

## **Infrastructures de transport terrestre et biodiversité : analyser les impacts et la responsabilité des acteurs**

Quantifier l’empreinte matérielle, la fragmentation des habitats et  
l’usage de transport

Nicolas Mondolfo

Master Economie de l’Environnement, de l’Energie et des Transports

**Juré 1** : Jean-Christophe Bureau

**Juré 2** : Emilien Véron

**Tuteur académique** : Julien Wolfersberger

**Encadrant** : Guilherme Magacho

**Co-encadrant** : Antoine Godin

Septembre 2025

# Résumé

Les infrastructures de transport sont principalement étudiées au prisme des flux de transport qu'elles rendent possibles et des conséquences économiques, sociales et environnementales associées. Elles constituent le substrat matériel des transports. De par ce lien d'interdépendance, nous défendons la nécessité d'élargir le cadre d'analyse pour inclure les impacts liés au stock, et la possibilité de fonder l'attribution des responsabilités des dommages sur les usages. Nous mesurons ici deux sources probables de perte de biodiversité liées à la matérialité des infrastructures, à savoir l'usage de matériaux incorporé et la fragmentation des habitats, en comparant systématiquement les infrastructures routières et ferroviaires. L'usage de matériaux est estimé à partir d'une double analyse des flux de matières, spatialement explicite et dynamique ; tandis que la fragmentation est modélisée spatialement et calculée à partir de trois indicateurs. Nous proposons et appliquons ensuite une méthodologie visant à mesurer l'usage des transports par les différents secteurs de l'économie française, en utilisant un modèle input-output pour intégrer le transport induit par l'utilisation de biens intermédiaires. Nous considérons également deux modes de décomposition des résultats, par producteur ou par consommateur. La masse totale incorporée dans les infrastructures est estimée à environ 14 Gt, dont l'immense majorité provient du développement du réseau routier. Contrairement aux voies ferrées, la fragmentation induite par les routes s'étend à l'ensemble du territoire et est inégalement distribuée. En termes d'usage, le transport routier dépasse largement le transport ferroviaire. La production de denrées alimentaires est de loin le premier secteur demandeur de transport de marchandises avec, devant la construction et l'agriculture. La consommation finale des ménages et les exportations représentent les principaux postes d'emplois finals. Ce travail souligne l'importance de considérer sérieusement les boucles de rétroaction entre les usages de transport et la matérialité des infrastructures. Il appelle à relier spatialement les usages des infrastructures, leur empreinte matérielle et physique et les pertes de biodiversité qui en résultent.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
1.1	Motivations . . . . .	7
1.2	Objectifs et approche . . . . .	8
1.3	Contributions . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Revue de littérature</b>	<b>11</b>
2.1	L'accumulation matérielle dans les infrastructures . . . . .	11
2.2	La fragmentation des habitats . . . . .	12
2.3	L'attribution des responsabilités liées aux usages de transports . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Méthodes et données</b>	<b>14</b>
3.1	L'accumulation matérielle : mesures monétaires et physiques . . . . .	14
3.1.1	Les infrastructures de transport terrestre dans les comptes nationaux	14
3.1.2	Estimation de la FBCF par les statistiques d'entreprises . . . . .	16
3.1.3	Confrontation avec d'autres séries d'investissement en infrastructures de transport . . . . .	19
3.1.4	Estimation de l'accumulation matérielle à partir de la longueur des réseaux . . . . .	20
3.2	Fragmentation des habitats . . . . .	22
3.2.1	Délimitation spatiale des habitats . . . . .	22
3.2.2	Modélisation de la fragmentation . . . . .	23
3.2.3	Les indicateurs de fragmentation . . . . .	25
3.3	Attribution des responsabilités fondée sur l'usage de transport . . . . .	29
3.3.1	Pourquoi utiliser l'usage de transport comme critère d'attribution des empreintes liées aux infrastructures ? . . . . .	29
3.3.2	Croisement des données sur l'usage de transports et des données de comptabilité nationale . . . . .	29
3.3.3	Fondamentaux de l'analyse input-output . . . . .	30
3.3.4	Ventilation des volumes de marchandises transportées vers les secteurs du TES . . . . .	31
3.3.5	Un modèle input-output pour attribuer les usages des transports aux secteurs . . . . .	32
3.3.6	Deux perspectives d'attribution des responsabilités : expéditeur ou destinataire . . . . .	34
3.3.7	Les cinq composantes du transport de marchandises et leur prise en compte selon la perspective d'attribution . . . . .	35
3.3.8	Prise en compte du transport de voyageurs et comparaison avec le transport de marchandises . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>38</b>
4.1	L'empreinte matérielle des infrastructures de transport terrestre . . . . .	38
4.1.1	L'estimation de la FBCF comme base fiable pour l'usage de matériaux ? . . . . .	38
4.1.2	Estimation de l'usage de matériaux à partir de la longueur des infrastructures . . . . .	39
4.2	La fragmentation des habitats par les infrastructures . . . . .	42

4.2.1	Statistiques descriptives . . . . .	42
4.2.2	La fragmentation des espaces naturels évaluée par trois indicateurs	43
4.3	Quantifier l'usage de transport pour attribuer des responsabilités . . . . .	47
4.3.1	Contexte et statistiques descriptives pour le transport de marchandises . . . . .	47
4.3.2	Mesure de l'usage de transport basée sur l'expéditeur . . . . .	49
4.3.3	Mesure de l'usage de transport basée sur le destinataire . . . . .	55
4.3.4	Prise en compte du transport de voyageurs et comparaison . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Discussion</b>	<b>58</b>
5.1	Enjeux de méthode, limites et perspectives de recherche . . . . .	59
5.1.1	L'estimation de l'usage de matériaux . . . . .	59
5.1.2	La fragmentation des habitats . . . . .	61
5.1.3	L'attribution des responsabilités fondée sur l'usage de transports . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>66</b>
6.1	Comment attribuer des empreintes aux différents usages des transports face à leur hétérogénéité? . . . . .	66
6.2	Penser la place des infrastructures dans les transitions écologiques . . . . .	68
<b>Annexe</b>		<b>75</b>
A.1	Résultats et figures complémentaires . . . . .	75
A.1.1	Fragmentation des habitats . . . . .	75
A.1.2	Attribution des responsabilités . . . . .	83
A.2	Compléments de méthode . . . . .	84
A.2.1	Estimation de l'usage de matériaux par la longueur des infrastructures	84
A.2.2	Les secteurs de la nomenclature NAF et les produits de la nomenclature NST . . . . .	85
A.2.3	Modèle input-output . . . . .	88
A.2.4	Méthode de conversion des véhicules-kilomètres et voyageurs-kilomètres en tonnes-kilomètres . . . . .	91

# Remerciements

*Aux membres du jury qui prennent le temps de lire avec attention ce travail dans lequel j'ai investi beaucoup d'énergie.*

*Aux interlocuteurs de l'INSEE qui ont accepté de partager avec moi leur expertise sur les comptes nationaux.*

*À Antoine Godin et Guilherme Magacho, pour leurs précieux conseils et pour m'avoir aidé à m'orienter dans ce vaste sujet. Aux occupants du « Bureau des précaires » qui ont égayé mes semaines à l'Agence française de développement. Plus largement, à l'ensemble de l'équipe GEMMES et aux autres collègues qui ont contribué à ce moment d'épanouissement intellectuel et professionnel.*

*À Léa, Philippe, Antoine ; Élodie, Charles, Mathilde et Harold, avec lesquels j'ai partagé les premières expériences qui ont contribué à façonner ce goût marqué que j'ai pour la recherche.*

*À mes parents pour la fierté dont ils témoignent et le soutien inconditionnel qu'ils offrent aux projets de leurs enfants, quels qu'ils soient.*

*À mes amis, en particulier Manon, pour les moments de vie que l'on partage.*

*À Anaïs pour sa positivité au quotidien et sa capacité à me faire tendre constamment vers l'amélioration.*

## Abréviations, sigles et acronymes

---

AFM	Analyse des flux de matières
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire
APU	Administrations publiques
ART	Autorité de régulation des transports
CA	Chiffre d'affaires
CCF	Consommation de capital fixe
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
ED	<i>Edge density</i>
FBCF	Formation brute de capital fixe
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IFI	<i>Infrastructural fragmentation index</i>
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IO	Input-output
ISBLSM	Institution sans but lucratif au service des ménages
LGV	Ligne à grande vitesse
NAF	Nomenclature d'activités française
NST	Nomenclature statistique des transports
ONR	Observatoire national des routes
SDES	Service des données et études statistiques
SEC	Système européen des comptes
SI	Secteur institutionnel
SIPAF	Système d'information des passages à faune
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
TES	Tableau entrées-sorties
TKM	Tonnes-kilomètres
TMJA	Trafic moyen journalier annuel
TVA	Taxe sur la valeur ajoutée
VKM	Véhicules-kilomètres
VOY.KM	Voyageurs-kilomètres
ZNIEFF	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

# Définitions

## **Pavillon**

Ensemble des véhicules immatriculés dans un pays.

## **Secteur institutionnel**

Les secteurs institutionnels regroupent les unités institutionnelles ayant des comportements économiques similaires caractérisés par leur fonction principale et la nature de leur activité. On distingue cinq secteurs institutionnels résidents :

- les sociétés non financières (SNF), S.11 ;
- les sociétés financières (SF), S.12 ;
- les administrations publiques (APU), S.13 ;
- les ménages, S.14 ;
- les institutions sans but lucratif au service des ménages (ISBLSM), S.15.

L'ensemble des unités non-résidentes, dans la mesure où elles entretiennent des relations économiques avec des unités résidentes, sont regroupées dans le reste du monde, le S.2.

## **Tonne-kilomètre**

Transport d'une tonne de marchandises sur un kilomètre.

## **Trafic moyen journalier annuel**

Moyenne sur une année du nombre de véhicules circulant sur un tronçon routier, tous sens confondus, au cours d'une journée.

## **Transport intérieur**

Partie du transport réalisée sur le territoire national. Cette catégorie englobe l'intégralité du transport national, et une partie du transport international.

## **Transport international**

Transport entre un lieu de chargement et un lieu de déchargement situés dans deux pays différents.

## **Transport national**

Transport entre deux lieux (un lieu de chargement et un lieu de déchargement) situés dans le même pays, quel que soit le pays dans lequel le véhicule est immatriculé.

## **Véhicule-kilomètre**

Mouvement d'un véhicule routier sur un kilomètre.

## **Voyageur-kilomètre**

Déplacement d'un voyageur sur un kilomètre.

# 1 Introduction

## 1.1 Motivations

Le développement d'une infrastructure de transport est un moyen d'élargir le champ des possibles d'un point de vue spatial. Un des avantages économiques de ces infrastructures est de diminuer les coûts des échanges en facilitant l'accès au marché. Dans une perspective d'économie institutionnelle, les infrastructures sont des institutions favorables aux échanges, diminuant les coûts de transaction (WILLIAMSON 1985). Les grandes infrastructures constituent donc un substrat matériel des économies capitalistes. Elles participent, comme d'autres institutions au sens de NORTH (1991)<sup>1</sup>, à l'expansion quantitative et spatiale des flux matériels et monétaires, et plus généralement à l'accroissement exponentiel d'un grand nombre de processus d'origine humaine – c'est-à-dire à la « Grande Accélération » (STEFFEN et al. 2015). Ainsi, la littérature a largement documenté le fait que, dans les pays en développement, les infrastructures soutiennent généralement la productivité, l'emploi, et la croissance de la population (NG et al. 2019; FOSTER et al. 2023; MTWEVE et al. 2025). Comme l'expansion d'infrastructures peut favoriser le développement régional, elle est également un enjeu de justice sociale (J. WANG et al. 2023). Le fardeau environnemental que peuvent constituer ces grandes constructions a longtemps été ignoré par le débat public. Or, les enjeux économiques sont de plus en plus souvent mis en balance avec les conséquences écologiques parfois lourdes du développement d'infrastructures, soulignant l'existence d'arbitrages qui étaient auparavant invisibilisés et faisaient inévitablement pencher la balance en faveur de l'expansion des réseaux. Ces questions se déploient notamment dans les pays en développement (MTWEVE et al. 2025), mais plus largement dans l'ensemble des grands projets d'infrastructure comme contrepoids aux intérêts économiques mentionnés, par exemple dans le cas de la *Belt Road Initiative*<sup>2</sup> (ASCENSÃO et al. 2018; TEO et al. 2019). Elles se déploient avec d'autant plus de force dans les contextes où l'impact économique marginal de l'expansion des réseaux est mis en doute, comme dans le cas de l'autoroute A69. Le développement et l'adaptation des infrastructures est donc aujourd'hui à l'intersection des questions de prospérité économique et de transition écologique.

Il devient alors crucial de confronter les impacts environnementaux des infrastructures et les services qu'elles offrent ; c'est-à-dire les flux de voyageurs et de marchandises qu'elles rendent possibles ou facilitent (PAULIUK et MÜLLER 2014; HABERL, WIEDENHOFER, ERB et al. 2017). Parmi les études qui mesurent les impacts environnementaux des infrastructures, une grande majorité se focalise sur les flux liés au développement ou aux transports. Elles mesurent ainsi comment le développement des infrastructures de transport favorise la déforestation (BARBER et al. 2014; MTWEVE et al. 2025) ; quelles émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants sont générées par l'usage des routes (SANTOS 2017; VAN FAN et al. 2018) ou par la construction de routes (INYIM et al. 2016; ARYAN et al. 2023; MTWEVE et al. 2025). Cependant, de manière complémentaire, un pan de la littérature déplace la focale en attribuant une place centrale aux stocks que constituent les infrastructures en

---

1. Douglass North donne la définition suivante des institutions : « *Institutions are the humanly devised constraints that structure political, economic, and social interaction* ». Les infrastructures, qui peuvent être assimilées à des institutions, sont plus précisément une manière de s'affranchir de certaines contraintes, d'assouplir les contraintes qui pèsent sur les interactions des agents économiques.

2. La *Belt and Road Initiative* est un vaste programme lancé par la Chine en 2013 pour développer des infrastructures de transport, d'énergie et de communication, ainsi que des corridors commerciaux reliant l'Asie, l'Afrique, l'Europe et au-delà.

tant que substrats des activités humaines. C'est dans cette perspective que nous nous plaçons ici.

## 1.2 Objectifs et approche

L'ambition initiale de ce travail est de quantifier<sup>3</sup> l'empreinte biodiversité des infrastructures de transport terrestre<sup>4</sup> en France métropolitaine. Sur le plan de l'impact biodiversité, ces infrastructures peuvent être caractérisées par deux traits principaux. D'abord, leur construction implique une extraction massive de ressources naturelles, qui constitue une partie importante de l'empreinte matérielle des nations (WIEDMANN et al. 2015). Ensuite, ces infrastructures marquent le paysage. Elles s'y ancrent durablement et le modifient, non seulement sur le plan esthétique, mais aussi en termes de dynamiques écologiques. Les infrastructures divisent physiquement des espaces naturels en fragments plus petits et éclatés, ce qui a été caractérisé comme la « fragmentation » des habitats ou des paysages (JAEGER 2000).

Nous articulons trois dimensions qui ne sont qu'indirectement connectées (Figure 1). Les deux premières dimensions consistent à quantifier deux causes probables de pertes de biodiversité : l'usage de matériaux par les infrastructures et la fragmentation des habitats par les infrastructures. Si l'objectif final est de connecter ces causes à leurs conséquences, nous nous restreignons à la mesure des causes. La troisième dimension, à savoir la mesure de l'usage des transports comme critère d'attribution, est un choix méthodologique qui se base sur le caractère indissociable des infrastructures et services qu'elles rendent – théorisées au travers de la notion de *stock-flow-service nexus* (HABERL, WIEDENHOFER, ERB et al. 2017). Les infrastructures constituent un stock (de capital fixe ; de matériaux) dont la raison d'être réside dans l'offre de services aux usagers. Autrement dit, les usagers sont bénéficiaires de ces services, proportionnellement à leur usage.

Les usagers peuvent ainsi être tenus responsables des impacts liés aux infrastructures elles-mêmes pour différentes raisons. D'abord, sur le plan de l'usage de matériaux, les usagers de transport sont (ou ont été historiquement) demandeurs pour le développement du réseau, ou sont du moins à l'origine des justifications de développement des réseaux<sup>5</sup>. Lorsqu'elle existe, cette demande n'est généralement pas exprimée individuellement et directement, mais collectivement par des dynamiques d'incitation. De plus, l'usage des infrastructures (c'est-à-dire le service rendu par le stock) a pour contrepartie la dégradation qualitative du stock, qui nécessite ainsi une maintenance plus ou moins fréquente et intensive. Le service implique donc indirectement les flux matériels nécessaires à la maintenance des infrastructures. La fragmentation aussi est liée à l'usage de transports, à la fois directement et indirectement. Le lien direct correspond à l'intensité du trafic, qui est positivement corrélé à l'ampleur de l'effet barrière (BENNETT 2017). Le lien indirect correspond aux caractéristiques techniques des infrastructures (nombre de voies, chaussées séparées) : ces caractéristiques sont déterminées de sorte à offrir des infrastructures

---

3. Pour la distinction entre « mesurer » et « quantifier », cf. DESROSIÈRES et KOTT (2005). Le terme « mesurer » suppose la réalité de l'objet étudié. Par opposition, le terme « quantifier » reconnaît que la mesure qu'on opère est dépendante de conventions opérées par le statisticien.

4. Par infrastructures de transport terrestre, nous entendons à la fois les infrastructures ferroviaires et routières, et ne considérons que le coeur de ces infrastructures, c'est-à-dire le réseau emprunté par les véhicules (voies ferrées et chaussées routières).

5. Ces justifications par la demande des usagers s'observent bien dans les discours défendant des projets controversés, comme celui de l'autoroute A69 en France.

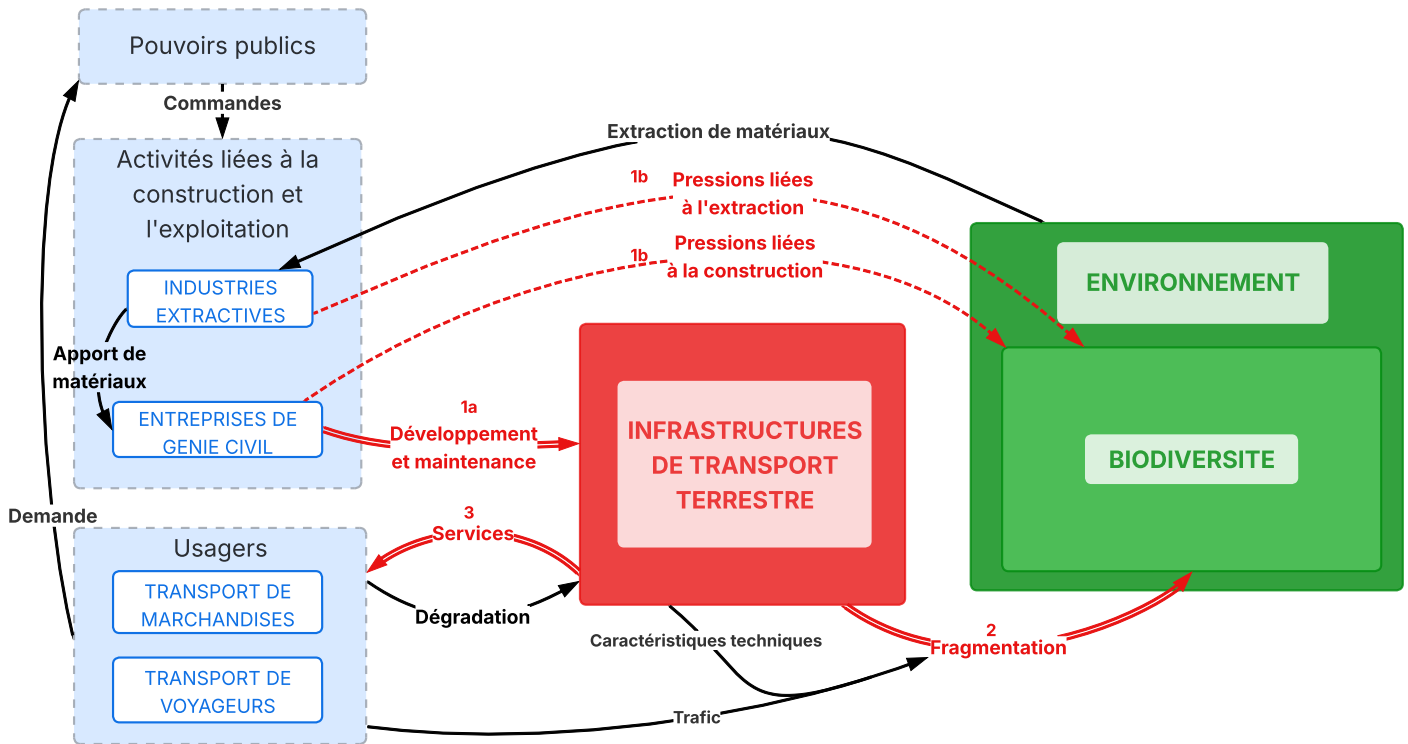


FIGURE 1 – Les interactions entre activités humaines, infrastructures de transport terrestre et biodiversité. Les flèches rouges représentent les flux qui sont centraux dans les trois dimensions de notre analyse : usage de matériaux, fragmentation des habitats et attribution basée sur l’usage des transports. Les flèches rouges pointillées représentent les flux qui sont d’intérêt particulier pour la mesure de l’empreinte biodiversité mais que nous n’avons pas pu mesurer.

adaptées aux usages anticipés<sup>6</sup>.

Ce contexte justifie l’articulation entre ces trois dimensions, à priori relativement indépendantes, qui sont donc traitées séparément dans un premier temps. Dans la Figure 1, les flèches rouges représentent les flux centraux dans les différentes dimensions. Nous étudions d’abord un premier flux d’impacts : l’usage de matériaux pour développement et maintenance des infrastructures (1a). Celui-ci est indirectement connecté à la biodiversité, en particulier par les impacts des activités d’extraction de matériaux et par les impacts des travaux de génie civil (1b), que nous n’avons pas pu explorer ici. Dans un second temps, nous mesurons la fragmentation causée par les infrastructures de transport terrestre (2). Enfin, nous mesurons les flux de services (3) offerts par les infrastructures de transport terrestre à différents types d’usagers, avec l’objectif final d’attribuer les responsabilités des causes de pertes de biodiversité mesurées dans les deux premières parties.

Nous explorons les manières de comparer l’usage de transport de différentes activités, avec une emphase sur le transport de marchandises des secteurs économiques et secteurs institutionnels. L’activité de transport de marchandises est un service, qui a pour particularité de lier – spatialement et économiquement – un offreur (le producteur du bien) et un demandeur (le consommateur du bien). La question des responsabilités est évidemment

6. Bien qu’en pratique, les usages anticipés et les usages effectifs peuvent diverger pour un grand nombre de raisons

normative. On peut avancer que les producteurs sont responsables, car ils tirent profit des infrastructures de transport pour distribuer leurs produits. On peut tout autant défendre que c'est le consommateur final qui est responsable du transport, car c'est celui-ci qui bénéficie du produit transporté. La méthode que nous présentons, fondée sur l'analyse input-output, permet d'envisager les deux points de vue. Nous explorons également les manières de comparer le transport de voyageurs et le transport de marchandises.

### 1.3 Contributions

Ce travail contribue à une réflexion sur le statut du secteur des transports dans les transitions écologiques, en insistant sur l'importance des infrastructures comme substrat des activités de transport, et sur leur non-neutralité environnementale. La transition dans les transports est souvent pensée en termes de flux, ce qui s'illustre par la centralité de l'objectif de décarbonation. Nous soutenons que cette neutralité envisagée ne peut pas considérer que les flux si elle implique de développer de nouvelles infrastructures. En effet, les impacts multiples liés à la construction et à l'entretien de ces infrastructures sont un contrepois qu'il convient de ne pas négliger. Si nous nous concentrons sur la biodiversité, les autres types d'impacts doivent également être pris en compte si l'on souhaite penser la transition écologique sous l'ensemble de ses dimensions.

Notre travail permet également de situer ce secteur dans le cadre des comptes nationaux français, ce qui peut servir de support pour des études sur le secteur des transports en France qui utilisent les agrégats des comptes nationaux. Nous avons par exemple identifié quels secteurs sont producteurs des infrastructures, à quel actif correspondent ces infrastructures dans la nomenclature du SEC, et exploré la question complexe de la propriété des actifs dans le contexte des concessions et des partenariats public-privé. Plus généralement, nous faisons un état des lieux des données, monétaires ou non, disponibles concernant le transport routier, le transport ferroviaire et les infrastructures associés en France métropolitaine. Nous explorons également les opportunités pour connecter les données issues des comptes nationaux et les autres données liées au transport routier et ferroviaire disponibles en France.

L'élaboration d'un cadre théorique pour attribuer les empreintes environnementales des infrastructures à partir de l'usage de transports est une contribution méthodologique. Nous disposons de données détaillées sur le transport routier et ferroviaire de 20 types de produits différents, et élaborons une table de correspondance entre ces produits et les 37 secteurs du TES. On propose deux manières d'envisager l'attribution des empreintes : se baser sur l'usage de transport de l'expéditeur final ou sur celui du destinataire final, en prenant en compte les effets indirects (via un modèle de Leontief), les importations et les exportations. Notre cadre théorique présente les différentes dimensions du transport incorporé dans la consommation d'un produit (en distinguant l'usage de transports sur le territoire domestique et celui sur le territoire des pays importateurs et exportateurs). Nous présentons également comment ces différentes composantes du transport incorporé dans un produit doivent être prises en compte, selon qu'on se place dans une perspective d'attribution des responsabilités basée sur l'expéditeur ou sur le destinataire. Nous décrivons ensuite comment il serait possible de connecter explicitement la question de l'usage de transports avec celle des impacts sur la biodiversité ; et explorons les opportunités et limites liées aux données disponibles pour la France métropolitaine.

