flux routiers et ferroviaires).

Le tableau suivant résume la perception des auteurs sur les limites et le niveau de confiance pour chaque coût externe calculé.

Tableau 13: Niveau de confiance dans les coûts externes estimés

External cost	Level of confidence	
	Road	Rail
Air pollution	*** Good knowledge of vehicle emissions	* No assumptions on extra-braking due to gradient
Climate change (CO ₂ e, WTW)	*** Question of CO ₂ value, but otherwise good knowledge of vehicle emissions	** Few studies and data on pax train energy consumption
Noise	* Divergent conclusions between GRACE 2006 and CEREMA 2018	* Conclusions of road studies applied to rail
Accidents	** Data analysis inconclusive. Question of infrastructure costs.	/ Not relevant
Habitat damage	** Depends on local environment	** Depends on local environment
Congestion	* Lack of data on time lost at cross-alpine bottlenecks	/ Not relevant
Pre/post-carriage (rail CT)	/ Not relevant	* Uncertainty regarding distances of CT services and pre/post carriage

Level of confidence

***	High level
**	Medium level
*	Low level
/	Not relevant