## 2 Revue de littérature

### 2.1 L'accumulation matérielle dans les infrastructures

Le champ du métabolisme social reconnaît le lien fondamental entre les stocks matériels, la manière dont ils façonnent l'environnement, et leurs fonctions pour les êtres humains (leurs « services ») (PAULIUK et MÜLLER 2014). Certains travaux s'attachent donc à décrire et quantifier le lien entre les flux matériels, les stocks que ces flux servent à constituer, et les usages qui sont faits de ces stocks. Ainsi, les analyses du cycle de vie et analyses des flux de matières (AFM) quantifient l'usage de matériaux incorporé dans les bâtiments et les infrastructures (WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. 2015; KRAUSMANN et al. 2017). L'approche dominante a longtemps été statique : les quantités mesurées correspondent exclusivement aux flux induits par le développement des infrastructures (FEDERICI et al. 2008). Or, la maintenance des infrastructures est un déterminant majeur de l'ampleur des flux, et représente la majorité des flux contemporains de matériaux liés aux infrastructures dans l'Union européenne (WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. 2015). Les analyses des flux de matières dynamiques se sont ensuite multipliées pour prendre en compte également les flux induits par la maintenance (AUGISEAU et BARLES 2017). Une évolution récente consiste à utiliser des données spatialement explicites pour cartographier les stocks de matériaux (par exemple Z. WANG et al. (2023) et WIEDENHOFER, SCHUG et al. (2024)). Si elles permettent d'avoir un niveau de précision élevé, les méthodes spatialement explicites ont pour inconvénient d'être statiques – elles donnent l'image à un instant donné des stocks de matériaux de construction dans une région déterminée.

Les AFM concernant les matériaux de construction mettent en général l'emphase sur les matériaux les plus importants en termes de masse, à savoir les minéraux non métalliques, qui sont généralement peu coûteux et dont la production et la consommation à l'échelle mondiale s'accroissent fortement depuis plusieurs décennies (GILJUM et al. 2016; MIATTO, SCHANDL, FISHMAN et al. 2017). Elles quantifient aussi généralement la masse d'un certain nombre de métaux et autres matériaux communs (AUGISEAU et BARLES 2017; GROSSEGGGER et al. 2024). La masse totale de matériaux de construction présente dans les infrastructures a été estimée dans de nombreux pays européens par des AFM. Pour la région Ile-de-France, AUGISEAU et KIM (2021) estiment cette masse à environ 570 millions de tonnes (Mt)<sup>7</sup> pour les routes et 30 Mt pour les voies ferrées. WIEDENHOFER, SCHUG et al. (2024) estiment à 8,5 milliards de tonnes (Gt)<sup>8</sup> la masse incorporée dans les routes et voies ferrées au Royaume-Uni, tandis que HABERL, WIEDENHOFER, SCHUG et al. (2021) obtiennent 13 Gt pour l'Allemagne et 2,2 Gt pour l'Autriche. En Belgique, environ 800 Mt sont incorporés dans les routes (Z. WANG et al. 2023).

Ces concepts liés à l'accumulation matérielle trouvent une traduction dans les cadres comptables : les stocks sont appelés capital fixe, leur accumulation est appelée formation brute de capital fixe (FBCF), et leur dépréciation s'approche par la consommation de capital fixe (CCF). En analyse input-output, la prise en compte des interactions stocks-flux s'est traduite par le développement de méthodes d'endogénéisation du capital (SODERSTEN et al. 2018; YE et al. 2021), qui ne traitent plus la FBCF comme une composante de la demande finale, mais comme un flux endogène, nécessaire à la production au même titre que la consommation intermédiaire de biens, dont les transactions

---

7. Mt signifie mégatonne, c'est-à-dire un million de tonnes.

8. Gt signifie gigatonne, c'est-à-dire un milliard de tonnes.

intersectorielles sont au coeur des méthodes input-output. Confronter la CCF et la FBCF permet donc d'estimer la part de l'investissement correspondant à l'expansion du capital fixe (c'est la part de la FBCF qui couvre la dépréciation des actifs, c'est-à-dire la CCF) et l'autre part (excédentaire) correspondant à la compensation de sa dépréciation. Les analyses de flux de matière dynamiques et les analyses input-output avec endogénéisation du capital ont en commun de considérer la dynamique du stock de capital et sa dépendance aux flux. En revanche, la différence fondamentale entre ces deux approches est que la première est fondée sur des grandeurs physiques, tandis que la seconde repose sur des mesures monétaires.

L'usage de matériaux peut impacter la biodiversité de plusieurs manières. D'abord, les activités extractives peuvent exercer des pressions sur la biodiversité dans les espaces où elles sont localisées (SAYARA et al. 2016 ; SALGUEIRO et al. 2020). Elles ont été assimilées à un « saccage des rivières », et leur « consommation d'espaces » (MAGALHÃES 2022, pp. 93-101) peut conduire à la destruction d'habitats. Ensuite, les activités de construction des infrastructures peuvent également exercer des pressions sur la biodiversité. Les travaux de génie civil induisent des pertes d'habitats lorsqu'ils impliquent des activités de déforestation (MTWEVE et al. 2025). Les matériaux utilisés eux-mêmes peuvent être écotoxiques (PARK et al. 2020). Ces travaux induisent aussi la compaction des sols (KODIKARA et al. 2018). Cette compaction affecte la biodiversité des sols ; elle réduit la biomasse microbienne et plus largement l'abondance de la faune et de la flore dans ces sols, et altère leurs propriétés chimiques (NAWAZ et al. 2013).

## 2.2 La fragmentation des habitats

Les champs de la *road ecology* et *railway ecology* investiguent les effets de la présence de routes et de voies ferrées (respectivement) sur la faune. Ces effets peuvent être répartis en trois catégories (BENNETT 2017). Il y a d'abord les impacts directs, à savoir les collisions entre la faune et les usagers des infrastructures. Ensuite, il existe des effets indirects, en particulier l'effet barrière lorsque la présence physique de l'infrastructure gêne le déplacement de la faune. Enfin, certaines conséquences de long terme sur la persistance des espèces peuvent être liées à la présence d'infrastructures, comme la difficulté d'accès à la nourriture ou aux lieux de reproduction. La fragmentation des habitats, quant à elle, consiste en la division d'un habitat continu en parcelles plus petites et isolées. De plus, le développement d'infrastructures peut provoquer indirectement des changements d'usage des sols et des fragmentations supplémentaires en favorisant l'urbanisation (KASRAIAN et al. 2016). Nous limitons dans cette étude la mesure de la fragmentation à l'effet direct.

La présence physique de voies peut avoir un double effet négatif sur les habitats. D'abord, elle peut conduire à une perte d'habitat pour les espèces pour des raisons comportementales. Certaines espèces évitent la proximité des routes, par exemple à cause des nuisances sonores et du passage fréquent de véhicules (BENNETT 2017 ; BARRIENTOS, ASCENSÃO, D'AMICO et al. 2021 ; DÍAZ et MALHI 2022). De plus, le passage de voies peut créer des fragments et réduire la connectivité entre ceux-ci, par exemple lorsqu'ils sont protégés par des barrières, constituant de fait un effet barrière (BARRIENTOS, ASCENSÃO, BEJA et al. 2019). La littérature en *road ecology* a identifié des corrélations entre les caractéristiques des routes et leur impact sur la biodiversité (BENNETT 2017). Ainsi, les accidents impliquant des animaux sont plus nombreux sur les routes où il y a plus de trafic, où la chaussée est plus large, et où la vitesse des voitures est plus élevée. De même, un trafic élevé est associé à une moindre abondance d'espèces. Une étude de BARRIENTOS,

ASCENSÃO, BEJA et al. (2019) compare les caractéristiques des infrastructures routières et ferroviaires, et leurs conséquences probables en termes d’impact sur la biodiversité. Parmi les principales différences, les auteurs soulignent que sur les infrastructures ferroviaires : (1) le trafic est bien plus faible, (2) le trafic se caractérise par de longs intervalles sans passage, (3) les emprises sont beaucoup moins larges et parfois entourées de barrières, et (4) les trains rejettent moins de polluants, en particulier les trains électriques.

## 2.3 L’attribution des responsabilités liées aux usages de transports

La question de la responsabilité fait écho à une division classique dans la comptabilisation des empreintes, entre une approche *production-based* et une approche *consumption-based*. Dans le premier cas, qui correspond aux méthodes de comptabilité carbone usuelles, c’est le producteur du bien qui supporte l’empreinte. Dans le second, qui est celui adopté par l’analyse input-output (IO), c’est l’unité émettrice de la demande finale qui supporte l’empreinte (PETERS 2008). L’analyse IO permet de prendre en compte les impacts indirects liés à la demande d’inputs pour satisfaire la demande finale, et ainsi d’identifier des interdépendances implicites. Ces interdépendances peuvent être entre différents pays, ou entre différents secteurs d’un même pays. Au sein d’un pays, l’analyse input-output permet par exemple d’identifier les secteurs clés (SCHULTZ 1977). LEE et YOO (2016) mesurent en Corée du Sud la dépendance de l’économie vis-à-vis des secteurs des transports, en distinguant l’importance des secteurs des transports en tant qu’acheteur (pour les secteurs qui vendent, directement ou indirectement, des inputs utilisés par les transports), et en tant que vendeur (pour les secteurs qui utilisent, directement ou indirectement, des transports comme input).

En termes d’attribution des responsabilités, les extensions environnementales de l’analyse input-output ont par exemple permis d’identifier les pressions sur la biodiversité (LENZEN et al. 2012) et sur la déforestation (PENDRILL et al. 2019) induites par le commerce international, en identifiant également les pays à l’origine de ces pressions. Ces responsabilités sont généralement attribuées en distribuant un vecteur d’intensités environnementales entre les secteurs, en fonction de leur consommation intermédiaire et de leur demande finale. Cette méthode peut plus largement être utilisée pour distribuer n’importe quel vecteur d’intensités. Ainsi, ROCA FLORIDO et MAIR (2025) comparent les multiplicateurs de valeur ajoutée brute, d’emplois et d’émissions de gaz à effet de serre des secteurs de l’économie marine au Royaume-Uni. Dans le cas des transports, il est donc possible de distribuer des intensités d’usage de transport de marchandises, à partir d’un vecteur de volume transporté par fret par type de bien (NEALER et al. 2011 ; ALISES et VASSALLO 2016 ; XU et al. 2021). Un défi particulier posé par cette méthode est l’homogénéisation des données : il faut faire correspondre la classification des produits transportés par fret avec les secteurs des tableaux entrées-sorties (ALISES et VASSALLO 2016). Par conséquent, ces méthodes sont souvent limitées par le niveau de détail (sectoriel) des données sur le transport de marchandises. XU et al. (2021) disposent de données sur le volume total transporté en Chine et sur le volume transporté de certains produits parmi les plus importants (numériquement), mais sont obligés d’estimer les volumes pour les produits restants. ALISES et VASSALLO (2016) agrègent les secteurs du tableau entrées-sorties en huit secteurs pour qu’ils correspondent aux catégories de produits dans les données de transport routier, et perdent ainsi des distinctions sectorielles importantes – par exemple entre les types de produits manufacturés, essentiellement regroupés dans le

secteur « Manufacturing products ». La rareté de données sur le volume transporté par type de produit, ainsi que le décalage entre les secteurs des tableaux entrées sorties et les produits reportés dans ces données, conduisent systématiquement à des hypothèses et choix méthodologiques importants.

En plus du transport routier de marchandises, nous souhaitons prendre en compte le transport routier de voyageurs pour que notre approche intègre l'ensemble des usages de transport, et pour pouvoir effectuer des comparaisons. La question de leur commensurabilité se pose immédiatement : comment mesurer simultanément le transport de marchandises et le transport de voyageurs, tout en ayant une mesure pertinente dans le cadre de l'attribution des empreintes ? La distance totale parcourue peut être une mesure intéressante de l'empreinte relative de l'usage de transport routier pour les marchandises et pour les voyageurs. Par exemple, sur le plan de l'usage de matériaux, le volume de trafic (nombre de véhicules) contribue à dégrader la chaussée (GUPTA et al. 2011), et donc à accélérer le cycle de maintenance. Sur le plan de la fragmentation des habitats, les études en *road ecology* concluent en grande majorité que l'effet barrière est accru par le volume de trafic (BENNETT 2017 ; FITCH et VAIDYA 2021). La distance totale parcourue par un véhicule se mesure avec le véhicule-kilomètre (vkm), qui constitue donc notre premier indicateur de comparaison. Cependant, le vkm a pour inconvénient de ne pas prendre en compte le gabarit et le poids des véhicules. Or, le transport de marchandises est composé essentiellement de véhicules volumineux et lourds – d'autant plus lourds qu'ils sont chargés avec des marchandises. Si l'on réfléchit au prisme de la détérioration des infrastructures routières – donc des besoins de maintenance engendrés par les usagers –, le passage de véhicules lourds dégrade de manière disproportionnée la chaussée (CHOWDHURY et al. 2013). Du point de vue de la *road ecology*, les véhicules plus imposants sont également généralement les plus bruyants (MASRI et al. 2024), ce qui peut constituer une nuisance pour les espèces sensibles aux bruits anthropiques, qui se retrouvent dans l'ensemble des groupes taxonomiques (KUNC et SCHMIDT 2019). On peut alors mesurer la masse transportée (multipliée par la distance) avec les tonnes-kilomètres (tkm), mesure qui est généralement utilisée pour le transport routier de marchandises, mais qui peut de fait être étendue au poids des passagers et des véhicules eux-mêmes.

## 3 Méthodes et données

### 3.1 L'accumulation matérielle : mesures monétaires et physiques

#### 3.1.1 Les infrastructures de transport terrestre dans les comptes nationaux

La première piste que nous explorons pour estimer l'accumulation matérielle à partir de données monétaires est de reconstruire la FBCF pour les activités de construction des infrastructures de transport. Il s'agit donc de décortiquer les postes de la nomenclature NAF pour comprendre lesquels sont responsables de la construction des infrastructures, et lesquels sont responsables de leur exploitation et détiennent les actifs correspondant à ces infrastructures. Cette nomenclature comprend cinq niveaux emboîtés. Le niveau d'agrégation est crucial. Plus le niveau est détaillé, plus son contenu est ciblé et permet une analyse sectorielle fine (cf. l'exemple de la section « Transports et entreposage », Table 2), moins l'INSEE diffuse de résultats, entre autres à cause de problématiques de secret statistique (INSEE 2025). L'enjeu est d'identifier le niveau d'analyse pertinent : suffisamment désagréé pour ne prendre en compte que les activités pertinentes, mais

au niveau d'agrégation le plus élevé possible pour maximiser la disponibilité de données diffusées par l'INSEE.

Section	Division	Groupe	Classe	Sous-classe
H - Transports et entreposage	49 - Transports terrestres et transports par conduite	49.1	...	49.10Z - Transport ferroviaire interurbain de voyageurs
H - Transports et entreposage	49 - Transports terrestres et transports par conduite	49.2	...	49.20Z - Transports ferroviaires de fret
H - Transports et entreposage	49 - Transports terrestres et transports par conduite	...	...	...
H - Transports et entreposage	49 - Transports terrestres et transports par conduite	49.5	...	49.50Z - Transports par conduites
H - Transports et entreposage	50 - Transports maritimes et côtiers de passagers	50.1	...	50.10Z - Transports maritimes et côtiers de passagers
H - Transports et entreposage	50 - Transports maritimes et côtiers de passagers	...	...	...
H - Transports et entreposage	51 - Transports aériens	...	...	...
H - Transports et entreposage	52 - Entreposage et services auxiliaires des transports	...	...	...
H - Transports et entreposage	52 - Entreposage et services auxiliaires des transports	52.2	...	52.21Z - Services auxiliaires des transports terrestres
H - Transports et entreposage	52 - Entreposage et services auxiliaires des transports	...	...	...
H - Transports et entreposage	52 - Entreposage et services auxiliaires des transports	52.2	...	52.29A - Messagerie, fret express
H - Transports et entreposage	52 - Entreposage et services auxiliaires des transports	52.2	...	52.29B - Affrètement et organisation des transports
H - Transports et entreposage	53 - Activités de poste et de courrier	...	...	...

TABLE 2 – Niveaux emboîtés de la nomenclature NAF : l'exemple de la section H « Transports et entreposage »

Les activités responsables de la production d'infrastructures sont toutes regroupées dans la « Construction » (section F)<sup>9</sup>, et plus précisément dans le « Génie civil » (division 42)<sup>10</sup>. A partir du niveau des groupes<sup>11</sup>, la construction d'infrastructures de transport terrestre est isolée des autres (groupe 42.1, « Construction de routes et de voies ferrées »). C'est enfin au quatrième niveau, celui des classes, que sont différenciées les activités de « Construction de routes et d'autoroutes » (42.11) et celles de « Construction de voies ferrées de surface et souterraines » (42.12), auxquelles on ajoute la « Construction de ponts et de tunnels » (42.13), que ce soit destiné au réseau routier ou ferroviaire. Le dernier niveau, celui des sous-classes, n'apporte une désagrégation supplémentaire que pour la construction de ponts (« Construction d'ouvrages d'art », 42.13A) et de tunnels (« Construction de tunnels », 42.13B). Les emplois finals des produits de la section Construction sont de la FBCF à hauteur d'environ 90%, le reste étant constitué des la consommation finale des ménages<sup>12</sup> – donc de la demande des ménages en travaux de construction pour les bâtiments résidentiels. Les travaux de construction pour le résidentiel étant intégralement compris dans les activités des autres divisions de la section (« Construction de bâtiments » et « Travaux de construction spécialisés »), nous savons que les emplois finals de la division Génie civil (42) sont intégralement de la FBCF. Cette division a de plus l'avantage de correspondre précisément à la production d'un type d'« actif non financier produit » au sens du Système européen des comptes (EUROPEAN COMMISSION 2013), à savoir les « Autres ouvrages de génie civil » (AN.1122), qui sont distingués des « Bâtiments non résidentiels » (AN.1121). Cette distinction est reprise par l'INSEE dans les comptes nationaux. La FBCF pour les actifs de type N.1122<sup>13</sup> renvoie aux activités productives de la division Génie civil (42), là où la FBCF pour les actifs de type N.1121 renvoie à celles de la division Construction de bâtiments (41). Les comptes nationaux permettent donc de voir l'évolution des stocks de capital fixe en infrastructures, net ou brut (c'est-à-dire diminué ou non de la consommation de capital fixe, qui mesure la dépréciation des actifs), via la diffusion de séries temporelles sur le « Capital fixe brut en

9. Les sections constituent le premier niveau (sur cinq) de la nomenclature NAF

10. Les divisions sont le second niveau de la nomenclature NAF

11. Les groupes sont le troisième niveau de la nomenclature NAF

12. cf. tableau entrées-sorties, TEF : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8068640?sommaire=8068749>

13. Ce type d'actif est appelé AN.1122 dans la nomenclature du Système européen des comptes, et N.1122 dans la nomenclature des Comptes Nationaux français.

autres ouvrages de génie civil par branche »<sup>14</sup>. Ces tableaux donnent notamment l'évolution du stock de capital fixe par le secteur « Transports et entreposage », ne permettant pas de distinguer les activités de transport du reste. Cela illustre l'impossibilité d'utiliser directement les données des comptes nationaux pour estimer l'usage de matériaux induit par la construction et la maintenance des infrastructures de transport terrestre. En effet, les données de FBCF, de consommation de capital fixe (CCF), et de stock de capital fixe sont au mieux diffusées au deuxième niveau (88 produits, permettant de distinguer seulement entre les divisions, c'est-à-dire permettant seulement d'isoler le génie civil du reste des travaux de construction), mais le plus souvent à un niveau intermédiaire entre le premier et le deuxième (à 38 produits, ne donnant que des chiffres agrégés pour le secteur de la construction dans son ensemble). Par exemple, le tableau entrées-sorties (TES) qui permet d'analyser les transactions monétaires entre différents secteurs (qui sont au cœur de l'analyse input-output, donc cruciales pour appliquer la méthode initialement envisagée), n'est pas diffusé au-delà du niveau à 38 produits. La Table 3 résume la différence entre les niveaux de données idéalement disponibles et les niveaux de diffusion. Ce niveau de diffusion du tableau entrées-sorties rend impossible son usage dans le but d'estimer l'empreinte matérielle des activités de construction d'infrastructures. Du côté des demandeurs de matériaux, le TES est diffusé au niveau de la section Construction, qui agrège l'ensemble des activités de construction, y compris les bâtiments et le génie civil. Du côté de l'offre de matériaux, on n'a également que des produits agrégés, par exemple l'ensemble des produits minéraux non-métalliques. Par conséquent, la demande de la Construction en Produits minéraux non-métalliques a un caractère trop mal défini pour permettre d'envisager sérieusement d'en faire la base de l'estimation d'une empreinte matérielle : parmi les activités de Construction, quelle est l'ampleur relative de la demande de ces produits ? Et surtout, quels sont les produits minéraux non-métalliques achetés pour la construction d'infrastructures ? sont-ils les mêmes que ceux achetés pour la construction de bâtiments ? sont-ils achetés au même prix ? De plus, on ne connaît que la transaction monétaire entre les secteurs : le flux matériel, quant à lui, devrait être estimé en se basant sur un prix unitaire des biens : comment obtenir une série temporelle des prix des produits utilisés dans la construction et la maintenance d'infrastructures ? Ce sont autant de questions dont les réponses devraient faire l'objet d'hypothèses fortes, conduisant à un degré d'incertitude très élevé. De telles considérations nous ont amené à reconsidérer la méthode utilisée.

Type de données	Niveau de diffusion effectif	Niveau optimal pour l'analyse	Usage des données
FBCF par produit	42 - Génie civil	42.11 - Construction de routes [...] 42.12 - Construction de voies ferrées [...]	Usage de matériaux : investissement
CCF	42 - Génie civil	42.11 - Construction de routes [...] 42.12 - Construction de voies ferrées [...]	Usage de matériaux : dépréciation
TES	H - Transports et entreposage	49.1 - Transport ferroviaire interurbain de voyageurs 49.2 - Transports ferroviaires de fret ...	Attribution des responsabilités

**TABLE 3 – Différence entre le niveau de diffusion effectif et le niveau de diffusion optimal pour notre travail**

### 3.1.2 Estimation de la FBCF par les statistiques d'entreprises

En l'absence de données sur la FBCF et la CCF à des niveaux suffisamment désagrégés pour estimer l'investissement dans les infrastructures de transport ferroviaire et

14. Tables 6.411 et 6.441 des comptes nationaux, voir <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8068604?sommaire=8068749>

roucier, des méthodes alternatives sont envisageables pour approcher ces valeurs. Tout d'abord, nous pouvons estimer séries de FBCF en utilisant les données issues des statistiques annuelles d'entreprises (dispositif Elaboration des statistiques annuelles d'entreprises, Esane), publiées à un niveau de désagrégation correspondant à nos besoins. L'idée ici est d'estimer la FBCF parmi les emplois finals, en reconstruisant l'équilibre ressources-emplois au niveau des activités de la Construction de routes et d'autoroutes (sous-classe 42.11), de la Construction de voies ferrées de surface et souterraines (sous-classe 42.12), et de la Construction de ponts et tunnels (sous-classe 42.13).

Nous partons de l'équilibre ressources-emplois (au prix d'acquisition), qui par définition se vérifie pour l'ensemble des activités économiques :

$$\sum \text{Emplois finals} + \sum \text{Emplois intermédiaires} = \sum \text{Ressources}$$

Cet équilibre, si on le développe avec les emplois finals et les ressources, s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned} & \text{Consommation finale} + \text{FBCF} + (\text{Acquisition} - \text{Cession d'objets de valeur}) \\ & + \text{Variation des stocks} + \text{Exportations} + \sum \text{Emplois intermédiaires} \\ = & \text{Production au prix de base} + \text{Importations de biens et de services} + \text{Correction} \\ & + \text{Marges commerciales} + \text{Marges de transport} \\ & + \text{Impôt sur les produits} + \text{Subventions sur les produits} \end{aligned}$$

Or, pour la Construction qui est un produit particulier, une grande partie de ces emplois et ressources sont nuls ou quasiment nuls, ce qui permet de grandement simplifier l'expression. Du côté des ressources, en regardant les tableaux des ressources en produits (Tableau entrées-sorties) pour 2018-2022, on constate que les importations sont très faibles (moins d'1% des ressources), la correction est nulle, les marges commerciales et marges de transport sont nulles, et les subventions sur les produits sont nulles. Du côté des emplois, les acquisitions moins cessions d'objets de valeur sont nulles, la variation des stocks est très faible (0,3 à 0,5% des emplois) et surtout, la consommation finale est non-nulle seulement pour les ménages. Or, la consommation finale des ménages en Construction correspond forcément à une demande liée aux logements résidentiels, et est forcément nulle pour le génie civil. On en déduit donc que les dépenses de consommation finale sont nulles pour la division Génie civil. Cela conduit à l'équilibre ressources-emplois suivant pour les produits du Génie civil :

$$\begin{aligned} & \text{FBCF totale} + \text{Exportations} + \sum \text{Emplois intermédiaires} \\ & \approx \text{Production au prix de base} + \text{Impôts sur les produits} \end{aligned} \quad (1)$$

Cet équilibre réduit considérablement les besoins en termes de données et permet d'isoler la FBCF pour l'estimer à partir des autres termes. Les données correspondant aux autres termes ne sont pas toutes disponibles dans Esane. Nous disposons dans Esane, à tous les niveaux de la nomenclature NAF jusqu'aux sous-classes, du chiffre d'affaires (CA) par branche et du CA effectué sur exportations, qui sont utilisés respectivement comme proxies de la Production au prix de base et des Exportations. Notons que l'usage du CA par branche est cohérent avec la méthode des comptes nationaux, qui effectue un « passage en branches » pour calculer les agrégats selon les activités effectives des entreprises, et non selon leur attribution à un secteur selon leur activité principale. Le CA sur exportations, quant à lui, est calculé à l'échelle du secteur et non de la branche, et fournit

donc une approximation imparfaite des exportations au niveau de la branche. On observe des disparités assez importantes entre les données des comptes nationaux et les données d'Esane lorsqu'elles sont comparables. Ainsi, la production par produits des comptes nationaux est en moyenne (annuelle) 15,8% plus élevée que le CA par branche d'Esane pour le Génie civil. Inversement, les exportations de la Construction dans le TES sont 57% plus basses que le CA sur exportations de la Construction dans Esane. Pour que notre estimation soit aussi cohérente que possible avec les comptes nationaux, nous ajustons les valeurs ventilées obtenues dans Esane pour que leur somme égale les valeurs totales reportées dans les comptes nationaux. Pour les années où certaines données sectorielles manquent pour certaines sous-classes à cause du secret statistique, nous calculons le reste à imputer à partir de la différence entre la valeur totale pour le Génie civil et la somme des valeurs connues pour les sous-classes du Génie civil, puis nous imputons en fonction des ratios observés entre les secteurs pour les années où nous disposons des données. Le reste des variables n'est pas disponible dans Esane. Nous utilisons donc les comptes nationaux pour compléter le jeu de données, en utilisant ensuite des proportions pour redistribuer les valeurs initialement agrégées entre les différentes sous-classes. D'abord, nous disposons de la consommation intermédiaire par produit au niveau 88 postes, soit pour la division Génie civil<sup>15</sup>. Nous redistribuons cette valeur totale de la consommation intermédiaire en Génie civil entre les sous-classes du Génie civil, proportionnellement au ratio entre le CA des branches et le CA total du Génie civil<sup>16</sup>. Quant aux impôts sur les produits, on connaît la valeur totale pour les produits de la Construction dans le TES. Cette valeur est cependant trop agrégée pour être simplement distribuée proportionnellement, notamment parce que la TVA ne s'applique pas uniformément sur tous les produits de la Construction, certains travaux bénéficiant de taux réduits<sup>17</sup>. Ce n'est pas le cas du Génie civil, dont la TVA est à 20%. Notre approche est donc d'estimer le chiffre d'affaires soumis à la TVA, et de multiplier sa valeur par 0,2 pour estimer les impôts sur les produits. Puisque les entreprises ne paient pas de TVA sur leur consommation (les emplois intermédiaires), et les entités étrangères ne paient pas non plus la TVA (pour les exportations), nous estimons les impôts sur les produits ainsi :

$$TVA = 0.2 * (CA\ branche - \sum\ Emplois\ intermediaires - CA\ sur\ exportations)$$

On estime ensuite la FBCF à partir de l'équation 2, au niveau de chaque sous-classe  $i$  :

$$FBCF_i \approx CA\ branche_i - \sum\ Emplois\ inter_i - CA\ exportations_i + TVA_i \quad (2)$$

Avec cette méthode, nous obtenons une valeur de la FBCF pour le Génie civil qui est en moyenne 4,9% supérieure aux valeurs reportées dans les comptes nationaux. Nous ajustons donc encore une fois nos données pour que la valeur totale de la FBCF qu'on estime égale la FBCF des comptes nationaux. Enfin, on passe en volume en multipliant nos valeurs par la série de l'indice des prix associés à la division Génie civil. Nous obtenons ainsi une série de la FBCF entre 2009 et 2022 pour la Construction de routes et d'autoroutes (classe

15. A noter que cette consommation intermédiaire par produit ne correspond pas à la consommation de biens par le secteur du Génie civil pour sa production, mais la consommation intermédiaire de biens produits par le secteur du Génie civil dans la production de l'ensemble des secteurs.

16. L'hypothèse forte sous-jacente est que le ratio entre consommation intermédiaire du produit et production du produit est identique entre toutes les sous-classes du Génie civil.

17. Les travaux concernés sont répertoriés sur ce site : <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/tva-taux-reduit-pour-queles-travaux>

42.11), pour la Construction de voies ferrées de surface et souterraines (classe 42.12), et pour la Construction de ponts et de tunnels (classe 42.13).

### 3.1.3 Confrontation avec d'autres séries d'investissement en infrastructures de transport

Nous explorons également les données issues des comptes d'entreprises, qui constituent les sources des agrégats liés aux actifs tangibles (FBCF et CCF) publiés par l'INSEE. Ainsi, pour le transport ferroviaire, SNCF Réseau publie chaque année depuis 2003 ses comptes annuels<sup>18</sup>. On retrouve parmi les données publiées la valeur comptable des immobilisations corporelles de l'entité, ventilée en fonction du type d'actif, y compris pour le type « Voies, terrassements, ouvrages d'art et passages à niveaux », qui correspond au réseau en tant que tel. On connaît également la valeur des investissements pour immobilisations corporelles, ventilés entre plusieurs postes correspondant à l'expansion du réseau (« Grands projets de développement », « Projets régionaux de développement ») ou à sa maintenance (« Renouvellement et performance »). On peut donc approximer les investissements d'expansion et de maintenance des voies par la SNCF. Le contenu exact de ces investissements est cependant imparfaitement connu, agrégeant les dépenses engagées pour les voies avec un ensemble d'autres dépenses non identifiées. Le problème principal lié à cette approche est surtout un manque d'exhaustivité : puisque les comptes d'entreprise sont publiés au niveau individuel, il faudrait non seulement identifier l'ensemble des entreprises possédant les actifs liés aux infrastructures routières et ferroviaires, mais aussi pouvoir accéder à leurs comptes d'entreprise, qui ne sont pas systématiquement disponibles en libre accès – surtout lorsqu'il s'agit de plus petites sociétés. En outre, la propriété des actifs est une notion comptable compliquée et qui est gérée au cas-par-cas lorsque le secteur public cède temporairement l'exploitation du réseau au secteur privé, c'est-à-dire dans le cas des partenariats public-privé et des concessions (EUROPEAN COMMISSION 2023). Par exemple, pour le transport ferroviaire, la quasi-totalité des actifs sont détenus par SNCF Réseau, mais une partie appartient également temporairement aux concessionnaires et aux partenariats publics-privés, ce qui n'est toutefois pas systématique. Dans le cas des transports routiers, la situation est encore plus complexe, avec un grand nombre de sociétés ou de filiales concessionnaires d'autoroutes. L'Etat est propriétaire des routes non concédées, et de la plupart des routes concédées. En bref, la complexité des situations et le grand nombre de sociétés impliquées malgré un marché oligopolistique rend cette méthode difficilement applicable pour une analyse systématique à l'échelle nationale. De plus, les amortissements comptables diffèrent de la dépréciation calculée par la méthode de l'inventaire permanent utilisée dans les comptes nationaux. Utiliser ces amortissements serait donc un proxy peu satisfaisant pour la CCF.

Enfin, une dernière piste à explorer est celle des données publiées par des organisations internationales à partir de déclarations des Etats membres. Eurostat publie chaque année les dépenses des Etats membres de l'UE en infrastructures de transport ferroviaire et en infrastructures de transport routier, en distinguant les dépenses de développement et les dépenses de maintenance. Pour la France, seules les données sur le transport routier sont disponibles. Les données de l'OCDE ont la même structure et sont quant à elles également disponibles pour le transport ferroviaire. Cependant, ces séries constituent des formes de boîtes noires, reposant sur les déclarations des instituts statistiques nationaux et d'autres

---

18. Les comptes annuels de SNCF Réseau sont accessibles publiquement via ce lien : [https://www.sncf-reseau.com/fr/toute-la-documentation?filter\\_category=29](https://www.sncf-reseau.com/fr/toute-la-documentation?filter_category=29).

sources diverses. Les dépenses recensées ne correspondent pas à une définition délimitée et précise, au contraire de la FBCF par exemple. De fait, la série de l’OCDE contient des ruptures temporelles importantes qui révèlent les contours flous de ces données et la part d’arbitraire dans leur construction. De plus, comme dans le cas des comptes d’entreprises, les dépenses considérées concernent les infrastructures dans leur ensemble, et rien ne laisse supposer que l’ensemble puisse être imputé au développement et au maintien des voies. Ainsi, ces données clés en main peuvent être utilisées pour la simplicité qu’elles offrent, mais seulement dans un but exploratoire et en interprétant les résultats avec précaution.

### 3.1.4 Estimation de l’accumulation matérielle à partir de la longueur des réseaux

Nous estimons l’accumulation matérielle en deux temps. Dans un premier temps, nous mesurons de manière statique mais spatialement explicite les stocks de matériaux incorporés dans les infrastructures de transport terrestre. Il faut ainsi disposer de données sur la localisation des tronçons routiers et les intensités matérielles. De plus, comme les routes ne sont pas homogènes, il s’agit de désagréger à la fois la longueur du réseau et les intensités matérielles selon des archétypes (WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. 2015 ; MIATTO, SCHANDL, WIEDENHOFER et al. 2017). Dans un second temps, nous souhaitons mesurer également les apports de matériaux nécessaires à la maintenance des infrastructures. Pour cela, nous effectuons une AFM dynamique. Cela nécessite des données supplémentaires, puisqu’il faut distinguer l’expansion du réseau et sa maintenance. Il faut donc estimer les cycles de maintenance des différents types de réseau – ou en termes économiques : les investissements pour compenser la dépréciation du capital fixe –, et distinguer les intensités matérielles impliquées par la construction de celles impliquées par le renouvellement. Nous utilisons les intensités matérielles compilées par AUGISEAU et KIM (2021) pour un cas d’étude sur l’Île-de-France, à la fois pour mesurer les stocks de manière spatialement explicite (première dimension) et pour mesurer l’usage de matériaux pour expansion (seconde dimension).

#### Approche spatialement explicite

L’approche spatialement explicite consiste à mesurer la somme des usages de matériaux sur l’ensemble des tronçons situés sur chaque unité spatiale. Les fichiers de forme contenant les caractéristiques des tronçons routiers et ferrés sont issus de BD Carto<sup>19</sup>. Pour caractériser les unités spatiales, nous utilisons une grille de la France métropolitaine constituée de mailles de 10 km par 10 km. Les intensités en matériau  $m$  des voies de type  $s$  sont notées  $MI_{s,m}$ . Les mailles sont indexées par  $j$ , et les tronçons de type  $s$  situés à l’intérieur de la maille  $j$  sont indexés par  $s, j$ . Les intensités que nous utilisons sont reportées en kg par mètre linéaire pour les voies ferrées et en kg par mètre carré pour les routes. Ainsi, pour les voies ferrées, avec  $l_{s,j}$  la longueur de l’ensemble des tronçons de type  $s$  à l’intérieur de  $j$ , la masse de matériau  $m$  dans chaque maille se note :

$$M_{j,m} = \sum_s MI_{s,m} * l_{s,j} \quad (3)$$

Pour les routes, avec  $A_{s,j}$  l’aire de l’ensemble des tronçons de type  $s$  à l’intérieur de  $j$ , la masse de matériau  $m$  dans chaque maille se note :

$$M_{j,m} = \sum_s MI_{s,m} * A_{s,j} \quad (4)$$

---

19. Version de mars 2025

L'usage de matériaux total incorporé dans les infrastructures d'une maille se calcule simplement comme la somme des masses des différents types de matériaux dans cette maille ( $\sum_m M_{j,m}$ ).

## Approche dynamique

L'approche dynamique requiert des données concernant l'évolution de la longueur des réseaux, routier et ferroviaire. Nous tirons ces données du Bilan annuel des transports (SDES 2024a). Ce rapport publie notamment la longueur des autoroutes et routes nationales depuis 1980 et la longueur des routes départementales et voies communales depuis 1990. De même pour le réseau ferroviaire, nous connaissons la longueur des lignes par type de voie depuis 1980. La longueur totale des réseaux permet d'approximer les besoins de maintenance, et les variations interannuelles (positives) des longueurs du réseau permettent d'approximer l'expansion. Suivant les données disponibles dans le Bilan annuel des transports, nous distinguons quatre types de voies ferrées et quatre types de routes. Les voies ferrées sont des Lignes à voie unique, Lignes à deux voies, Lignes à trois voies et plus, et Lignes à grande vitesse. Les routes sont des Autoroutes, Routes nationales, Routes départementales et voies communales. Concernant les cycles de maintenance, nous les mesurons par les durées de vie des actifs provenant de deux rapports techniques récents : un rapport de l'Observatoire national des routes (ONR 2025) pour les routes, et un rapport de l'Autorité de régulation des transports (ART 2025) pour les voies ferrées. Les durées de vie par type de voie  $N_s$  sont reportées en Annexe.

Nous devons également estimer les intensités matérielles pour la maintenance. Pour cela, nous réutilisons les intensités matérielles de AUGISEAU et KIM (2021), en les adaptant aux opérations de maintenance. Comme WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. (2015), pour le renouvellement, nous posons l'hypothèse que l'entretien des routes consiste en la réfection des couches de roulement. Il nécessite donc un apport d'enrobé bitumineux en surface<sup>20</sup>. La maintenance des voies ferrées consiste quant à elle à renouveler entièrement les voies, en changeant le ballast (en granulats), les traverses (en bois) et les rails (en acier) avec des intensités identiques à l'apport pour expansion. Les intensités matérielles des routes étant initialement en kg par m<sup>2</sup>, nous les convertissons en kg par mètre linéaire (méthode décrite en Annexe). Les intensités en matériau  $m$  des voies de type  $s$  sont notées  $MI_{s,m}^{EXP}$ , et  $MI_{s,m}^{MAINT}$  pour l'expansion et pour la maintenance, respectivement.

Nous estimons le développement suivant la méthode de WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. (2015). Avec  $E_{s,t}$  la longueur des infrastructures de type  $s$  à l'année  $t$ , on a

$$E\_change_{s,t+1} = E_{s,t+1} - E_{s,t} \quad (5)$$

Alors l'expansion du réseau  $E\_add$  est mesurée pour  $E\_change > 0$  (nulle sinon), et le rétrécissement du réseau ( $E\_decl$ ) est mesuré pour  $E\_change < 0$ . L'usage de matériaux pour expansion à l'année  $t$  est :

$$M_{s,m,t}^{EXP} = E\_add_{s,t} * MI_{s,m}^{EXP} \quad (6)$$

Pour chaque année, nous suivons le vieillissement des cohortes de voies entre 0 et  $N_s$  années. Nous mesurons ainsi l'ampleur de la maintenance comme le renouvellement de l'ensemble des actifs arrivés en fin de vie (c'est-à-dire la longueur d'infrastructure  $E\_EoL_{s,t}$

---

20. Avec un usage d'enrobé bitumineux uniquement pour la réfection de la couche de roulement, sans refaire la couche de liaison. On suppose que la couche de roulement représente environ 40% de la profondeur de la couche de surface (qui agrège couche de roulement et couche de liaison), et que l'apport est donc égal à 40% de celui pour expansion.

ayant atteint l'âge  $N_s$  en l'année  $t$ ). Nous retranchons  $E\_decl_{s,t}$  de la maintenance, supposant donc que la longueur du réseau mise hors service correspond à des actifs en fin de vie non renouvelés. L'usage de matériaux pour la maintenance est donc :

$$M_{s,m,t}^{MAINT} = (E\_EoL_{s,t} - E\_decl_{s,t}) * MI_{s,m}^{MAINT} \quad (7)$$

Si  $E\_decl$  est supérieur à  $E\_EoL$ , cette valeur est remplacée par 0 pour ne pas estimer une quantité de maintenance négative. A l'année  $t + 1$ , la quantité de voies renouvelées en  $t$  sont ajoutées à la cohorte des actifs neufs. Les actifs neufs sont donc d'une longueur de  $E\_add_{s,t+1} + E\_EoL_{s,t} - E\_decl_{s,t}$ .

Ne disposant de données qu'à partir de 1980, nous imputons à l'année 1980 l'ensemble des expansions jusqu'à cette année. Cela n'a pas d'incidence sur les résultats, hormis le fait qu'on soit obligé de simuler l'âge moyen des voies en 1980. Nous modélisons cet âge du stock initial selon une loi uniforme entre 1 et  $N_s$  la durée de vie de l'infrastructure de type  $s$ . De cette sorte, chaque année entre 1980 et  $1980 + N_s$  voit une maintenance d'une quantité  $\frac{1}{N_s} E_{s,1980}$ .

## 3.2 Fragmentation des habitats

Quantifier la fragmentation à une grande échelle requiert de confronter la localisation des infrastructures et celle des habitats. Ces caractéristiques impliquent un travail méthodologique sur trois dimensions : la sélection des couches d'habitats, la modélisation de la fragmentation par les infrastructures de transport terrestre, et la sélection d'indicateurs reflétant le contraste entre (1) une situation contrefactuelle représentant l'absence de fragmentation par les infrastructures et (2) la situation effective représentant la fragmentation par les infrastructures. L'utilisation de plusieurs couches d'habitats et de plusieurs indicateurs nous permet d'obtenir des résultats qui se complètent et se valident entre eux.

### 3.2.1 Délimitation spatiale des habitats

D'abord, nous devons caractériser ce qu'est un habitat pour les espèces, c'est-à-dire sélectionner une couche de données spatiales permettant de délimiter les contours des habitats. Plusieurs approches sont envisageables. On peut délimiter les espaces naturels à partir des modes d'occupation des sols généralement propices à la biodiversité (CEREMA 2022; CEREMA 2024), à savoir les espaces naturels et semi-naturels en France. La couche que nous utilisons provient de la base de données Corine Land Cover<sup>21</sup>, dans sa version la plus récente, datée de 2018. Suivant cette même méthode, nous créons des polygones d'espaces naturels à partir de la fusion des polygones dont l'attribut d'occupation des sols est naturel ou semi-naturel. Nous excluons donc des espaces naturels :

- les territoires artificialisés sauf les espaces verts urbains ;
- les territoires agricoles sauf les prairies, les surfaces essentiellement agricoles interrompues par des espaces naturels importants, et les territoires agroforestiers ;
- Les cours et voies d'eau, plans d'eau, lagunes littorales, estuaires et les mers et océans.<sup>22</sup>

21. Ces données sont téléchargeables sur ce lien : <https://www.data.gouv.fr/datasets/corine-land-cover-edition-2018-france-metropolitaine/>

22. Cette dernière non-inclusion est sujette à discussion, et le Cerema a d'ailleurs successivement exclus et inclus ces espaces (à l'exception des mers et océans). Puisque nous souhaitons ici caractériser spéci-

Cette approche a pour avantage d’adopter une définition large des habitats, ce qui permet de ne pas ignorer complètement les régions où les habitats sont très rares. Cette première couche a un défaut important, qui est de rassembler tous les postes d’occupation des sols derrière le terme « espaces naturels ». Dans notre analyse, il conduit donc à modéliser comme un ensemble homogène des espaces qui, en réalité, ont des qualités très hétérogènes en tant que réserves de biodiversité. Pour pallier ce défaut et compléter notre analyse, nous utilisons une couche spatiale délimitant les Zones naturelles d’intérêt écologique, faunistique et floristiques (Znieff) en France métropolitaine. Les Znieff ont été délimitées par une expertise scientifique avec l’impulsion des pouvoirs publics en France (HORELLOU et al. 2017), et ont été cartographiées (LEPAREUR et al. 2022). Les Znieff sont réparties en deux catégories : les Znieff de type I sont « des secteurs de superficie en général limitée, caractérisés par la présence d’espèces, d’associations d’espèces ou de milieux rares, remarquables, ou caractéristiques du patrimoine naturel national ou régional », tandis que les Znieff de type II sont définies comme des « grands ensembles naturels (massifs forestiers, vallées, plateaux, estuaires, etc.) riches et peu modifiés, ou qui offrent des potentialités biologiques importantes » (SFF 1982). Ainsi, cette couche ne contient que des zones qui ont été classifiées comme ayant un intérêt écologique important. Par conséquent, l’interprétation de la fragmentation sur la première couche permet d’apprécier l’ampleur de la fragmentation des espaces naturels, tandis que l’interprétation de la fragmentation sur cette seconde couche permet de pondérer cette fragmentation par l’importance écologique des espaces – de manière binaire, puisqu’on exclut simplement les espaces non classés Znieff. Nous utilisons la couche des Znieff la plus récente pour la France métropolitaine, qui a été publiée en juin 2025.

### 3.2.2 Modélisation de la fragmentation

Ensuite, nous devons caractériser ce qu’est une infrastructure fragmentante : à partir de quelles caractéristiques pouvons-nous déterminer si, oui ou non, une route ou une voie ferrée qui traverse un habitat divise effectivement en plusieurs fragments l’habitat initial ? Un critère déterminant ici est l’ampleur de l’effet barrière causé par l’infrastructure, c’est-à-dire à quel point cette dernière gêne ou empêche le déplacement des espèces pour des raisons matérielles ou comportementales (BARRIENTOS, ASCENSÃO, BEJA et al. 2019). Cet effet barrière lui-même est déterminé par plusieurs caractéristiques, dont le volume de trafic (BREHME et al. 2013 ; SEIDLER et al. 2015), la largeur de la chaussée (OLIVEIRA JR et al. 2011 ; BREHME et al. 2013), la séparation des chaussées par une barrière ou un terre-plein, et la protection latérale des chaussées par une barrière ou un terre-plein. On conçoit facilement qu’une autoroute à quatre voies protégée par des barrières empêche entièrement le passage des espèces, là où une route départementale rurale à faible trafic ne constitue pas un véritable obstacle.

Nous modélisons la fragmentation en coupant les couches de polygones d’habitats par deux couches de lignes : la première représentant les routes, la seconde représentant les voies ferrées. Lorsqu’on utilise la couche Corine Land Cover du CEREMA (2020), pour avoir une cohérence temporelle des données, nous utilisons la base de données ROUTE 500<sup>23</sup> pour l’année 2018. Lorsqu’on utilise la couche des Znieff, on utilise la version la plus récente de la base de données BD CARTO<sup>24</sup> pour la France métropolitaine, publiée

---

fiqument la fragmentation des espaces naturels par des voies terrestres, nous excluons ces occupations des sols.

23. Publiée jusqu’en 2021 par l’IGN, voir <https://geoservices.ign.fr/route500>

24. BD CARTO a intégré les données de ROUTE 500, voir <https://geoservices.ign.fr/bdcarto>

Nombre de chaussées	Classe administrative ou Vocation	Largeur de l'emprise (m)
1	Autoroute ou Nationale Type autoroutier ou Bretelle	$3,5 * NB\_VOIES + 2 * 11$
2	Autoroute ou Nationale Type autoroutier ou Bretelle	$3,5 * NB\_VOIES + 2 * 15$
1	Autres	$3,5 * NB\_VOIES + 2 * 3$
2	Autres	$3,5 * NB\_VOIES + 2 * 4$

TABLE 4 – Largeur de l'emprise modélisée en fonction des caractéristiques des routes

en mars 2025. Nous présentons ici la méthode utilisée pour modéliser la fragmentation à partir de ROUTE 500, mais les deux itérations sont similaires.

Ces deux bases de données offrent des caractéristiques détaillées de l'ensemble des routes et voies ferrées qu'elles recensent. Nous connaissons par exemple pour les routes : le nombre de voies, le nombre de chaussées, la classe administrative (route départementale, route nationale ou autoroute), et la vocation de la route<sup>25</sup>. Pour les voies ferrées, nous utilisons la distinction entre les tronçons grande vitesse et les autres. Nous utilisons ces caractéristiques, suivant la méthode du CEREMA (2020), pour définir si les routes et voies ferrées sont fragmentantes, et pour modéliser la largeur de l'emprise des segments fragmentants. Les routes sont considérées comme fragmentantes si elles sont revêtues et ont une vocation de « Type autoroutier », « Bretelle », « Liaison principale » ou « Liaison régionale ». Nous incluons également les routes « Liaison locale » ayant au moins deux voies. Nous modélisons ensuite la largeur de l'emprise, qui se traduit en un tampon autour des lignes représentant les routes – ces lignes deviennent donc des polygones. Nous retenons les largeurs d'emprise reportées par le CEREMA (2020) en fonction du nombre de voies, de la présence de chaussées séparées ou non, et du type de route. Ces largeurs sont reportées dans la Table 4. Nous modélisons de la même manière les emprises des infrastructures ferroviaires. Nous disposons cependant de peu de caractéristiques. Nous considérons comme fragmentantes l'ensemble des voies ferrées classées « En service ». Nous ne disposons pas, dans la base de données ROUTE 500, d'informations sur le nombre de voies<sup>26</sup>. Le CEREMA (2020) modélise les emprises suivantes : si le tronçon appartient au réseau grande vitesse, alors son emprise mesure 70m s'il y a une voie, et 80m s'il y a deux voies ou plus. Si le tronçon n'est pas une LGV, alors son emprise mesure 10m s'il y a une voie, et 15m s'il y a deux voies ou plus. Ne disposant pas de données sur le nombre de voies, nous utilisons les valeurs moyennes, c'est-à-dire 75 mètres pour les tronçons grande vitesse, et 12,5 mètres pour les autres tronçons. Nous excluons des données les routes et voies ferrées considérées comme non fragmentantes. Nous obtenons donc une couche de polygones représentant les emprises des routes et voies ferrées fragmentantes.

A cette étape, nous avons donc d'un côté les polygones d'espaces naturels (qui diffèrent selon la couche qu'on utilise), et de l'autre les polygones des infrastructures fragmentantes. Suivant une contribution supplémentaire du CEREMA (2024), nous prenons en compte les passages à faune, dispositifs mis en place pour réduire l'effet barrière lié à la présence physique des infrastructures de transport terrestre. Pour cela, nous exportons les données

25. La vocation est une hiérarchisation du réseau en fonction de l'importance des segments routiers, indépendamment de la classe administrative

26. Dans BD CARTO, l'information sur le nombre de voies est disponible. Cependant, la version de BD CARTO datée de 2018 est indisponible à l'heure actuelle. L'étude du CEREMA (2020) utilise BD CARTO version 2018, ce qui amène à quelques différences en termes de possibilités de modélisation.

du Système d'information des Passages à Faune (SIPAF) <sup>27</sup>. Ce fichier contient une couche de points sur l'ensemble des passages à faune recensés en France métropolitaine. Utilisant l'attribut *Longueur de Franchissement*, nous créons un tampon d'une largeur de  $50 + \text{Longueur de Franchissement}$  mètres autour des points de cette couche. Nous ajoutons 50 mètres pour tolérer les erreurs de projection et les données manquantes pour cette longueur de franchissement (parfois égale à 0 mètres dans les données). Pour prendre en compte la réduction de l'effet barrière, nous faisons la différence entre cette couche de polygones (issue du tampon sur les points) et les emprises des routes et voies ferrées fragmentantes.

Ensuite, nous modélisons la fragmentation en tant que telle, en faisant la différence entre une couche d'espaces naturels et une couche modélisant l'emprise des infrastructures de transport fragmentantes. Notons que l'opération à l'étape précédente permet de ne pas couper les polygones d'espaces naturels lorsque les infrastructures comportent un passage à faune. Nous supprimons les fragments de moins de 0,5 hectares pour éviter de prendre en compte des fragmentations factices liées à des différences marginales entre la couche d'espaces naturels et la couche des emprises. Nous obtenons trois couches : la première représente la fragmentation par les routes seulement, la seconde représente la fragmentation par les voies ferrées seulement, et la troisième représente la fragmentation totale par les infrastructures de transport terrestre. Cela rend possible une approche comparative entre infrastructures routières et ferroviaires, tout comme une approche considérant l'impact total des infrastructures de transport.

### 3.2.3 Les indicateurs de fragmentation

Enfin, nous devons sélectionner des indicateurs pour caractériser l'ampleur de la fragmentation. Nous la mesurons à l'échelle de la France métropolitaine, divisée en mailles (arbitraires) de 10km\*10km, selon le même découpage que pour l'usage de matériaux. Puisque nous évaluons séparément la fragmentation par les infrastructures routières et ferroviaires, nous calculons systématiquement l'indicateur de fragmentation pour un type d'infrastructure en faisant abstraction de l'existence de l'autre type d'infrastructure.

La question de la mesure de la fragmentation des habitats et des paysages a été largement explorée par la littérature. Beaucoup d'indicateurs ont été proposés et discutés depuis les années 1990 (MCGARIGAL 1995). Ces indicateurs doivent refléter différentes dimensions de la fragmentation pour être pertinents et complémentaires. Ils peuvent également être redondants s'ils sont fortement corrélés entre eux (HARGIS et al. 1998). FLOWERS et al. (2020) recense les relations généralement admises entre cinq types de caractéristiques des espaces naturels (qu'il convient de mesurer) et les pertes de biodiversité associées. Des espaces plus vastes sont plus propices à la biodiversité, tout comme une exposition moins importante aux bordures. Une forme d'espace naturel plus complexe et une moindre connectivité entre cet espace et les autres est moins propice à la biodiversité. Enfin, un espace qui présente une forme d'homogénéité avec le paysage dominant est plus favorable à la biodiversité. Ces indicateurs n'ont généralement pas été créés spécifiquement pour décrire la fragmentation causée par les infrastructures de transport, mais certains peuvent être pertinents dans ce contexte. Nous retenons trois indicateurs fréquemment utilisés dans la littérature. Ces indicateurs ont été choisis pour être complémentaires, c'est-à-dire de sorte à mettre l'accent sur différentes caractéristiques de la fragmentation.

---

27. Données téléchargeables via le lien suivant : [https://passagesfaune.fr/geonature/#/modulator/m\\_sipaf](https://passagesfaune.fr/geonature/#/modulator/m_sipaf), consulté en mai 2025.

Notre sélection d'indicateurs met l'emphase sur les dimensions qui sont intuitivement les plus susceptibles de varier avec la présence des infrastructures : la surface des espaces naturels et la distance aux bordures. De plus, nous abordons dans une certaine mesure la question de la connectivité entre patchs en utilisant un indicateur qui reflète le degré d'occlusion des infrastructures de transport.

La taille effective de maille,  $M_{eff}$ , mesure la taille moyenne des espaces naturels au sein d'une unité géographique (JAEGER 2000). Celui-ci a été utilisé dans plusieurs études récentes visant à quantifier la fragmentation causée par les infrastructures de transport (CEREMA 2022 ; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ et al. 2022). Son expression mathématique est la suivante :

$$\forall j, \quad M_{effj} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ij}^2}{A_j}$$

Avec  $j$  l'unité géographique,  $A_j$  l'aire totale de cette unité, et pour  $i = 1, \dots, n$ ,  $A_{ij}$  l'aire de chaque polygone d'espace naturel au sein de cette unité. En l'occurrence, puisque nos unités géographiques sont des carreaux de 10km\*10km, nous avons pour chaque unité  $A_j = 100 \text{ km}^2$ . Si aucune infrastructure ne fragmente d'espaces naturels dans la maille, alors le taux de variation sera nul. A l'inverse, si un grand nombre de tronçons traversent des espaces naturels initialement très vastes, alors le taux de variation sera très élevé, et la variation en valeur absolue encore plus. Cette métrique a aussi l'intérêt de fortement pondérer les grands espaces naturels, particulièrement propices à la biodiversité (FLOWERS et al. 2020). Schématiquement, si un espace naturel de  $4\text{km}^2$  ( $M_{eff} = \frac{4^2}{100} = \frac{16}{100}$ ) est fragmenté en deux espaces de  $2\text{km}^2$ , nous obtiendrons une taille effective de maille plus faible que s'il est fragmenté en  $3\text{km}^2$  et  $1\text{km}^2$  ( $M_{eff} = \frac{2*2^2}{100} = \frac{8}{100}$  contre  $\frac{3^2+1^2}{100} = \frac{10}{100}$ ). Cette mesure pénalise également implicitement le nombre de patchs créés par la fragmentation, puisque la valeur des termes au carré sera d'autant plus petite qu'il y a de fragments par rapport au patch unique initial. C'est donc un indicateur à la fois simple, facile à interpréter, et possédant un ensemble de propriétés désirables pour refléter le degré de fragmentation par les infrastructures.

La *Edge density* ( $ED$ ) dépend à la fois de la complexité des formes et de la taille des patchs d'espaces naturels – une complexité élevée de la forme et une surface moindre de l'habitat étant généralement associées à un habitat de moindre qualité (FLOWERS et al. 2020). Elle s'exprime comme le ratio entre le périmètre et l'aire du polygone. Comme notre unité géographique de référence est une maille de 10km de côtés,  $ED$  est le ratio entre la somme des périmètres et la somme des aires sur l'ensemble des polygones compris dans la maille. Nous déduisons évidemment du périmètre les bordures des mailles, qui sont artificielles. Elle s'exprime donc ainsi :

$$\forall j, \quad ED_j = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ij}}{A_{ij}}$$

Avec pour  $i = 1, \dots, n$ ,  $A_{ij}$  et  $P_{ij}$  l'aire et le périmètre (respectivement) de chaque polygone d'espace naturel au sein de la maille  $j$ . Nous regardons encore une fois la différence entre la valeur initiale de cet indicateur, et la valeur après fragmentation par les infrastructures. En l'absence de fragmentation, la variation sera nulle. S'il y a fragmentation, en revanche,  $ED$  augmentera mécaniquement. En effet, le périmètre total augmentera au moins légèrement puisque la fragmentation crée de nouvelles bordures, et l'aire totale diminuera légèrement puisqu'une partie de la surface d'espaces naturels est remplacée par l'emprise

des infrastructures<sup>28</sup> Cet indicateur pénalise fortement le nombre d'interruptions par des infrastructures, ainsi que les longues interruptions : toutes deux augmentent fortement le ratio entre périmètre et aire des polygones. De plus, le ratio entre périmètre et aire augmente moins fortement si le tronçon est rectiligne ou quasi-rectiligne, ce qui est le cas de la plupart des routes et de toutes les voies ferrées. Il augmente plus fortement si la route est incurvée ou sinueuse.

Enfin, l'indicateur *Infrastructural fragmentation index (IFI)* a été créé par DI LUDOVICO et ROMANO (2000) spécifiquement pour quantifier la fragmentation par des infrastructures. Cet indicateur, par rapport aux deux autres qui ne sont pas spécifiques, a pour intérêt de prendre en compte les caractéristiques des infrastructures via l'inclusion d'un indice d'occlusion (BRUSCHI et al. 2015 ; DE MONTIS et al. 2017 ; LEDDA et DE MONTIS 2019). Cet indice d'occlusion doit refléter la différence d'ampleur de l'effet barrière en fonction des caractéristiques. C'est généralement la forme suivante de l' *IFI* qui est retenue (DE MONTIS et al. 2017 ; LEDDA et DE MONTIS 2019 ; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ et al. 2022), pour un polygone  $i$  :

$$IFI_i = \left( \sum_{k=1}^K L_k * O_k \right) * N_i * \frac{P_i}{A_i}$$

Avec pour  $k = 1, \dots, K$  les infrastructures qui traversent le polygone :  $L_k$  la longueur de l'intersection et  $O_k$  l'indice d'occlusion associé à l'infrastructure.  $N_i$  est le nombre de fragments résultant du passage d'infrastructures. Enfin,  $\frac{P_i}{A_i}$  est le ratio entre le périmètre du polygone et son aire. A l'échelle d'une maille  $j$  de 10km de côtés, l'indicateur se mesure simplement comme :

$$IFI_j = \sum_{i=1}^n IFI_{ij}$$

C'est-à-dire comme la somme des *IFI* des polygones  $i$  compris dans la maille  $j$ . Cet indicateur est en partie corrélé à *edge density* puisqu'il contient le ratio entre périmètre et aire du polygone. Cependant, celui-ci est pondéré par les autres termes. C'est en particulier le terme d'occlusion qui joue un rôle important dans la pondération. Ce terme n'a pas d'unité ou d'existence propre, il est défini et construit par le chercheur qui cherche à hiérarchiser et estimer l'importance relative des effets barrières en fonction des caractéristiques des infrastructures. Il a donc un caractère relativement arbitraire, que l'on souhaite limiter au maximum. La littérature retient généralement les valeurs suivantes pour l'indice d'occlusion :  $O_i = 1$  pour les autoroutes et voies ferrées, à cause de la présence de barrières le long de l'infrastructure ;  $O_i = 0.5$  pour les routes à haut trafic (généralement approximé par la classe administrative des routes) à cause des perturbations liées au bruit et au passage fréquent de véhicules, et  $O_i = 0.3$  pour les petites routes qui perturbent dans une moindre mesure la faune. Ce sont ces valeurs qui sont retenues par exemple par BRUSCHI et al. (2015) et DE MONTIS et al. (2017). Pour les voies ferrées, nous distinguons les tronçons LGV qui sont presque systématiquement entourés de barrières, des autres tronçons qui ne le sont majoritairement pas. En l'absence de données sur la présence de barrières autour des tronçons, nous considérons  $O_i = 1$  pour les tronçons LGV et  $O_i = 0.3$  pour les autres tronçons. Concernant les routes, nous disposons de plus de caractéristiques. Pour

---

28. En pratique, comme nous avons supprimé les fragments de moins de 0,5 ha des couches représentant les espaces fragmentés, il se peut que le ratio entre périmètre et aire diminue très légèrement de manière artificielle. Dans ces rares cas, nous avons remplacé les valeurs par 0.

que le terme d’occlusion ne soit pas entièrement tributaire de la classe administrative des tronçons qui ne reflète qu’en partie les caractéristiques physiques de la route, nous pondérons ces valeurs pour qu’elles puissent varier jusqu’à  $\pm 50\%$  par rapport à la valeur initiale, en fonction des caractéristiques des tronçons. Les trois termes servant à la pondération s’additionnent et valent chacun entre  $-\frac{1}{6}$  et  $\frac{1}{6}$ , de sorte qu’une infrastructure qui présente les caractéristiques les moins fragmentantes sur chacune des dimensions aura un indice d’occlusion de 50% inférieur à sa valeur initiale, contre une valeur 50% supérieure à la valeur initiale pour une infrastructure présentant toutes les caractéristiques les plus fragmentantes. Chaque terme de pondération correspond à une caractéristique :

- Le premier terme dépend de la largeur de la chaussée. Une chaussée plus large représente une barrière physique plus importante pour les espèces. Ce terme s’exprime donc ainsi pour un tronçon  $k$  :  $\frac{2}{6} * \frac{L_{EMPRISE_k}}{\max(L_{EMPRISE})} - \frac{1}{6}$ . Il vaut  $\frac{1}{6}$  pour les tronçons dont l’emprise est la plus large (c’est-à-dire qu’elle est égale au maximum dans nos données), et tend vers  $-\frac{1}{6}$  lorsque l’emprise est peu large.
- Le second terme dépend de la séparation des chaussées. En effet, si les chaussées sont séparées par une barrière ou un talus, le franchissement des voies est plus compliqué voire impossible pour certaines espèces. Le terme s’exprime :  $\frac{2}{6} \times \mathbb{1}_{2 \text{ chaussées}_k} - \frac{1}{6}$ , il vaut donc  $\frac{1}{6}$  si les chaussées sont séparées sur le tronçon, et  $-\frac{1}{6}$  autrement.
- Le troisième terme dépend du trafic. Ne disposant pas de données nationales sur la fréquentation des tronçons, nous utilisons la caractéristique « vocation » pour l’approximer (cf. <sup>25</sup>). Ce terme vaut  $-\frac{1}{6}$  si la vocation est « Liaison locale »,  $\frac{1}{18}$  si c’est une « Liaison régionale »,  $\frac{1}{18}$  si c’est une « Liaison principale » et  $\frac{1}{6}$  si c’est un « Type autoroutier ».

Par conséquent, l’indice d’occlusion ne varie pas entre 0.3 et 1 comme dans BRUSCHI et al. (2015) et DE MONTIS et al. (2017), mais entre 0.15 et 1.5. Le fait que l’indice puisse dépasser 1 ne pose pas de problème, puisque les auteurs avaient simplement établi la convention qu’une valeur de 1 correspondrait à une occlusion totale. L’importance du terme d’occlusion n’est pas sa valeur absolue, mais les valeurs relatives associées aux différents tronçons, qui permettent de refléter l’importance estimée de l’effet barrière. Ainsi, en ajustant cet indice avec les données que nous avons, nous essayons de refléter au mieux le degré d’occlusion causé par les infrastructures.

En termes d’interprétation, cet indicateur a deux particularités. Il n’a pas d’unité définie, à l’inverse de  $M_{eff}$  qui s’exprime en  $\text{km}^2$  et de  $ED$  qui s’exprime en  $\frac{\text{m}}{\text{km}^2}$  (mètres de bordure par  $\text{km}^2$  d’espaces naturels). De plus, il ne peut s’exprimer en termes de variation par rapport à un contrefactuel en l’absence d’infrastructures, parce que son existence dépend intégralement de l’intersection avec des infrastructures (sinon  $L_k = O_k = 0$ ). Il peut donc être utilisé pour hiérarchiser le degré de fragmentation au sein du territoire, en comparant les valeurs obtenues dans les différentes mailles. La valeur de l’IFI est croissante de la longueur de l’intersection avec des tronçons, de l’indice d’occlusion associé à ces tronçons, du nombre de fragments créés, et du ratio périmètre-aire.

### 3.3 Attribution des responsabilités fondée sur l’usage de transport

#### 3.3.1 Pourquoi utiliser l’usage de transport comme critère d’attribution des empreintes liées aux infrastructures ?

La question de la responsabilité fait écho à une division classique dans la comptabilisation des différentes empreintes, entre une approche *production-based* et une approche *consumption-based* (Section 2.3). Cela pourrait s’entendre de différentes manières dans le cas des infrastructures de transport. Dans un premier temps, on peut considérer que le produit qui sert de base pour attribuer les empreintes est la construction de l’infrastructure en tant que telle. Dans ce cas, une approche basée sur la production attribuerait l’empreinte au secteur de la construction qui est en charge de la production des produits de génie civil. Alternativement, une approche basée sur la consommation attribuerait l’empreinte aux secteurs qui demandent et ont demandé historiquement ces constructions, c’est-à-dire les secteurs qui utilisent la construction (d’infrastructures) en vue d’augmenter leur stock de capital fixe. Parmi ces secteurs, en France, on retrouverait d’abord le secteur « Administration publique » (section O dans la nomenclature d’activités françaises (NAF)) puisque l’État est propriétaire d’une très grande majorité des routes et d’une partie des voies ferrées. On retrouverait ensuite les entreprises du secteur « Transports et entreposage » (secteur H dans la NAF), qui sont dans certains cas propriétaires des routes, et dont fait partie également SNCF Réseau<sup>29</sup> qui est propriétaire d’une très grande majorité des voies ferrées en France.

Mais prendre les infrastructures comme produit à l’origine de l’attribution des empreintes semble peu pertinent. Comme mentionné précédemment, les infrastructures de transport terrestre existent pour leurs usagers et pour leurs usages. Nous considérons donc que ce sont les usages des infrastructures terrestres, c’est-à-dire les activités de transport de marchandises et de voyageurs, qui sont le produit à l’origine de la répartition des responsabilités. A cause de ce statut particulier du transport de marchandises, qui lie spatialement et économiquement l’offre et la demande, la distinction entre une approche *consumption-based* et *production-based* se pose différemment dans notre étude : entre les deux unités qui sont liées par l’usage de transport, qui de l’expéditeur ou du destinataire devrait supporter la responsabilité des conséquences de l’usage de transport ?

#### 3.3.2 Croisement des données sur l’usage de transports et des données de comptabilité nationale

Pour prendre en compte à la fois la demande directe et indirecte de transports, nous utilisons un modèle input-output. Pour cela, nous devons connecter des données sur le transport de marchandises avec le cadre du tableau entrées-sorties, ce qui implique en pratique de réallouer des données sur le volume transporté par type de produit entre les différents secteurs du TES.

Pour les données sur le transport, nous utilisons des séries temporelles des transports routier et ferroviaire de marchandises, issues du Bilan annuel des transports publié par

---

29. SNCF Réseau appartient bien au secteur institutionnel des administrations publiques en tant qu’Organisme divers d’administration centrale. En revanche, au sens de la nomenclature NAF, SNCF Réseau est une entreprise du secteur « Transports et entreposage », qui a pour activité principale les « Services auxiliaires des transports terrestres ».

le Service des données et études statistiques (SDES)<sup>30</sup>. Ces données sont ventilées par type de produit, suivant la Nomenclature Statistique Transport (NST), une nomenclature spécifique au transport de marchandises<sup>31</sup>. Cette nomenclature distingue 20 types de produits, qui pour la plupart correspondent explicitement à des secteurs de la nomenclature utilisée dans les tableaux entrées-sorties. Nous disposons ainsi de deux séries distinctes, l'une mesurant le transport intérieur routier par poids lourds du pavillon français entre 2009 et 2023<sup>32</sup>, et l'autre le transport intérieur ferroviaire entre 2008 et 2023. De plus, Eurostat fournit des séries temporelles sur le transport routier par type de produit NST, et par couple origine-destination. Nous utilisons ces séries pour mesurer les importations et les exportations par produit (voir A.2.3 pour des précisions méthodologiques). L'unité utilisée est la tonne-kilomètre, qui correspond au produit entre les tonnes transportées et les kilomètres parcourus. Ainsi, une tonne-kilomètre correspond au transport d'une tonne sur un kilomètre.

### 3.3.3 Fondamentaux de l'analyse input-output

L'analyse input-output utilise l'équilibre ressources-emplois, c'est-à-dire l'égalité comptable entre la production des secteurs d'un côté (vecteur  $\mathbf{x}$ ), et de l'autre côté les emplois, composés de la consommation intermédiaire des secteurs (matrice  $\mathbf{Z}$ ) et la demande finale (vecteur  $\mathbf{y}$ ). Nous empruntons à GUILHOTO (2021) la présentation mathématique des fondamentaux. Sous forme d'équation, dans une économie à  $n$  secteurs, cet équilibre s'exprime :

$$\forall i \in 1, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i = x_i \quad (8)$$

Ce qui exprime simplement le fait que, dans une économie, les usages de la production d'un secteur  $i$  donné sont répartis entre les emplois intermédiaires (de l'ensemble des secteurs  $j$ , y compris  $j = i$ ) et la demande finale. Cette équation peut être exprimée de manière équivalente avec des coefficients techniques :

$$\forall i, j, \quad a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j}$$

Dans ce cas, l'équilibre devient :

$$\forall i \in 1, \dots, n, \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + y_i = x_i \quad (9)$$

Et son écriture matricielle est

$$\mathbf{Ax} + \mathbf{y} = \mathbf{x} \quad (10)$$

Ce qui permet d'exprimer l'équilibre en fonction de  $\mathbf{x}$  :

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{y} \quad (11)$$

---

30. Le SDES est le service statistique des Ministères Aménagement du territoire et Transition écologique.

31. Pour en savoir plus, voir [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Standard\\_goods\\_classification\\_for\\_transport\\_statistics\\_\(NST\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Standard_goods_classification_for_transport_statistics_(NST))

32. Nous utilisons cette série pour approximer le transport national, car la composante internationale du transport intérieur routier en France est peu importante

La matrice  $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$  est appelée inverse de Leontief. Ses coefficients  $l_{ij}$  indiquent la quantité totale de production du secteur  $i$  nécessaire, directement et indirectement, pour satisfaire une unité de demande finale dans le secteur  $j$ . La composante directe est comprise dans la matrice  $\mathbf{A}$ . L'intérêt de l'inverse est de prendre en compte également la composante indirecte, c'est-à-dire la quantité d'intrants qui est incorporée dans les intrants qu'elle utilise directement. Par exemple, le secteur des transports demande du matériel de transport, dont des trains (coefficient non-nul dans la matrice  $\mathbf{Z}$ ). Mais le secteur des transports ne demande pas directement des métaux (coefficient nul dans la matrice  $\mathbf{Z}$ ). Or, comme la manufacture de trains nécessite des métaux, il y a bien une demande indirecte de métaux dans le secteur des transports – ce qui apparaît dans l'inverse de Leontief  $\mathbf{L}$ .

L'analyse IO permet également de distribuer des vecteurs d'impacts (environnements, d'emplois, ou autres)  $\mathbf{m}$  en prenant en compte les effets indirects grâce à l'inverse de Leontief. Ces vecteurs d'impacts sont d'abord transformés en intensités en divisant l'impact par secteur  $m_i$  par le montant de sa production  $x_i$ , ou en notation matricielle :

$$\mathbf{e} = \mathbf{m}(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$$

Le produit  $\hat{\mathbf{e}}\mathbf{L}\mathbf{y}$  donne ainsi l'empreinte totale (directe et indirecte) de chaque secteur pour satisfaire la demande finale. Le produit  $\mathbf{e}'\mathbf{L}$ , quant à lui, permet de calculer le multiplicateur, c'est à dire l'empreinte par unité de demande finale.

### 3.3.4 Ventilation des volumes de marchandises transportées vers les secteurs du TES

Notre modèle input-output s'appuie sur le « Tableau des entrées-sorties symétrique, niveau 38 »<sup>33</sup>, diffusé au niveau de 38 secteurs (les tableaux ne comprenant que 37 secteurs en pratique). Ce tableau contient deux ensembles de sous-tableaux, le premier concernant la production domestique et le second les importations. Pour la production domestique, l'équilibre ressources-emplois est :

$$\mathbf{A}^{\text{DOM}}\mathbf{x}^{\text{DOM}} + \mathbf{y}^{\text{DOM}} = \mathbf{x}^{\text{DOM}}$$

Pour les importations, l'équilibre ressources-emplois est :

$$\mathbf{A}^{\text{IM}}\mathbf{x}^{\text{DOM}} + \mathbf{y}^{\text{IM}} = \mathbf{x}^{\text{IM}}$$

Le vecteur d'impact que nous voulons distribuer ici concerne l'usage de transport de marchandises. Or, les données sur les volumes transportés suivent la nomenclature NST, spécifique aux marchandises. Nous devons donc réallouer ces valeurs aux secteurs du TES pour pouvoir créer un vecteur d'intensités en transport des secteurs. Pour cela, nous créons une table de correspondance entre les produits de la nomenclature NST et les secteurs du TES. Nous adoptons une méthode utilisée en analyse input-output pour faire correspondre des secteurs à des actifs (SODERSTEN et al. 2018 ; TAUSCH et MAGACHO 2024). La table de correspondance initiale est une matrice  $\tilde{\mathbf{G}}_{20 \times 37}$ . Par défaut, les coefficients  $\tilde{g}_{ij}$  valent 0. Ils ne valent 1 que si on attribue le produit  $i$  au secteur  $j$ , c'est-à-dire si ce secteur est l'expéditeur initial de ce bien. La table de correspondance finale  $\mathbf{G}$  est une transformation de cette table de correspondance qui satisfait une contrainte : pour chaque ligne, la somme des colonnes doit valoir 1. Cette contrainte permet d'allouer entre les secteurs exactement

33. Tableau 9.400 sur le lien suivant : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8068640?sommaire=8068749#titre-bloc-21>

les valeurs initiales (en tonnes-kilomètres parcourus) pour chaque type de produit. Pour distribuer ces valeurs, nous utilisons le vecteur  $\mathbf{m}$  des marges de transport<sup>34</sup> reportées dans le TES. Chaque secteur qui a initialement un coefficient égal à 1 prend une valeur entre 0 et 1, égale au ratio entre sa marge de transport et la marge de transport de l'ensemble des secteurs dont le coefficient est égal à 1. Il faut noter que la table de correspondance varie légèrement d'une année à l'autre, puisque nous utilisons les marges de transport de l'année donnée. Ainsi, la table de correspondance finale pour une année  $t$  est :

$$\mathbf{G}_t = (\widehat{\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{m}_t})^{-1}\widehat{\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{m}_t} \quad (12)$$

En tout, cette pondération ne concerne que 4 produits NST qui sont associés à plus d'un secteur. Parmi ces produits, deux sont particulièrement délicats : les marchandises groupées et les marchandises non identifiées. Nous ne disposons pour celles-ci d'aucune information concernant le contenu transporté. Notre choix méthodologique a été d'attribuer sur ces produits des coefficients  $\tilde{g}_{ij} = 1$  pour l'ensemble des secteurs producteurs de biens. Ces secteurs se voient donc attribuer une proportion des marchandises groupées et non identifiées égale au ratio entre leur marge de transport et la somme des marges de transport des secteurs producteurs de biens. Autrement dit, nous supposons implicitement que la composition des cargaisons de marchandises groupées et non identifiées est, en moyenne, représentative de la répartition des transports entre les secteurs<sup>35</sup>.

Ensuite, nous utilisons cette table de correspondance pour ventiler les tonnes-kilomètres parcourus par produit entre les secteurs des comptes nationaux. Nous avons pour chaque année trois vecteurs de dimension 20x1. Le premier  $\tilde{\mathbf{p}}^{\text{RAIL}}$  mesure le transport ferroviaire de produits domestiques et importés. Le deuxième,  $\tilde{\mathbf{p}}^{\text{ROUTE NATIONAL}}$  mesure le transport routier national de produits, c'est-à-dire le transport de produits entre deux unités géographiques localisées en France. Enfin,  $\tilde{\mathbf{p}}^{\text{ROUTE IM}}$  mesure le transport routier international de produits importés, c'est-à-dire le transport d'une unité géographique extérieure vers une unité localisée en France<sup>36</sup>. Les vecteurs donnant les tonnes-kilomètres attribués aux secteurs des comptes nationaux, de dimension 37x1, sont donc :

$$\mathbf{p}_t^{\text{RAIL}} = \mathbf{G}'_t \tilde{\mathbf{p}}_t^{\text{RAIL}} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{\text{NATIONAL},t}^{\text{ROUTE}} = \mathbf{G}'_t \tilde{\mathbf{P}}_{\text{NATIONAL},t}^{\text{ROUTE}} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{\text{IM},t}^{\text{ROUTE}} = \mathbf{G}'_t \tilde{\mathbf{P}}_{\text{IM},t}^{\text{ROUTE}} \quad (15)$$

### 3.3.5 Un modèle input-output pour attribuer les usages des transports aux secteurs

A partir des vecteurs  $\mathbf{p}^{\text{RAIL}}$  et  $\mathbf{p}^{\text{ROUTE}}$ , pour chaque année, nous pouvons calculer les vecteurs d'intensités d'usage de transport (routier et ferroviaire) des secteurs. Pour le transport ferroviaire, ces vecteurs  $\mathbf{TI}$  d'intensités se calculent en divisant, pour chaque

34. L'United Nations Statistical Division définit la marge de transport comme « les frais de transport payés séparément par l'acheteur pour prendre livraison des marchandises au moment et à l'endroit requis », cf. <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/glossresults.asp?gID=641>.

35. Et nous approximons cette répartition par les marges de transport.

36. Les kilomètres pris en compte dans ce vecteur incluent la part effectuée en-dehors du territoire français

secteur  $i$ , les tonnes-kilomètres qui lui sont attribués dans le vecteur  $\mathbf{p}$  par la quantité totale de production et d'importations de produits de ce secteur. On a donc  $TI_i^{RAIL} = \frac{p_i^{RAIL}}{x_i^{DOM} + x_i^{IM}}$ , ou en notation matricielle :

$$\mathbf{TI}^{RAIL} = \mathbf{p}^{RAIL} (\widehat{\mathbf{x}^{DOM} + \mathbf{x}^{IM}})^{-1} \quad (16)$$

Les données utilisées pour cette distribution ignorent la distinction entre transport international entrant, transport international sortant et transport intérieur de produits. Pour le transport routier, en revanche, nous avons un vecteur décrivant le transport international de produits importés et un autre décrivant le transport intérieur terrestre, c'est-à-dire le transport de marchandises entre deux entités d'un même pays. Nous supposons que ce transport intérieur terrestre concerne à la fois les produits domestiques et les produits importés, qui peuvent être réacheminés. En revanche, nous sommes contraints de supposer que les tonnes-kilomètres de transport intérieur par unité sont identiques entre les produits domestiques et les produits importés, pour chaque type de produit. Nous calculons séparément les intensités :

$$\mathbf{TI}_{DOM}^{ROUTE} = \mathbf{P}^{ROUTE}_{NATIONAL} (\widehat{\mathbf{x}^{DOM} + \mathbf{x}^{IM}})^{-1} \quad (17)$$

$$\mathbf{TI}_{IM}^{ROUTE} = \mathbf{P}^{ROUTE}_{NATIONAL} (\widehat{\mathbf{x}^{DOM} + \mathbf{x}^{IM}})^{-1} + \mathbf{P}^{ROUTE}_{IM} (\widehat{\mathbf{x}^{IM}})^{-1} \quad (18)$$

Nous pouvons ensuite réallouer ces vecteurs d'intensités-transports entre les différents secteurs, en distinguant les effets directs et indirects, et les volumes transportés pour la production domestique et pour les importations. Pour chaque année, la formule pour décomposer ces effets est la suivante pour le transport ferroviaire et le transport routier, respectivement :

$$\begin{aligned} \mathbf{TK}^{RAIL} &= \mathbf{TI}^{RAIL} \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} + \mathbf{TI}^{RAIL} (\mathbf{L} - \mathbf{I}) \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} \\ &\quad + \mathbf{TI}^{RAIL} \widehat{\mathbf{y}^{IM}} + \mathbf{TI}^{RAIL} \mathbf{A}^{IM} \mathbf{L} \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{TK}^{ROUTE} &= \mathbf{TI}_{DOM}^{ROUTE} \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} + \mathbf{TI}_{DOM}^{ROUTE} (\mathbf{L} - \mathbf{I}) \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} \\ &\quad + \mathbf{TI}_{IM}^{ROUTE} \widehat{\mathbf{y}^{IM}} + \mathbf{TI}_{IM}^{ROUTE} \mathbf{A}^{IM} \mathbf{L} \widehat{\mathbf{y}^{DOM}} \end{aligned} \quad (20)$$

Cette formule repose sur un modèle input-output classique. Le chapeau indique la diagonalisation des vecteurs.  $\mathbf{y}^{DOM}$  est le vecteur de demande finale de produits domestiques,  $\mathbf{y}^{IM}$  est le vecteur de demande finale de produits importés. On a la matrice des coefficients techniques de produits domestiques  $\mathbf{A}^{DOM}$ , dont le coefficient  $a_{ij}^{DOM}$  correspond aux dépenses engagées par le secteur  $j$  dans la consommation intermédiaire du secteur  $i$  (domestique) pour produire une unité monétaire de sa production. Similairement, les coefficients de  $\mathbf{A}^{IM}$  représentent les dépenses engagées par le secteur  $j$  dans la consommation intermédiaire de produits importés du secteur  $i$  de l'ensemble des autres pays pour produire une unité monétaire de sa production.  $\mathbf{I}$  est une matrice identité de dimension 37x37. La matrice  $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{DOM})^{-1}$  est l'inverse de Leontief. Ses coefficients représentent les dépenses de consommation intermédiaires totales du produit  $i$  nécessaires

à la production d'une unité monétaire de produit du secteur  $j$ , qu'elles soient directes ou indirectes.

Alors, dans chacune des deux équations, nous pouvons décomposer l'usage de transports en quatre effets. Le premier terme,  $\mathbf{T}\widehat{\mathbf{I}\mathbf{y}^{\text{DOM}}}$ , représente l'effet *direct domestique*, c'est-à-dire l'usage de transports par le secteur  $j$  pour satisfaire la demande finale. Le second terme,  $\mathbf{T}\mathbf{I}(\mathbf{L} - \mathbf{I})\widehat{\mathbf{y}^{\text{DOM}}}$ , représente l'effet *indirect domestique*. C'est la part de l'usage de transports indirectement utilisée par le secteur  $j$ , liée à sa consommation intermédiaire de produits intensifs en transports – à noter que cette valeur est donc déduite de l'usage de transports des secteurs expéditeurs de ces biens de consommation intermédiaire. Ensemble, ces deux termes constituent la part de l'usage des transports de produits domestiques. Ensuite, le troisième terme,  $\mathbf{T}\widehat{\mathbf{I}\mathbf{y}^{\text{IM}}}$ , représente l'effet *direct importé*, c'est-à-dire la part des transports de produits importés qui satisfait directement la demande finale. Enfin, le dernier terme  $\mathbf{T}\mathbf{I}\mathbf{A}^{\text{IM}}\widehat{\mathbf{L}\mathbf{y}^{\text{DOM}}}$  représente l'effet *indirect importé*, c'est-à-dire la part des transports de produits importés utilisée pour acheminer des biens de consommation intermédiaire, utilisés dans la production domestique. Ensemble, ces deux derniers termes représentent la part de l'usage de transports attribuée aux produits importés. De plus, si l'on diagonalise les vecteurs d'intensités, on obtient une ventilation des usages de transports entre secteurs pour les effets indirects. Cette ventilation donne à voir les usages de transports incorporés dans la consommation intermédiaire pour chaque couple de secteurs expéditeur  $i$  - destinataire  $j$ .

### 3.3.6 Deux perspectives d'attribution des responsabilités : expéditeur ou destinataire

A partir de nos données, nous pouvons présenter les résultats de plusieurs manières. La première est de présenter les quatre effets décomposés. Cette présentation met l'accent sur la responsabilité des secteurs utilisant les transports, directement ou indirectement, pour satisfaire la consommation finale. Elle permet également de comparer le poids relatif des importations et des produits domestiques en termes de volumes transportés, pour chaque secteur.

La deuxième manière de présenter les résultats consiste à les décomposer non pas selon la distribution des types d'effets (direct ou indirect, domestique ou importé), mais selon les types d'emplois finals – et les secteurs institutionnels correspondants. Dans ce cas, au lieu d'utiliser un vecteur  $\mathbf{y}^{\text{DOM}}$  de demande finale, nous utilisons une matrice  $\mathbf{Y}^{\text{DOM}}$  de dimension 37x4 qui ventile la demande finale entre les types d'emplois finals (pour une explication des choix méthodologiques, cf. A.2.3). Alors, en calculant la proportion  $\frac{y_{ip}}{y_i}$  de chaque type d'emploi final  $p$  dans la demande finale des produits du secteur  $i$ , on peut calculer les tonnes-kilomètres parcourus par type d'emploi final par produit :

$$TK_{ip}^{\text{RAIL}} = \frac{y_{ip}}{y_i} TK_i^{\text{RAIL}}$$

$$TK_{ip}^{\text{ROUTE}} = \frac{y_{ip}}{y_i} TK_i^{\text{ROUTE}}$$

Cette mesure mettant l'emphase sur les emplois finals, elle attribue implicitement la responsabilité aux secteurs institutionnels qui y correspondent. Ainsi, les tonnes-kilomètres parcourus pour satisfaire la consommation finale des ménages sont engendrées par les ménages, et les administrations publiques engendrent les tonnes-kilomètres parcourus pour

satisfaire la consommation finale des APU. La FBCF concerne plusieurs secteurs institutionnels, mais nous connaissons également la ventilation de la FBCF par secteur économique<sup>37</sup>. Nous l'utilisons pour passer d'une ventilation des tkm par type d'emploi final à une ventilation par secteur institutionnel.

### 3.3.7 Les cinq composantes du transport de marchandises et leur prise en compte selon la perspective d'attribution

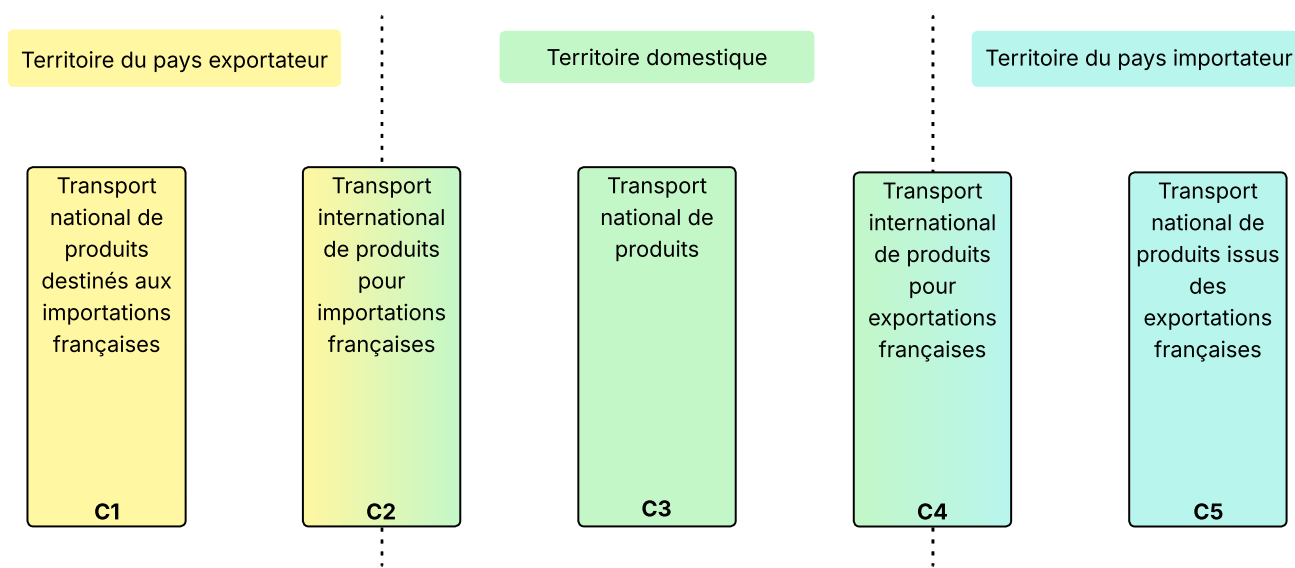


FIGURE 2 – Les cinq composantes du transport de marchandises et leur territorialité.

Le transport de marchandises lié à l'activité économique d'un pays peut se décomposer en cinq catégories (Figure 2). La plus centrale, et la plus importante numériquement en France, est le transport national de produits (C3), c'est-à-dire le transport de produits entre deux unités situées dans le même pays. Ces produits peuvent aussi bien être issus des importations que de la production domestique, et peuvent aussi bien être destinés à la demande finale domestique qu'aux exportations. Pour les produits importés (C2) ou exportés (C4), il faut ajouter le transport international des produits, c'est-à-dire le transport entre deux unités géographiques de pays différents. De plus, si l'on prend en compte l'ensemble de l'usage de transports incorporé dans l'activité d'un pays, il faut également prendre en compte le transport national de produits destinés aux exportations vers la France ou issus des exportations françaises. Plus précisément, un produit importé en France peut générer des transports dans le pays exportateur, en particulier si ce bien est manufacturé. Cela se traduit par la composante C1. Symétriquement, un produit exporté depuis la France peut générer des transports dans le pays exportateur, ce qui se traduit par la composante C5.

37. Nous ne connaissons pas la ventilation de la FBCF entre les secteurs institutionnels au prix de base dans les tableaux entrées-sorties symétriques de l'INSEE (tableau 9.400 des comptes nationaux). Par contre, nous la connaissons au prix d'acquisition dans les tableaux entrées-sorties (tableau 9.300), ce que nous utilisons comme proxy pour la ventilation au prix de base.

Selon la perspective, ces composantes de l'usage de transport ne sont pas prises en compte de la même manière. Ainsi, dans la perspective destinataire final, l'ensemble des transports induits par les importations (C1 + C2 + une partie de C3) sont imputables aux secteurs institutionnels français. Dans la perspective expéditeur final, on n'attribue aux secteurs français que la responsabilité des transports induits par les importations de biens de consommation intermédiaire (une partie de C1 + une partie de C2 + une partie de C3) qu'ils utilisent pour satisfaire la demande finale. En effet, les biens importés en France destinés à la consommation finale ont pour expéditeur final une unité étrangère. Concernant les exportations, dans la perspective destinataire final, la responsabilité de l'usage de transports (une partie de C3 + C4 + C5) incombe intégralement aux unités étrangères (au secteur institutionnel Reste du monde dans les comptes nationaux français). En revanche, dans la perspective expéditeur final, l'usage de transports induit par les exportations françaises de biens de consommation (une partie de C3 + une partie de C4 + une partie de C5) sont imputables aux secteurs économiques français. Les biens de consommation intermédiaire exportés, quant à eux, sont utilisés par des unités de production étrangères pour satisfaire la demande finale ; l'usage de transports qu'ils induisent est donc imputé à ces unités étrangères.

	<b>Décomposition direct/indirect, domestique/importé</b>	<b>Décomposition par emploi final</b>
<b>Logique d'attribution</b>	Attribution basée sur l'expéditeur final : secteurs utilisateurs de transport pour satisfaire la demande finale	Attribution basée sur le destinataire final : types d'emplois finals qui engendrent la demande de transport
<b>Unité d'analyse principale</b>	Secteurs productifs français	Secteurs institutionnels français
<b>Traitement des importations</b>	L'effet indirect importé représente les tonnes-kilomètres réalisés à l'étranger ; non attribués aux secteurs français mais aux secteurs étrangers expéditeurs	Les importations sont intégrées dans la demande finale en France ; responsabilité attribuée aux secteurs institutionnels français
<b>Traitement des exportations</b>	La responsabilité des exportations revient aux secteurs français expéditeurs	Exportations exclues des responsabilités des secteurs français ; attribuées au reste du monde

TABLE 5 – Comparaison entre deux méthodes d'attribution de l'usage de transport de marchandises

### 3.3.8 Prise en compte du transport de voyageurs et comparaison avec le transport de marchandises

Soumettre le transport de voyageurs à la même grille de lecture (c'est-à-dire attribuer les responsabilités aux secteurs économiques ou aux secteurs institutionnels) semble peu pertinent. Le transport de voyageurs est essentiellement un service consommé par les ménages, qu'ils l'autoproduisent (lorsqu'ils font des trajets en utilisant leurs propres moyens de locomotion) ou qu'ils utilisent le service d'une entreprise de transport. Distinguer un « expéditeur » (transporteur) et un « destinataire » (bénéficiaire) semble relativement artificiel dans ce cas. Si nous nous restreignons à l'usage des infrastructures routières, nous pouvons envisager la comparaison entre transport de voyageurs et transport de marchandises par au moins une mesure : le véhicule-kilomètre (l'équivalent pour le transport ferroviaire est le train-kilomètre), qui représente le produit entre le nombre de trajets et la distance moyenne d'un trajet (donc la distance totale parcourue par des véhicules). Le vkm est directement publié dans le Bilan annuel des transports à la fois pour le transport routier de marchandises et de voyageurs : on connaît le vkm annuel ventilé par type de

véhicule<sup>38</sup>, chaque véhicule correspondant clairement à un usage ou à un autre, à l'exception des véhicules utilitaires légers qui peuvent servir à la fois pour le transport de marchandises et pour le transport ferroviaire. Cet indicateur fournit donc une première comparaison des usages de transport, fondée sur les distances parcourues par les véhicules. On peut envisager d'autres mesures, qui exigeraient quant à elles de transformer les données existantes. En particulier, il peut être intéressant de comparer la masse totale supportée annuellement par les infrastructures de transport, en raisonnant en tonnes-kilomètres. Cela peut s'opérer en deux transformations, qui reposent évidemment sur des estimations. On peut convertir les voyageurs-kilomètres en tonnes-kilomètres en estimant le poids moyen des voyageurs. On a alors des tonnes-kilomètres transportés pour les marchandises et pour les voyageurs. On peut ensuite transformer les véhicules-kilomètres en tonnes-kilomètres, en estimant le poids moyen des véhicules selon leur type. Ces deux conversions s'expriment :

$$tkm_{VEHICULES} = \frac{\text{tonnes}}{\text{véhicule}} * \text{véhicules} * km = \frac{\text{tonnes}}{\text{véhicule}} * vkm$$

$$tkm_{VOYAGEURS} = \frac{\text{tonnes}}{\text{voyageur}} * \text{voyageurs} * km = \frac{\text{tonnes}}{\text{voyageur}} * voy.km$$

Ainsi, on peut comparer d'une part le transport de marchandises calculé comme la somme des tonnes-kilomètres associés aux véhicules utiles au transport de marchandises et des tonnes-kilomètres de marchandises transportées, et d'autre part le transport de voyageurs calculé comme la somme des tonnes-kilomètres associés aux véhicules utiles au transport de voyageurs et des tonnes-kilomètres de voyageurs transportés :

$$tkm_{MARCHANDISES}^{TOTAL} = tkm_{VEHICULES}^{MARCHANDISES} + tkm_{MARCHANDISES}$$

$$tkm_{VOYAGEURS}^{TOTAL} = tkm_{VEHICULES}^{VOYAGEURS} + tkm_{VOYAGEURS}$$

Pour mener à bien ces conversions, nous combinons plusieurs sources : les données de transport en véhicules-kilomètres, voyageurs-kilomètres et tonnes-kilomètres du Bilan annuel des transports ; des données de l'Enquête mobilité des personnes<sup>39</sup> sur les voyageurs-kilomètres hebdomadaires par âge et par genre (SDES 2019) ; et des données sur le parc automobile français publiées par le SDES<sup>40</sup> (SDES 2024b). Les données et hypothèses retenues pour passer des voyageurs-kilomètres aux tonnes-kilomètres et pour passer des véhicules-kilomètres aux tonnes-kilomètres en croisant ces différentes données sont présentées en Annexe A.2.4.

38. Table G1.b des données du Bilan annuel des transports.

39. L'Enquête mobilité des personnes est une enquête nationale menée conjointement par l'Insee et le SDES. Pour en savoir plus, voir : <https://www.insee.fr/fr/information/3365007>

40. Ces données sont disponibles via le lien suivant <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-automobile-francais-au-1er-janvier-2024?rubrique=&dossier=1348>.

## 4 Résultats

### 4.1 L’empreinte matérielle des infrastructures de transport terrestre

#### 4.1.1 L’estimation de la FBCF comme base fiable pour l’usage de matériaux ?

La Table 6 présente la FBCF estimée par secteur à partir de l’équilibre ressources-emplois reconstruit. Cette méthode suggère une FBCF dans la Construction de routes entre 13 et 19 milliards d’euros par an, et entre 0,79 et 4,81 milliards d’euros par an pour la Construction de voies ferrées. L’ampleur de la différence entre construction de routes et de voies ferrées interpelle, d’autant plus que la Construction de voies ferrées contient les activités de « remise en état ou [réparation] des voies ferrées »<sup>41</sup>, et que la série témoigne d’incohérences comme l’écart entre la FBCF en voies ferrées en 2013 et en 2014. Il faut cependant noter que si les ponts et tunnels correspondent en grande partie aux infrastructures de transport ferroviaire (ce dont on n’a aucune garantie), alors on augmente considérablement la valeur estimée de l’investissement dans le ferroviaire.

<i>Estimation de la FBCF par l’équilibre ressources-emplois</i>														
Secteur	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Génie civil	40,55	38,83	39,14	38,28	40,08	39,24	39,54	36,95	38,61	38,48	40,55	38,10	39,10	37,57
Const. de routes et autoroutes	16,78	15,71	15,68	15,37	19,07	13,32	13,77	13,27	13,78	14,24	13,15	13,79	16,01	13,92
Const. de voies ferrées	1,11	1,08	1,23	1,55	0,79	4,81	2,19	1,87	1,79	1,79	1,60	1,44	1,26	1,22
Const. d’ouvrages d’art	1,59	1,41	1,23	1,13	0,86	1,36	1,44	1,26	2,88	3,29	3,57	2,07	2,39	1,68
Const. et entretien de tunnels	0,56	0,53	0,51	0,40	0,35	1,25	0,36	0,35	0,72	0,82	0,89	0,22	0,28	0,24

<i>Dépenses d’investissement dans les comptes de SNCF Réseau</i>														
Poste d’investissement	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Dév. (yc voies et ouvrages d’art)	1,79	1,53	1,58	4,10	4,94	3,83	3,20	1,92	2,13	1,66	2,17	2,15	2,11	1,77
Renouv. des voies et ouvrages d’art	1,35	1,36	1,41	1,42	1,66	1,66	1,76	2,00	1,85	1,88	1,81	1,72	1,71	1,52

<i>Dépenses d’investissement (OCDE)</i>														
Poste d’investissement	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Routes – Développement	16,26	15,95	13,30	13,48	13,09	11,13	10,85	10,11	9,53	10,03	10,30	9,63	9,59	8,82
Routes – Entretien	2,96	2,67	2,90	3,16	3,20	3,10	3,08	2,93	2,73	2,84	2,81	2,70	2,74	2,52
Voies ferrées – Développement	5,66	5,61	7,45	8,19	10,61	9,37	9,63	9,02	9,78	10,11	11,41	10,97	10,50	9,46
Voies ferrées – Entretien	4,25	4,15	4,01	4,08	3,95	3,21	3,52	3,49	3,55	2,92	3,15	3,19	2,88	2,55

TABLE 6 – Estimation de la FBCF par l’équilibre ressources-emplois (en haut). Dépenses d’investissement des comptes annuels de SNCF Réseau (au milieu). Dépenses d’investissement dans les routes et voies ferrées en France selon l’OCDE (en bas). Montants en milliards d’euros aux prix de l’année précédente chaînés. Pour l’ensemble des séries, le passage en volume est opéré en utilisant l’indice des prix à la production pour la division Génie civil publié par l’Insee.

Pour vérifier la cohérence des valeurs pour les voies ferrées, on peut par exemple les comparer aux investissements des comptes d’entreprise de SNCF Réseau, qui permettent d’établir une borne inférieure de la FBCF en voies ferrées. En regardant uniquement les investissements en renouvellement des voies – donc sans compter l’expansion –, on obtient des valeurs comparables si ce n’est légèrement supérieur. Bien que l’expansion du réseau ferroviaire soit lente, elle n’est pas nulle. Les dépenses d’investissement pour les projets de développement représentent dans les comptes de SNCF Réseau entre 1,5 et 4,9 milliards d’euros par an entre 2009 et 2022, une partie de ces dépenses correspondant nécessairement à la construction de voies ferrées, par exemple dans le cas du développement de la LGV Bretagne - Pays de la Loire entre 2012 et 2016 qui génère une augmentation considérable des investissements dans les comptes. Cette augmentation considérable ne

41. cf. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/nafr2/sousClasse/42.12Z>.

s’observe pas dans notre FBCF estimée, sauf pour l’année 2014 (4,8 milliards d’euros) qui semble opérer un rattrapage de l’année 2013 (790 millions d’euros). Dans l’ensemble, ces données indiquent bien un biais de sous-estimation structurelle de l’investissement dans le développement et la maintenance des voies ferrées.

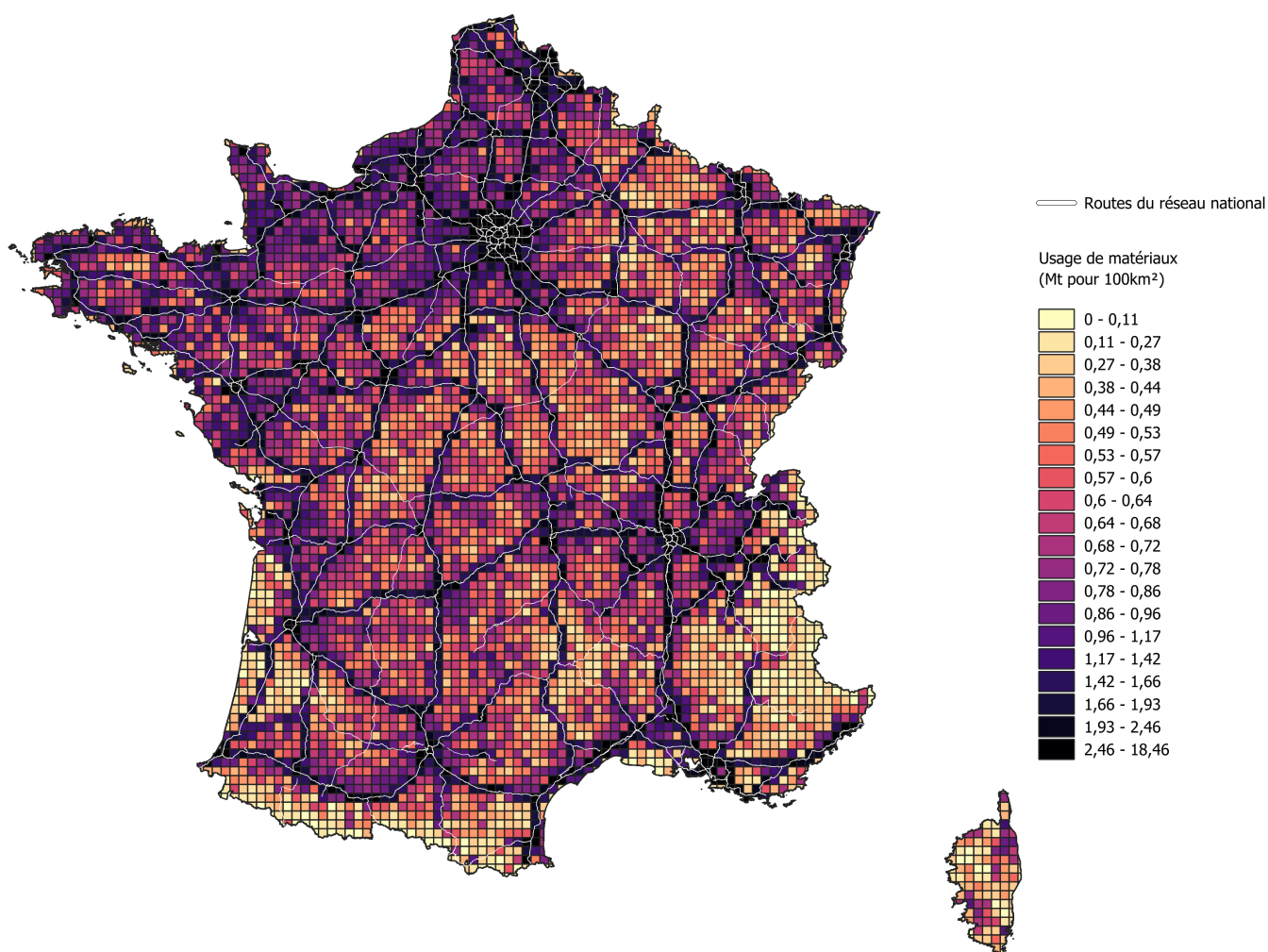
Nous pouvons également comparer les données dont nous disposons à la série publiée par l’OCDE, qui donne les valeurs des dépenses d’investissement et d’entretien dans le transport routier et dans le transport ferroviaire. Pour le transport ferroviaire, la série affiche des dépenses d’investissement – comprendre dépenses d’expansion – évoluant d’environ 5 milliards € en 2009 à plus de 11 milliards € en 2019, et des dépenses d’entretien d’environ 3 milliards € par an. Les dépenses pour la construction de routes, quant à elles, sont relativement cohérentes avec notre série de FBCF si l’on additionne développement et entretien (entre 13 et 17 milliards € par an), mais les variations entre années ne sont pas toujours positivement corrélées. Cette série doit toutefois être interprétée avec précaution à cause de l’opacité de la méthode. Le fait qu’elle présente des valeurs similaires entre les dépenses pour les transports routier et ferroviaire, en particulier, semble étonnant.

Dans l’ensemble, cette estimation de la FBCF semble sujette à trop d’incertitudes pour servir de base à l’estimation de l’usage de matériaux pour la construction de routes et de voies ferrées, d’autant plus que cette méthode supposerait de connaître au moins deux autres paramètres. D’abord, il faudrait estimer la CCF en plus de la FBCF pour pouvoir décomposer ces dépenses d’investissement entre l’expansion du réseau et la maintenance. Aussi, pour pouvoir estimer l’usage de matériaux incorporé dans ces dépenses d’expansion et de maintenance, il faudrait connaître le coût unitaire de la construction de routes – c’est-à-dire, quelle distance du réseau peut être construite ou rénovée avec 1 million d’euros. Les mesures physiques semblent donc être un outil plus adéquat pour estimer l’usage de matériaux, du moins à des échelles sectorielles bien plus fines que celles qu’offrent les comptes nationaux.

#### **4.1.2 Estimation de l’usage de matériaux à partir de la longueur des infrastructures**

Dans un premier temps, nous cartographions la densité d’usage de matériaux dans les infrastructures répertoriées en 2025, qu’elles soient en service ou non (Figure 3). Autrement dit, cet usage de matériaux représente les flux liés au développement, y compris pour les infrastructures n’étant plus utilisées aujourd’hui. Dans l’ensemble, les mailles les plus denses en usage de matériaux sont celles où se situe le réseau routier national (autoroutes et routes nationales), et celles situées dans les grandes aires urbaines où le réseau routier est particulièrement dense. Ces mailles sont généralement dans les deux derniers déciles, avec plus de 1,42 Mt pour 100 km<sup>2</sup>. Le nord-ouest de la France est particulièrement dense. A l’opposé, les zones les moins denses en usage de matériaux se situent dans les massifs montagneux, en particulier dans les Alpes où la plupart des mailles sont dans les deux premiers déciles (moins de 0,44 Mt pour 100 km<sup>2</sup>). Cette approche étant statique, nous ignorons ici les apports de matériaux liés à la maintenance des routes et voies ferrées. Nous la complétons donc avec une AFM dynamique non spatialement explicite, qui permet de comparer l’expansion et la maintenance.

La Figure 4(a) présente les valeurs estimées d’usage de matériaux pour l’expansion et la maintenance des routes et des voies ferrées. Les routes représentent la vaste majorité de l’usage de matériaux, avec au total environ 13,82 milliards de tonnes (Gt) de matériaux incorporés. Les voies ferrées, quant à elles, incorporent environ 239 Mt, soit environ 1,7% de l’usage total de matériaux dans les infrastructures de transport terrestre.



**FIGURE 3 – Matériaux incorporés dans les infrastructures de transport routier et ferroviaire par maille.** L'unité est la mégatonne. Les ruptures numériques correspondent aux vingtiles.

Les minéraux non-métalliques constituent la quasi-totalité de la masse. L'expansion représente la vaste majorité de l'usage de matériaux estimé, avec environ 11,7 Gt contre 2,3 Gt pour la maintenance. En revanche, dans les flux annuels depuis l'initialisation, la maintenance occupe une part de plus en plus importante. En moyenne, entre 2003 et 2023, la maintenance induit environ 56,9 Mt (dont 54 Mt d'enrobés bitumineux), et l'expansion environ 50,5 Mt (dont 26 Mt de sables et graviers) L'usage d'enrobés bitumineux est largement lié à la maintenance de nos jours, avec une moyenne annuelle de 54,4 Mt pour la maintenance contre 9,9 Mt pour l'expansion. Cette observation est confirmée par un document de l'ANSES (2013) qui rapporte que l'usage de bitumes routiers<sup>42</sup> est dédié à 80% à l'entretien des voies existantes. Notre méthode pourrait cependant fortement sous-estimer l'usage historique de matériaux incorporé dans la maintenance, puisque nous ne disposons pas de données sur la longueur des infrastructures avant 1980 et sommes donc obligés de prendre l'année 1980 comme point de départ pour les cycles de maintenance, alors même qu'une grande partie du réseau existait déjà avant 1980 et que la consomma-

42. Et *a fortiori*, d'enrobé bitumineux.

tion française de bitume a été très importante à partir des années 1960 (ANSES 2013). Malgré les intensités matérielles largement plus faibles dans les routes départementales et voies communales, ces deux types constituent l'essentiel de l'empreinte matérielle des routes, avec environ 11 Gt. Les routes nationales et autoroutes, ensemble, représentent environ 2,9 Gt. (4(b))

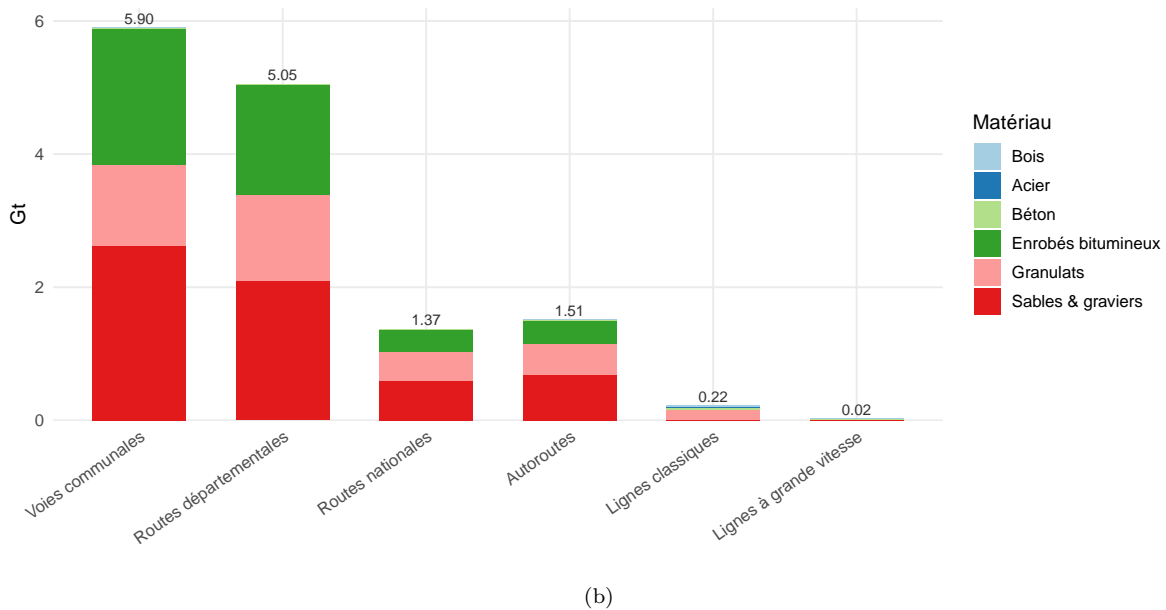
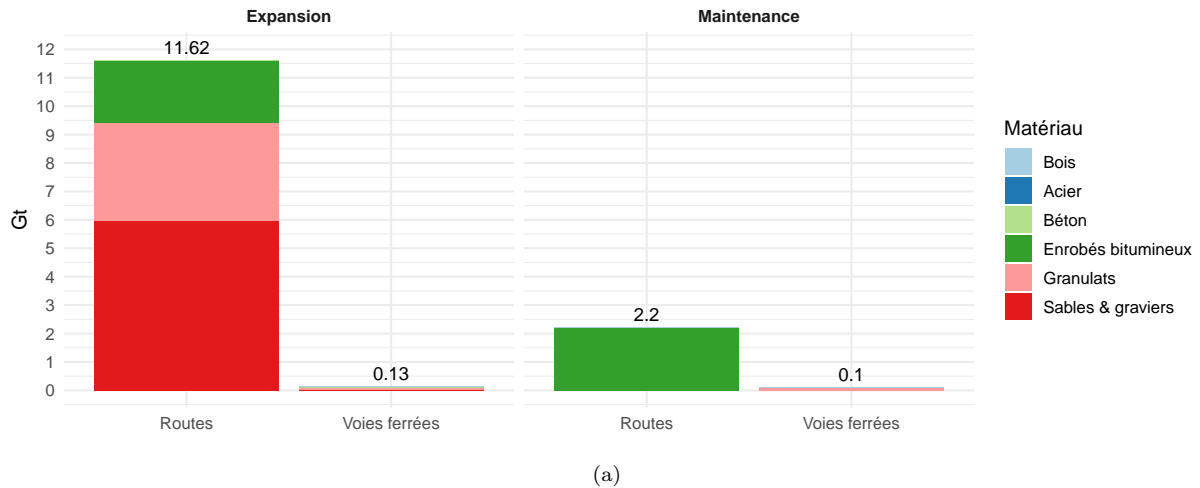


FIGURE 4 – Matériaux incorporés dans les infrastructures de transport routier et ferroviaire, (a) pour l'expansion et la maintenance et (b) par type d'infrastructure. Ces valeurs sont calculées comme la somme des flux historiques pour expansion et pour maintenance. L'unité est la gigatonne.

## 4.2 La fragmentation des habitats par les infrastructures

### 4.2.1 Statistiques descriptives

La Figure 5 indique que, dans l'ensemble, les grands espaces naturels sont très concentrés dans les Pyrénées, dans les Alpes, en Gascogne, en Corse et dans le Massif central. A l'inverse, dans la plupart des autres zones géographiques les espaces naturels sont plus rares et/ou plus fragmentés en petites espaces. En termes de longueur des infrastructures (tronçons fragmentants uniquement) sur le territoire (Figure A1 en Annexe), la présence des routes est bien plus diffuse que celle des voies ferrées. Les voies ferrées étant concentrées sur quelques lignes, elles ne traversent pas la plupart des mailles. Peu de tendances claires se dessinent concernant les routes, en-dehors de leur concentration relativement forte autour des grandes villes. Si l'on compare les infrastructures routières en valeur absolue, là où le pixel de  $100\text{km}^2$  le plus traversé par des voies ferrées contient  $63,1\text{km}$  de voies (A1(b)), celui qui contient le plus de routes contient  $335,9\text{km}$  de voies (A1(a)). Un grand nombre de pixels contiennent au moins  $63\text{km}$  de routes, indiquant à quel point le réseau routier est diffus.

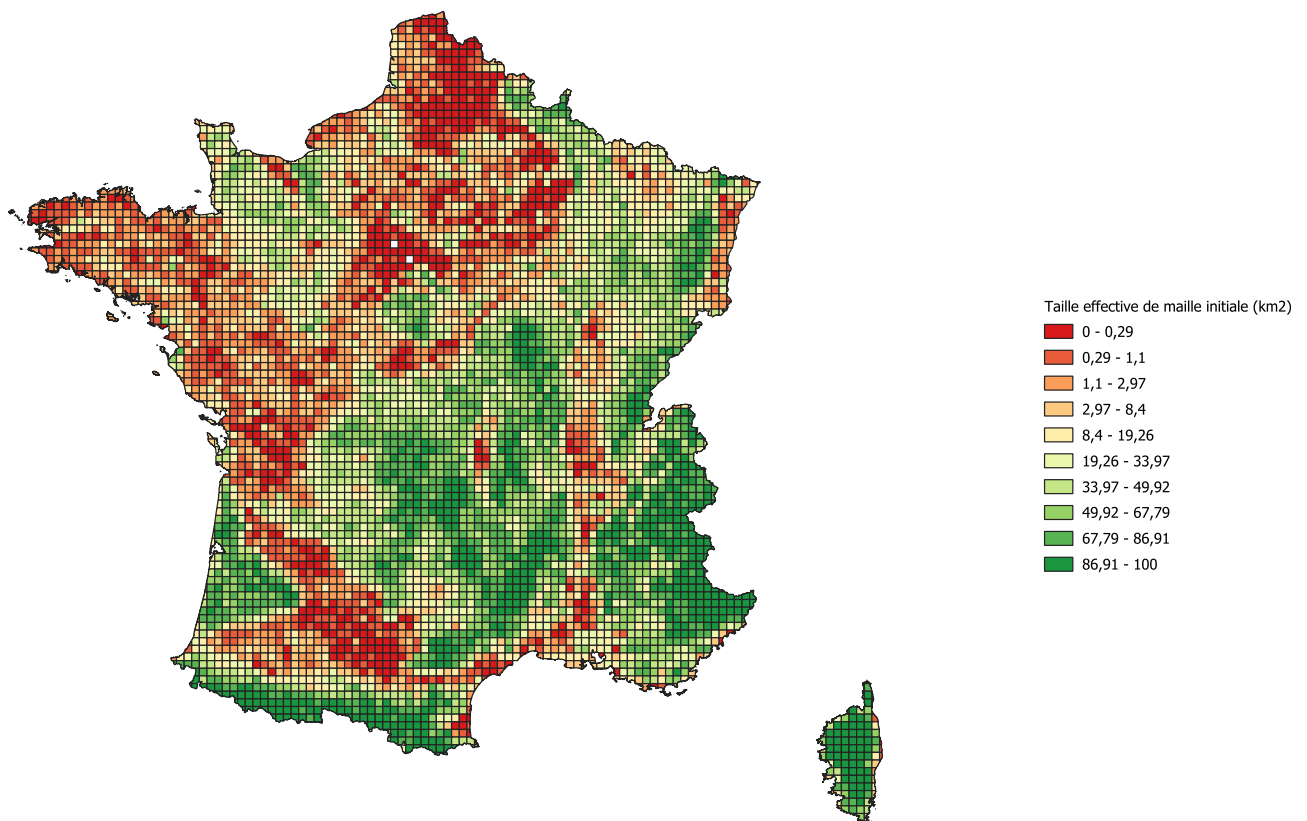


FIGURE 5 – Taille effective de maille des espaces naturels en l'absence de fragmentation par les infrastructures. Les ruptures représentent les déciles de la taille moyenne par maille de  $100\text{km}^2$ .

## 4.2.2 La fragmentation des espaces naturels évaluée par trois indicateurs

### Mesure de la fragmentation fondée sur les occupations des sols

Nous évaluons la fragmentation des espaces naturels par les routes et les voies ferrées séparément et selon trois indicateurs : la taille effective de maille ( $M_{eff}$ ), la edge density ( $ED$ ) et l'infrastructural fragmentation index ( $IFI$ ). De plus, pour la taille effective de maille, nous calculons à la fois les taux de variation et les variations en valeur absolue, qui renvoient des informations différentes. Le taux de variation indique dans quels espaces la fragmentation a le plus diminué relativement à sa situation initiale. En ce sens, le taux de variation peut être un indicateur de l'importance de la perte dans un contexte local. La variation en valeur absolue, quant à elle, met l'emphase sur les évolutions quantitatives les plus importantes à l'échelle du territoire entier, en pointant des *hotspots* où le passage des infrastructures génère des fragmentations particulièrement importantes.

La taille effective de maille décroît considérablement lorsqu'on prend en compte le passage des infrastructures de transport, et en particulier des routes (Figure 6(a)). Peu d'espaces sont épargnés, et en comparant cette carte avec la  $M_{eff}$  en l'absence de fragmentation par les infrastructures (Figure 5), ces espaces épargnés sont exclusivement ceux où les espaces naturels sont très fragmentés même sans prendre en compte les infrastructures. Les voies ferrées, quant à elles, diminuent moins la taille moyenne des espaces naturels du fait de leur rareté. Cette carte fait apparaître des pertes importantes dans les Landes et dans les différentes chaînes de montagne, la plupart des mailles de 100 km<sup>2</sup> connaissant des pertes de taille moyenne des espaces naturels entre 20 et 80km<sup>2</sup>, ce qui les place dans les trois derniers déciles en termes de diminution de la taille moyenne. Cela est en partie dû à la construction de cet indicateur, qui pénalise fortement la fragmentation de grands espaces (cf. 3.2.2). Si l'on regarde la fragmentation des routes délimitée par région (Figure 7), la région Auvergne-Rhône-Alpes présente en effet la médiane (-26,6 km<sup>2</sup> de taille moyenne d'espaces naturels pour 100km<sup>2</sup>) et le troisième quartile (-40,6 km<sup>2</sup> de taille moyenne d'espaces naturels pour 100km<sup>2</sup>) les plus élevés. Dans la majorité des régions, plus d'un quart des mailles de 100 km<sup>2</sup> perdent au moins 25 km<sup>2</sup> de taille moyenne d'espaces naturels. Plusieurs régions (Ile-de-France, Bretagne, Hauts-de-France), où la taille effective de maille initiale est particulièrement faible (Figure 5), présentent de faibles pertes. Les voies ferrées, quant à elles, peuvent générer des fragmentations importantes à une échelle locale comme dans le Massif central, le Morvan et les Pyrénées (Figure 6(b)). Pour les indicateurs suivants, nous présentons les résultats pour les infrastructures ferroviaires en Annexe.

L'indicateur *edge density* ( $ED$ ), qui mesure la longueur (en mètres) des bordures par kilomètre carré d'espaces naturels, semble très fortement pénaliser la fragmentation par les routes par rapport aux voies ferrées (Figure A3 en Annexe). L'*Infrastructural fragmentation index* ( $IFI$ ) utilise une partie de la formule de  $ED$  (à savoir le ratio entre le périmètre et l'aire), mais il pondère également ce terme (1) par la longueur et l'importance de l'occlusion, et (2) par le nombre de fragments générés par le passage des infrastructures (voir 3.2.2). Dans l'ensemble, l' $IFI$  suggère que la fragmentation est relativement moins importante en Gascogne et dans les Alpes, et plus importante en Normandie, en Pays de la Loire et dans le Grand-Est (Figure 8). Cela semble coïncider avec la densité de routes plus importante dans ces régions qu'en Gascogne ou dans le Massif central, comme l'indique la figure A1(a) (Annexe). La fragmentation dans les chaînes de montagne apparaît également moins polarisée. La fragmentation par les voies ferrées (Figure A4 en Annexe) semble moins concentrée, sauf en Ile-de-France où le réseau est fortement développé. La fragmentation

totale générée par les voies ferrées apparait, comme selon les autres indicateurs, largement moins importante.

Dans cette approche, nous utilisons une couche de polygones d'espaces naturels qui sont regroupés sous une définition large et uniforme. Pourtant, ces espaces naturels peuvent avoir des fonctions d'habitat très hétérogènes. Nous complétons donc cette analyse par l'application de ces mêmes indicateurs à une couche répertoriant les Znieff, c'est-à-dire des zones propices à la biodiversité, en France métropolitaine (voir 2.2). Dans le cas des Znieff,  $M_{eff}$  peut être interprété comme la taille moyenne des zones naturelles ayant un potentiel écologique important. La Figure A5 en Annexe représente la taille effective de maille des Znieff en l'absence de fragmentation par les infrastructures. Dans l'ensemble, cette mesure est plutôt positivement corrélée à la taille de maille des espaces naturels délimités selon les occupations des sols. Les Alpes et les Pyrénées contiennent de très vastes Znieff, d'une taille moyenne entre 33,89 et 100km<sup>2</sup> en faisant abstraction de la fragmentation par les infrastructures de transport. Certaines zones où les d'espaces naturels sont vastes apparaissent cependant moins cruciales en termes de potentiel écologique, comme les Landes et le Massif central. A l'inverse, les Hauts-de-France semblent relativement plus importants si l'on considère les Znieff. Dans l'ensemble, l'ampleur de la fragmentation des Znieff par les routes est très importante (Figure 9 en valeur absolue, et Figure A6 en Annexe pour le taux de variation). En particulier, la taille moyenne des zones importantes pour la biodiversité diminue de plus de 13,6km<sup>2</sup> de taille moyenne dans 5% des mailles. Plusieurs *hotspots* se démarquent, en particulier la Haute-Normandie et l'Alsace. La fragmentation des Znieff est relativement importante en valeur absolue dans les Pyrénées et les Alpes, mais très faibles en valeurs relatives (Figure A6).

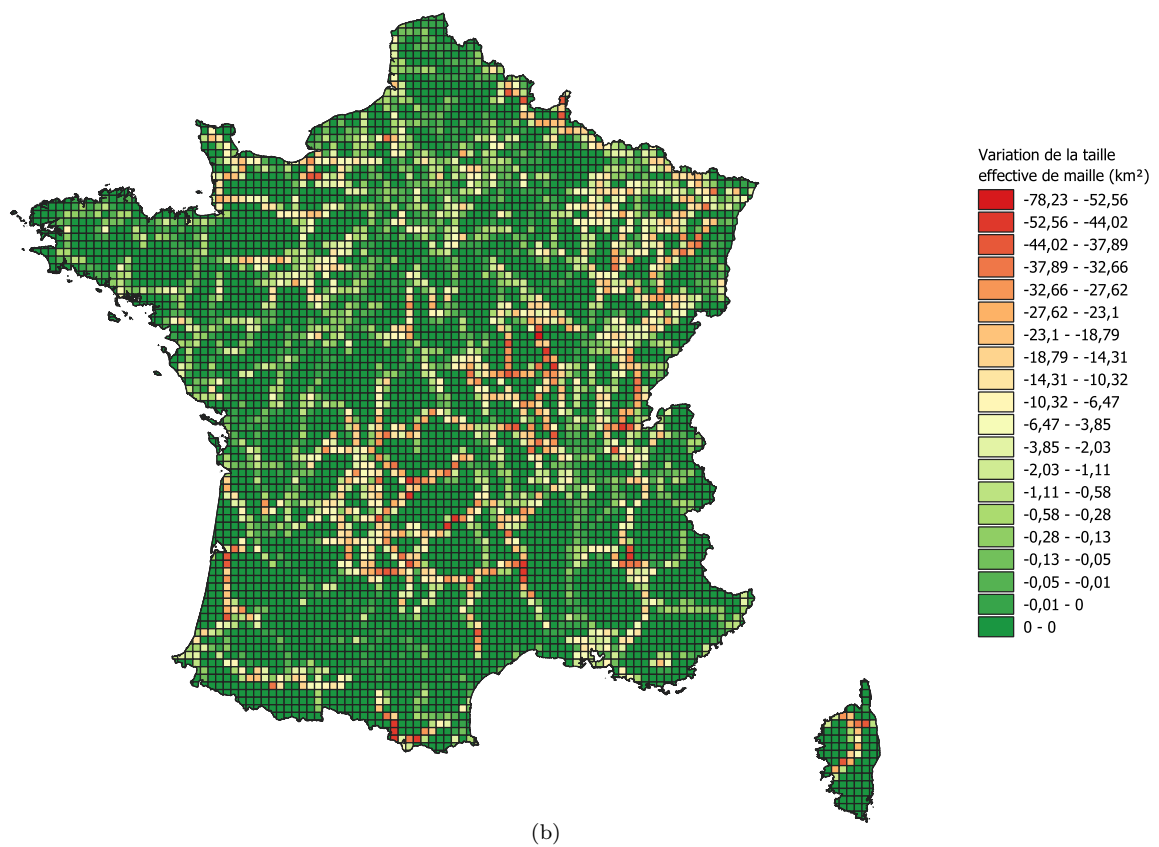
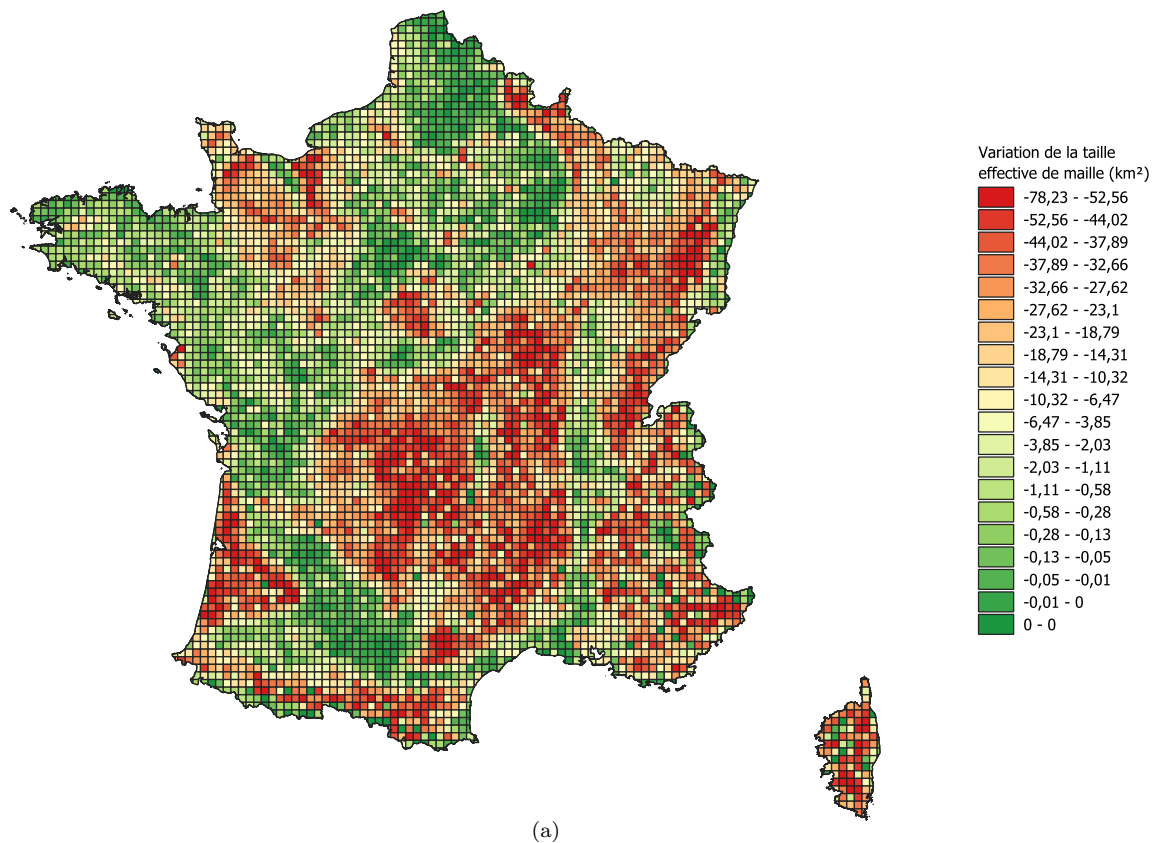
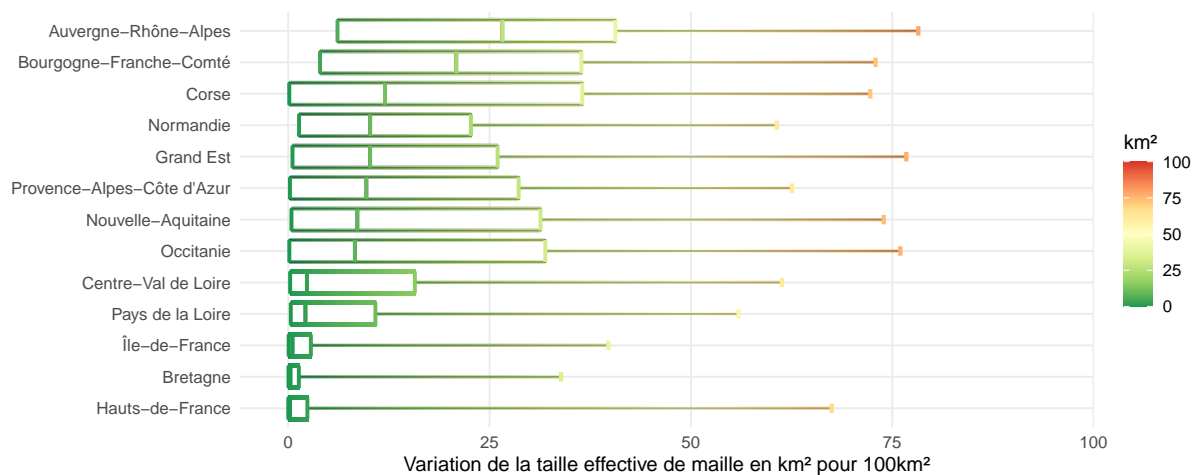
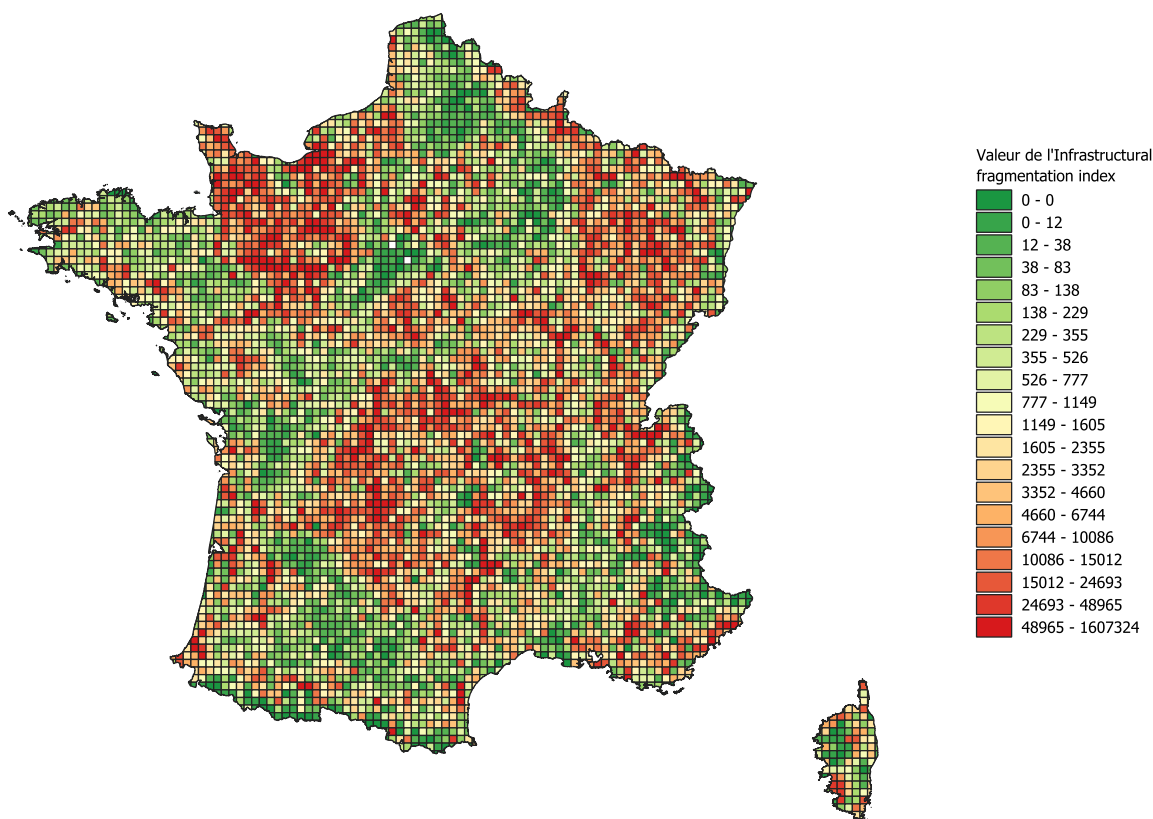


FIGURE 6 – Variation en valeur absolue de la taille effective de maille due à la fragmentation (a) par les routes et (b) par les voies ferrées. Les ruptures représentent les vingtiles de la fragmentation par les routes. Les deux pixels blancs indiquent une absence totale d'espaces naturels au sein de la maille.



**FIGURE 7 – Variation de la taille effective de maille dû à la fragmentation des routes par région, en  $\text{km}^2$  d'espaces naturels pour  $100\text{km}^2$  de territoire.** Les tailles effectives de maille sont calculées à partir des occupations des sols. Les boîtes s'étendent du 1<sup>er</sup> au 3<sup>e</sup> quartile ; le trait intérieur marque la médiane ; le trait à l'extrémité droite indique la valeur maximale. Les quantiles sont calculés à partir des moyennes des pixels dans une région. Les pixels intersectant plusieurs régions sont pris en compte dans chacune de ces régions.



**FIGURE 8 – Valeur de l'Infrastructural fragmentation index dû à la fragmentation par les routes.** Les ruptures représentent les vingtiles de la fragmentation par les routes. L'IFI est un indicateur sans unité.

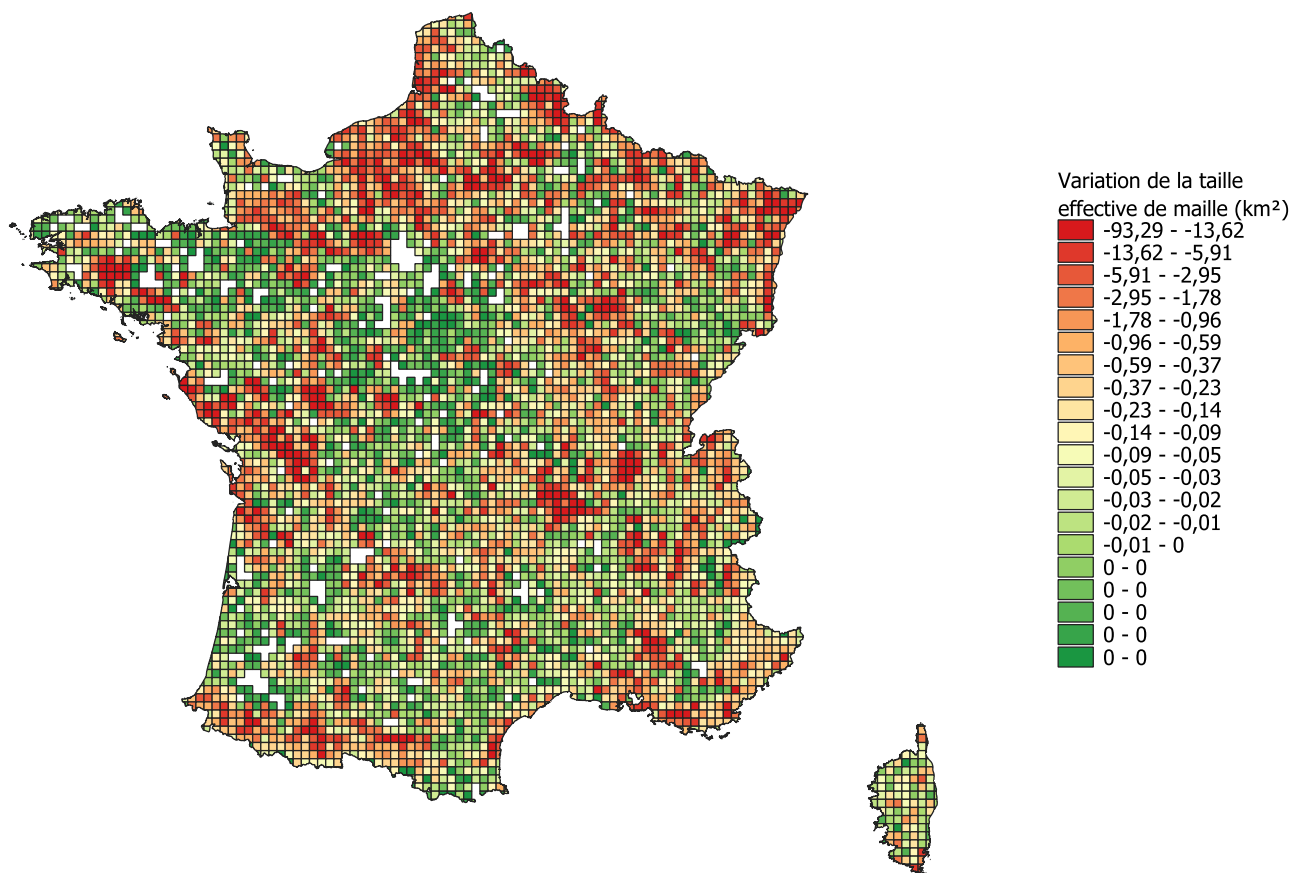


FIGURE 9 – Variation en valeur absolue de la taille effective de maille des Znieff due à la fragmentation par les routes. Les ruptures représentent les vingtiles de la fragmentation par les routes. Les pixels blancs indiquent une absence totale de zones classées Znieff au sein de la maille.

## 4.3 Quantifier l'usage de transport pour attribuer des responsabilités

### 4.3.1 Contexte et statistiques descriptives pour le transport de marchandises

En France, en termes de transport de marchandises, le transport routier est bien plus important numériquement que le transport ferroviaire. D'après les statistiques du Bilan annuel des transports (SDES 2024a), en 2023 le transport intérieur routier représentait 295,5 milliards de tonnes-kilomètres (tkm), contre 29,4 milliards de tkm de transport ferroviaire, soit 10 fois moins (Figure 10). En termes de dynamiques, le transport routier a fortement augmenté depuis les années 1980 pour atteindre un record en 2007 (340 milliards tkm), et stagne depuis entre 270 et 310 milliards de tkm annuels. Cette période a été surtout marquée par l'essor du transport routier international, passant de 20 milliards tkm en 1984 à 129 milliards tkm en 2023. Le fret ferroviaire intérieur a quant à lui fortement décliné, passant de 57,5 milliards de tkm en 1984 à 29,4 milliards de tkm en 2023. Le transport national et international ont tous les deux été divisés par 2 entre ces années.

En termes de produits, l'usage de transports est concentré sur quelques produits majeurs et son ampleur est relativement stable depuis 2010. Dans le cas du transport national routier, la Figure 11 indique que quatre secteurs sont à eux seuls les expéditeurs initiaux des produits constituant plus de la moitié des tonnes-kilomètres : les Produits minéraux (agrégant Produits minéraux non métalliques et Produits métalliques), la Fabrication de denrées alimentaires, de boissons et de produits à base de tabac, et l'Agriculture, Sylviculture et pêche. Ce sont donc à la fois des matières premières (notamment agricoles) et des produits transformés qui génèrent des usages de transports important.

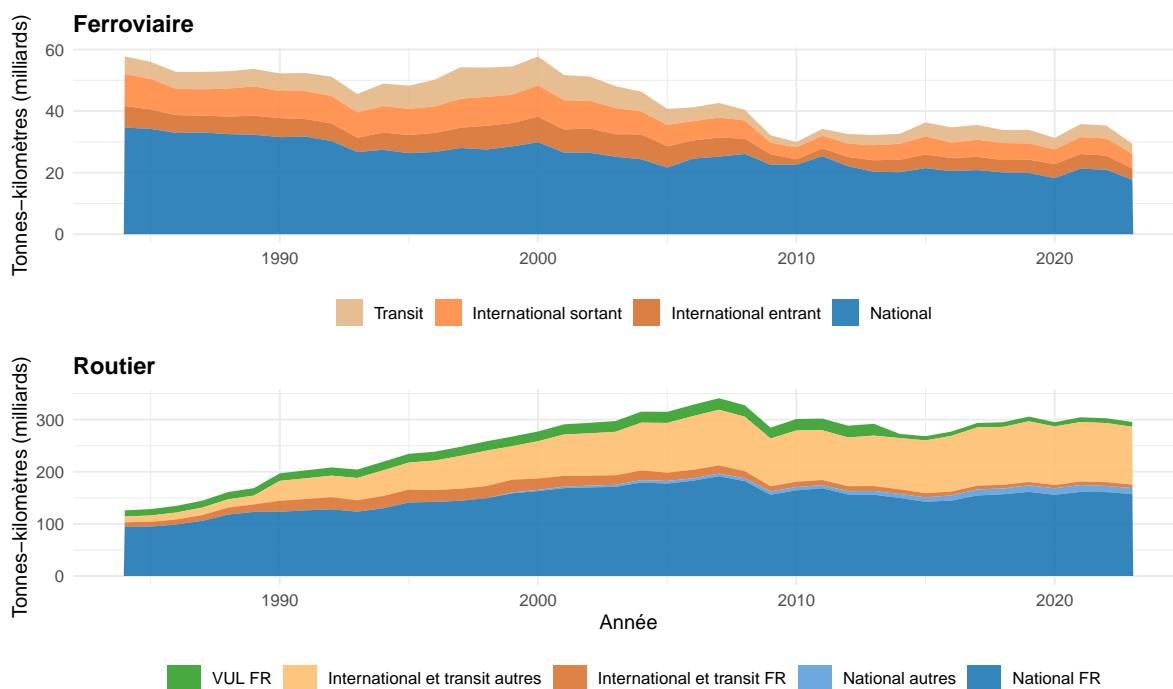
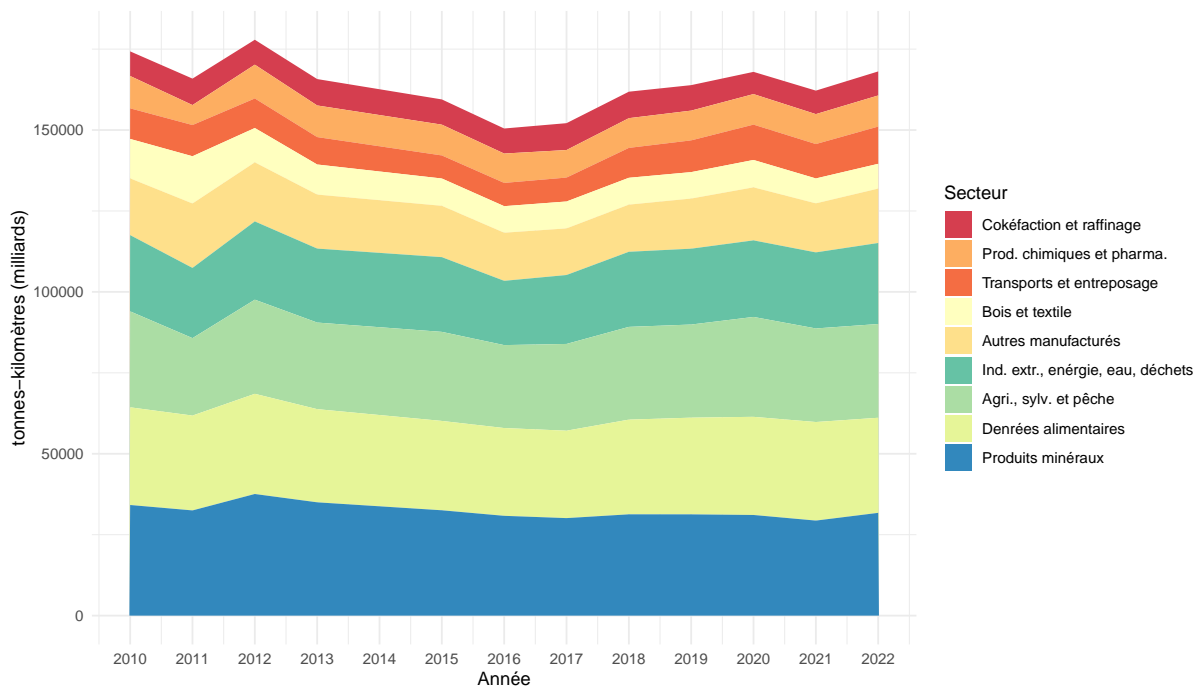


FIGURE 10 – Volume de transport intérieur ferroviaire et routier de marchandises, en milliards de tonnes-kilomètres (1984-2023). VUL est l'acronyme de « Véhicules utilitaires légers ». Pour le transport routier, « FR » désigne le pavillon français et « Autres » désigne le pavillon étranger. Données : SDES, *Bilan annuel des transports*.



**FIGURE 11 – Volume de transport national routier en milliards de tonnes-kilomètres par type de produit (2010-2022).** Ce graphique représente la ventilation par produits du transport intérieur routier entre entités situées sur le territoire français (transport national). Les produits sont présentés au niveau des secteurs du TES, suite à leur allocation par la table de correspondance entre la nomenclature NST et la nomenclature du TES. Les secteurs expéditeurs sont ensuite agrégés en 9 types au lieu de 13. « Produits minéraux » agrège « Produits minéraux non-métalliques » et « Produits métalliques ». « Textile et bois » agrège « Textile » et « Bois ». Enfin, « Autres manufacturés » agrège « Autres produits manufacturés », « Matériels de transport » et « Equipements électriques, informatiques et machines ». Nous ne disposons des données désagrégées par produit que pour le pavillon français, et ignorons donc la partie du transport national routier correspondant au cabotage.

#### 4.3.2 Mesure de l'usage de transport basée sur l'expéditeur

La perspective expéditeur part du postulat que le secteur qui satisfait la demande finale est responsable (1) du transport pour acheminer le produit jusqu'au demandeur final en tant que tel, s'il s'agit d'un bien (cela ne s'applique pas dans le cas des services) et (2) du transport des inputs qui ont été nécessaires à sa production. La Figure 12 représente les volumes de transport routier et ferroviaire, par secteur et ventilés en fonction des effets directs et indirects, et de l'usage pour la production domestique ou importée. Les effets directs correspondent à l'usage de transport par les secteurs directement pour satisfaire la demande finale. Les effets indirects correspondent à l'usage de transport incorporé dans l'acheminement des inputs utilisés par les secteurs dans le processus de production. Les effets domestiques et importés correspondent au transport de produits issus de la production domestique et de produits importés, respectivement. Entre le transport routier et le transport ferroviaire, les échelles sont très différentes puisque le transport routier de marchandises est largement plus important numériquement. Notons que, puisque certains secteurs ne sont expéditeurs d'aucun des produits de la nomenclature NST (dans la table de correspondance présentée en méthode 3.3 et détaillée en Annexe), leur usage de transports imputé à l'effet direct (domestique et importé) est nul. Pour ces secteurs, l'in-

tégralité de l'usage de transports qui leur est attribué passe par l'effet indirect, c'est-à-dire par l'usage de transports incorporé dans leur consommation intermédiaire de biens.

Le secteur de la Fabrication de denrées alimentaires, de boissons et de produits à base de tabac est de loin le premier usager de transports de marchandises, qu'il s'agisse du fret routier ou ferroviaire. Il est suivi de la Construction et de l'Agriculture, sylviculture et pêche. Dans l'ensemble, les principaux secteurs usagers de transports appartiennent au secteur primaire ou secondaire et sont donc directement expéditeurs de produits. Le secteur de la Construction fait exception, puisque sa consommation intermédiaire massive induit un usage de transports très important, malgré le fait qu'il ne soit expéditeur d'aucun produit. A l'opposé, certains secteurs induisent un usage de transport de marchandises très faible. Ces secteurs sont principalement des services dont l'activité est fortement dématérialisée (Activités financières, assurances et immobilier) ou ancrée localement et peu intensive en flux de matériaux (Enseignement ; Arts, divertissements et loisirs). Parmi les secteurs faiblement usagers de transport se trouvent également des industries dont l'importance économique est relativement faible en France (comme le Textile) ou dont la demande finale est faible (comme les produits du Bois).

La Fabrication de denrées alimentaires induit un usage particulièrement important de transports parce qu'elle combine des effets directs et indirects tous deux très importants. Le secteur utilise non seulement un volume important de transport routier et ferroviaire pour acheminer ses propres produits (effet direct domestique), mais aussi pour acheminer des biens de consommation intermédiaire (effet indirect domestique et indirect importé). C'est d'ailleurs le seul secteur producteur de biens pour lequel l'effet indirect est presque aussi important que l'effet direct. Si l'on décompose l'effet indirect en fonction des secteurs expéditeurs (Figure 13), on voit que la consommation intermédiaire de produits issus de l'Agriculture induit un usage de transports très important dans le secteur des Denrées alimentaires. A l'inverse, cette valeur est retranchée de l'usage de transports dans le secteur de l'Agriculture, ce qui explique que son usage total de transports reste modéré. Le secteur de la Construction, lui, induit un usage de transports de Produits minéraux (non-métalliques et métalliques) très important. Ce sont d'ailleurs les Produits minéraux qui pèsent le plus lourdement dans les effets indirects des autres secteurs, comme pour le Commerce, les Matériels de transport, ou encore les Equipements électroniques, informatiques et machines.

Les importations (somme des effets directs importés et indirects importés, Figure 12) induisent des volumes très importants de transport, en particulier dans le cas du transport routier car pour ce dernier nos données intègrent le transport international lié aux importations en plus du transport intérieur de produits importés. L'usage de transport imputable aux importations est particulièrement important dans les secteurs qui incorporent également des volumes élevés de transport de produits domestiques. En termes relatifs, les importations représentent la part la plus élevée pour la Cokéfaction et raffinage à cause de l'importation de produits des Industries extractives (Figure 13), et pour le Textile qui est très peu produit en France mais très fortement importé<sup>43</sup>. Rappelons que, si le critère d'attribution de la responsabilité est que l'expéditeur satisfasse la demande finale, alors nous pouvons retrancher l'effet direct importé de la responsabilité des secteurs français, et considérer que celui-ci revient à leurs homologues étrangers. En effet, l'effet direct importé correspond à l'expédition de biens depuis l'étranger pour satisfaire la demande finale. Il faut cependant noter que le volume total de transports induit par les importations est structurellement sous-estimé car le vecteur des usages de transport

---

43. Cela se traduit par un effet direct importé particulièrement important pour le Textile.

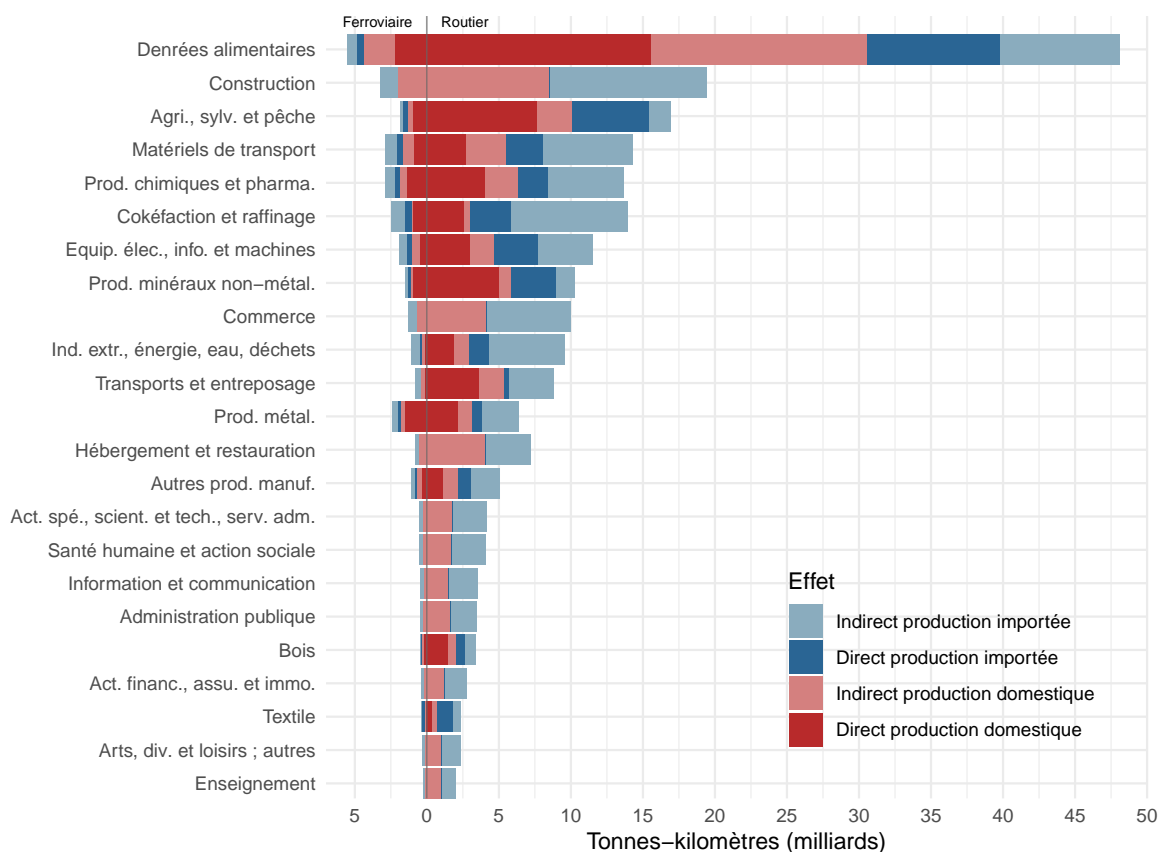
initial ( $P_{IM}^{ROUTE}$ ) n'inclut pas le transport intérieur dans le pays exportateur qui est induit par la demande française. En d'autres termes, nous connaissons le transport induit par le trajet international lié à l'importation en France, mais nous ne connaissons pas le transport intérieur induit par la circulation de biens de consommation intermédiaire dans les pays exportateurs. Cela peut conduire à une sous-estimation très importante, si l'on compare aux exportations françaises. En effet, là où les trajets internationaux représentent pour les exportations françaises une moyenne annuelle d'environ 50 milliards tkm, le trafic intérieur induit par les exportations, quant à lui, représente une moyenne annuelle de 92 milliards tkm. Or, cette structure est symétrique au problème des importations : nous prenons en compte les trajets internationaux représentant 59 milliards tkm/an en moyenne pour les exportations vers la France, et nous ignorons les transports intérieurs dans les pays exportateurs qui sont très probablement d'une ampleur comparable aux transports intérieurs induits par les exportations françaises.

Dans une perspective d'attribution basée sur l'expéditeur final, une partie du transport international induit par les exportations est attribuable aux unités françaises. Cette partie correspond à l'exportation de biens directement destinés à la consommation finale dans le pays exportateur. La partie non attribuable aux unités françaises correspond au transport de produits utilisés comme *inputs* dans les pays exportateurs. Nous disposons de données sur le transport international d'exportations ventilé par type de produits uniquement pour le transport routier. Ne disposant que des emplois domestiques français (au sens de l'équilibre ressources-emplois), nous ne pouvons distinguer la part de ces exportations destinée aux consommations intermédiaires de la part destinée à la demande finale. La Figure A9 (Annexe) présente les tonnes-kilomètres de transport routier attribuées aux exportations des secteurs. Ce sont en particulier les Industries extractives, les Produits minéraux, les Denrées alimentaires et les produits de l'Agriculture qui sont fortement usagers de transport international pour les exportations – avec 8 à 12 milliards de tkm par an en moyenne entre 2010 et 2022. Dans une perspective expéditeur (final), ces valeurs ne sont pas intégralement attribuables aux unités françaises pour la raison décrite ci-avant. Le biais lié à la confusion des emplois intermédiaires et finals est d'autant plus fort que trois de ces quatre produits fortement exportés (tous sauf les Denrées alimentaires) sont majoritairement utilisés comme consommation intermédiaire en France, et certainement aussi dans les pays importateurs. Retrancher ces transports d'inputs donnerait donc non seulement une valeur totale beaucoup plus faible, mais aussi une hiérarchisation différente des secteurs.

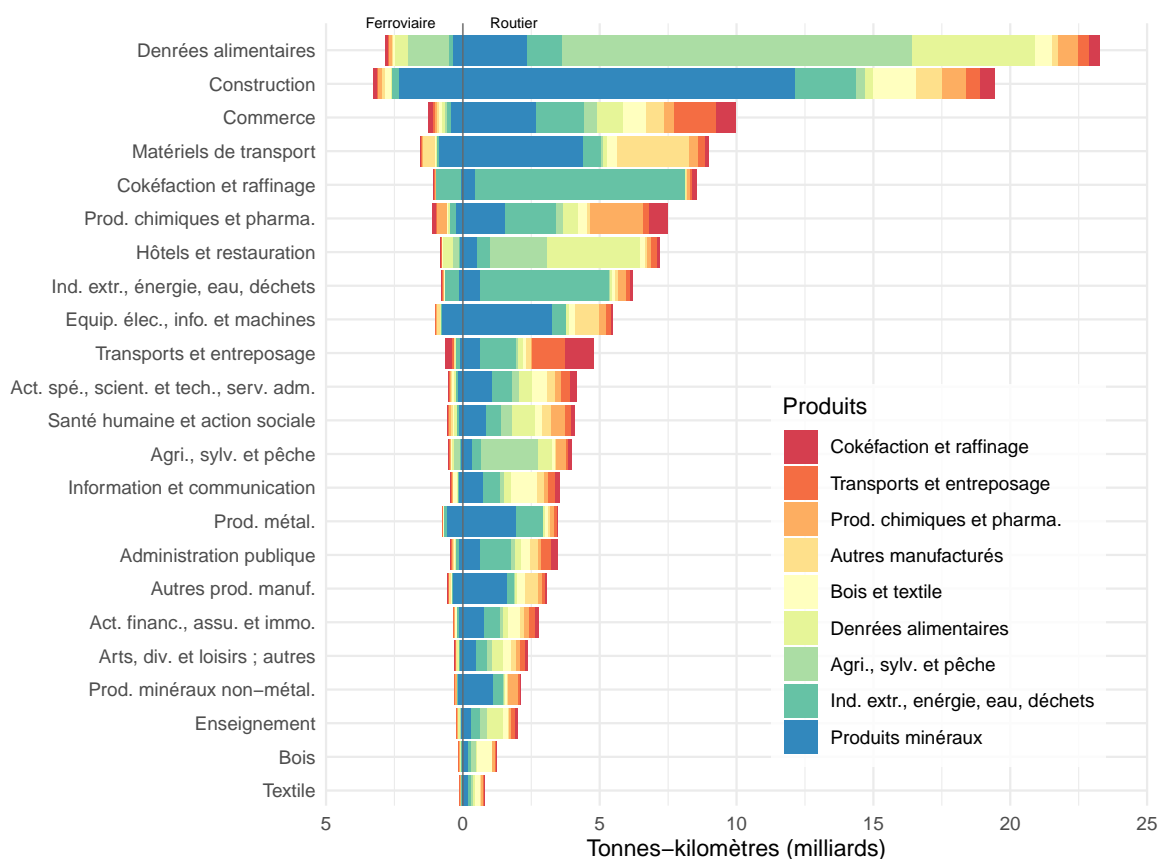
Puisque l'objectif ici est d'attribuer des responsabilités fondées sur l'usage de transport routier de marchandises pour calculer des empreintes des différents secteurs économiques français, il est pertinent de raisonner en termes de pourcentages. Schématiquement, et en omettant l'existence du transport routier de voyageurs, il est raisonnable d'estimer qu'un secteur responsable de 25% de l'usage de transport routier peut se voir attribuer 25% de l'empreinte matérielle ou de l'empreinte biodiversité liée aux infrastructures routières. La Figure 14 indique la part de l'usage total de transports attribuable à chaque secteur. Le secteur qui pèse le plus individuellement est de loin celui de la Fabrication de denrées alimentaires, dont la production (pour satisfaire la demande finale) génère 21,6% de l'usage total de transport routier de marchandises. Derrière, on retrouve les Autres services (qui agrègent 9 secteurs, dont le plus important en termes d'usage de transport est le Commerce avec 4,5%) et les Autres manufacturés (qui agrègent 3 secteurs). Le secteur de la Construction génère également à lui seul 8,7% de l'usage de fret routier.

Nous discutons, dans la section 5, des manières de prendre en compte ces transports

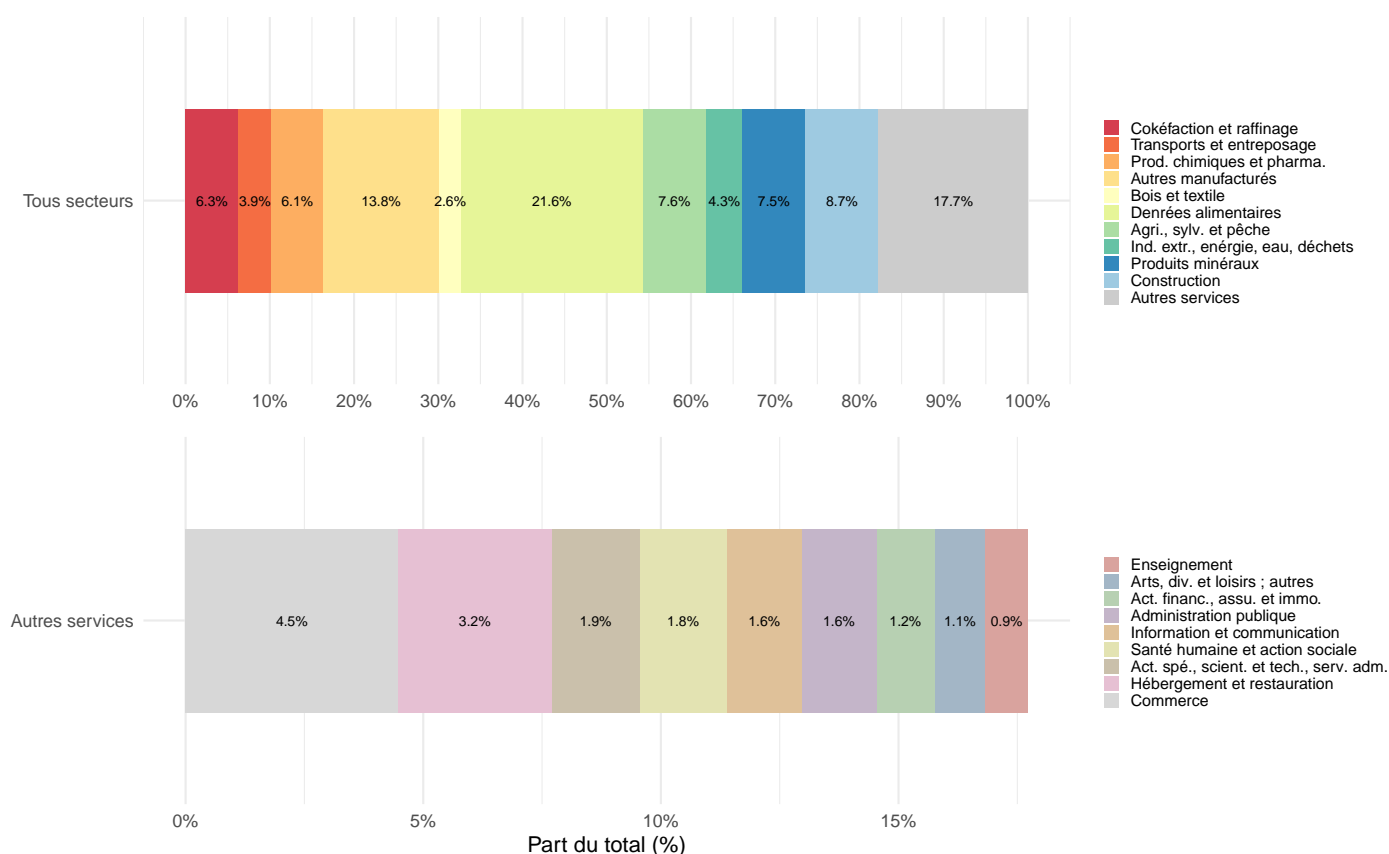
intérieurs terrestres dans les pays exportateurs et importateurs générés par la demande et l'offre domestiques via un modèle *multiregional input-output*. Cette extension que nous proposons permettrait de compléter les perspectives expéditeur et destinataire en retranchant et en additionnant certaines valeurs liées aux importations et aux exportations.



**FIGURE 12 – Volumes de transport routier et ferroviaire attribués par secteur et par type d'effet.** La partie à gauche de l'axe vertical représente le transport ferroviaire, la partie à droite de l'axe vertical représente le transport routier. Les valeurs présentées sont des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Les effets directs correspondent à l'usage de transport par les secteurs directement pour satisfaire la demande finale. Les effets indirects correspondent à l'usage de transport incorporé dans l'acheminement des inputs utilisés par les secteurs dans le processus de production.



**FIGURE 13 – Volumes de transport routier et ferroviaire incorporés dans la consommation intermédiaire des secteurs, par type de produit.** La partie à gauche de l'axe vertical représente le transport ferroviaire, la partie à droite de l'axe vertical représente le transport routier. Les valeurs présentées sont des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Ce graphique représente la somme des effets indirects domestiques et indirects importés attribués à chaque secteur, ventilée par type de bien de consommation intermédiaire. Les biens de consommation intermédiaire sont agrégés en 9 produits au lieu de 13. « Produits minéraux » agrège « Produits minéraux non-métalliques » et « Produits métalliques ». « Textile et bois » agrège « Textile » et « Bois ». Enfin, « Autres manufacturés » agrège « Autres produits manufacturés », « Matériels de transport » et « Equipements électriques, informatiques et machines ».



**FIGURE 14 – Usage relatif de transport routier de marchandises parmi l'ensemble des secteurs économiques (en haut). Usage relatif de transport routier de marchandises parmi les Autres services (en bas).** Les valeurs sont calculées à partir des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Les pourcentages indiqués sur les barres correspondent au pourcentage de l'usage total de transport attribué au secteur dont la couleur correspond. Les secteurs qui ne sont associés à l'expédition d'aucun produit sont tous agrégés dans « Autres services » (en haut), à l'exception de la Construction. Les tailles des barres en haut représentent les usages relatifs par rapport au total sur l'ensemble des secteurs. Les tailles des barres en bas représentent les usages relatifs par rapport au total sur les Autres services.

### 4.3.3 Mesure de l'usage de transport basée sur le destinataire

La perspective destinataire part du postulat que ce sont les unités dont on satisfait la demande finale qui sont responsables (1) du transport pour acheminer le produit jusqu'à ces unités s'il s'agit d'un bien (cela ne s'applique pas dans le cas des services) et (2) du transport des inputs qui ont été nécessaires à la production de ce bien ou service. Cette perspective amène à raisonner en termes de secteurs institutionnels plutôt qu'en termes de secteurs productifs. La Figure 15 représente les volumes de transport routier et ferroviaire par produit et ventilés en fonction des emplois finals et du secteur institutionnel. Cette présentation des résultats met l'accent sur le destinataire final des produits exportés plutôt que sur l'expéditeur final. Les exportations correspondent aux emplois du reste du monde. Pour cette raison, dans une logique d'attribution basée sur le destinataire, cette partie peut être retranchée des responsabilités des secteurs institutionnels français. Or, les exportations représentent une part importante de la demande finale d'une grande partie des produits, et en particulier de ceux qui induisent un usage de transports intérieurs terrestres conséquent. Ainsi, une très grande majorité des volumes transportés pour les Matériels de transport, les Produits chimiques et pharmaceutiques, les Produits minéraux non-métalliques et métalliques sont destinés aux exportations. Le secteur des Denrées alimentaires, quant à lui, produit principalement pour la consommation des ménages. La consommation des ménages induit donc un usage de transports important, principalement pour des Denrées alimentaires, mais aussi pour les produits de l'Agriculture, la Cokéfaction et raffinage, et pour les services d'Hôtels et restauration. L'usage de transports pour la FBCF est très majoritairement dû à l'investissement en produits de la Construction (bâtiments non résidentiels, génie civil), qui consomme un volume très important de Produits minéraux (cf. Figure 13). La consommation des APU induit un usage de transports très faible, mais les APU génèrent également de l'usage de transports par leur FBCF.

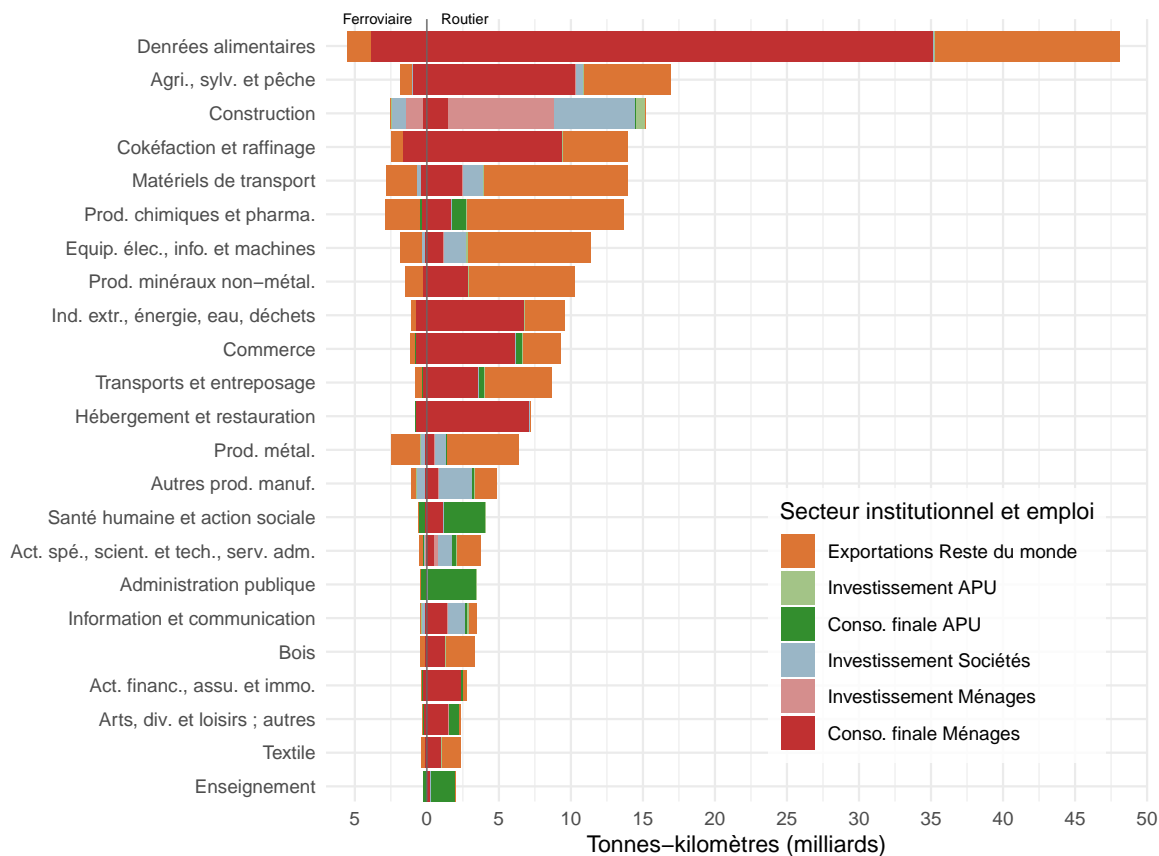


FIGURE 15 – Volumes de transport routier et ferroviaire attribués par secteur institutionnel et emploi final, en fonction du produit. La partie à gauche de l’axe vertical représente le transport ferroviaire, la partie à droite de l’axe vertical représente le transport routier. Les valeurs présentées sont des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). L’investissement correspond à la FBCF. La consommation et FBCF des ménages contient également la consommation et FBCF des ISBLSM.

Comme dans le cas de l’attribution basée sur l’expéditeur, on peut utiliser les parts de l’usage de transport routier comme critère d’attribution des empreintes. Pour cela, on préfère raisonner en termes de secteur institutionnel (SI) qu’en termes de type d’emploi final : les secteurs institutionnels correspondent à des unités économiques définies concrètes, contrairement aux emplois finals qui ne le sont pas nécessairement. En particulier, la FBCF concerne l’ensemble des SI à l’exception du reste du monde, et nous avons agrégé la consommation des ménages avec la consommation des ISBLSM. La Figure 16 indique la répartition des responsabilités entre les différents secteurs institutionnels, après ventilation des emplois finals (y compris la consommation finale et la FBCF) entre ces SI. Dans une perspective destinataire, les ménages sont de loin les unités économiques domestiques qui génèrent le volume le plus important de transports, avec 48,3% des tkm dont 45,7% issus de leur consommation finale. Ils devancent l’investissement des sociétés (6,7%) et la consommation finale des APU (5,4%). La FBCF des APU induit moins de 1% de l’usage total de transports. Enfin, le Reste du monde induit 38,1% de la demande de transport routier de marchandises en France à travers les exportations. Dans une perspective destinataire, cette partie peut être déduite des responsabilités des unités économiques françaises.

Si retrancher les exportations (c'est-à-dire la partie imputée au Reste du monde) est correct dans une logique d'attribution basée sur le destinataire final, cela conduirait à fortement sous-estimer la demande totale de transports induite par la consommation française et par les différents secteurs. En effet, comme mentionné précédemment, le vecteur des tonnes-kilomètres de produits importés ne prend en compte que l'usage de transports directement induit par les importations. On ignore l'usage intérieur de transports dans ces pays pour acheminer des biens de consommation intermédiaire contribuant, *in fine*, à satisfaire la demande française. Nous omettons donc précisément les usages de transports intérieurs dans ces pays pour exportations vers la France. Si l'on retranche les usages de transports intérieurs pour les exportations françaises, c'est-à-dire les vecteurs homologues dans les autres pays, on risque de fortement sous-estimer le volume total de transport induit par la consommation française. Cependant, il faut également admettre que les produits importés et exportés sont très différents. Dans ce cas, si l'on pouvait ajouter l'usage de transports intérieur incorporé dans les importations et retrancher l'usage de transports extérieurs incorporé dans les exportations, on obtiendrait probablement une répartition différente des usages entre les différents secteurs. En particulier, on obtiendrait un usage de transports très important pour les secteurs fortement importateurs, et un usage de transports très faible pour les secteurs fortement exportateurs.

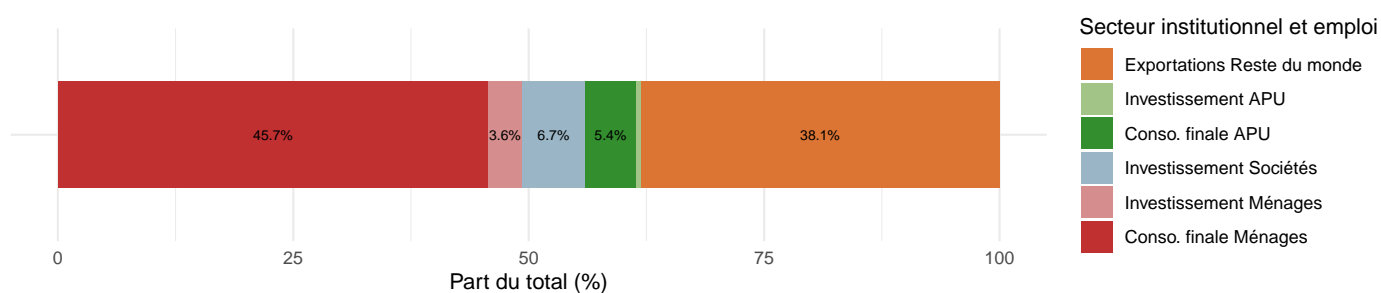


FIGURE 16 – Usage relatif de transport routier de marchandises parmi l'ensemble des secteurs institutionnels. Les valeurs sont calculées à partir des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Les pourcentages indiqués sur les barres correspondent au pourcentage de l'usage total de transport attribué à l'emploi final et au secteur institutionnel dont la couleur correspond. L'investissement correspond à la FBCF. La consommation et FBCF des ménages contient également la consommation et FBCF des ISBLSM.

#### 4.3.4 Prise en compte du transport de voyageurs et comparaison

L'unité véhicule-kilomètre (vkm) représente la distance totale parcourue par des véhicules. Nous pouvons ainsi utiliser la comparaison entre vkm pour le transport de voyageurs et pour le transport de marchandises comme support pour attribuer des empreintes à chacun de ces types d'usage. En 2022, le transport de voyageurs (y compris individuel) représentait 491,9 milliards de vkm, contre 37,2 milliards de vkm pour le transport de marchandises. Si l'on prend en compte les véhicules utilitaires légers – qui ont des usages mixtes – et qu'on les ventile entre transport de marchandises et transport de voyageurs, on arrive à 519,1 milliards de vkm contre 97,5 milliards de vkm<sup>44</sup> (Table 7). En valeur moyenne sur la période 2012-2022, toujours en prenant en compte les VUL, ces valeurs

44. A noter que cette ventilation surestime forcément la part du transport de marchandises, comme mentionné en Méthode 3.3

représentent 509,3 vkm contre 91,9 vkm. En termes de distance parcourue, le transport de voyageurs dépasse donc largement le transport de marchandises.

De manière complémentaire, nous pouvons regarder les tonnes-kilomètres (tkm), et ainsi mettre l’emphase sur la masse supportée par les infrastructures de transport routier plutôt que sur le passage total de véhicules sur ces infrastructures. Avec cette méthode (sujette à certaines incertitudes à cause des hypothèses nécessaires, cf. Annexe A.2.4), l’empreinte est beaucoup plus équilibrée entre le transport de voyageurs et le transport de marchandises (Table 7). La moyenne annuelle (sur 2012-2022) est de 729,4 tkm pour le transport de voyageurs contre 748,8 tkm pour le transport de marchandises. Retenir l’une ou l’autre de ces méthodes comme critère d’attribution a donc des implications normatives importantes. De par leurs intérêts respectifs (voir revue de littérature 2.3), nous voyons ces deux mesures comme des compléments plutôt que comme des substituts.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Véhicules-kilomètres voyageurs	508,8	508,3	513,8	520,1	527,7	532,4	531,9	537,2	431,7	471,8	519,1
Véhicules-kilomètres marchandises	88,2	87,0	87,5	88,3	90,1	93,0	95,5	98,0	88,4	98,0	97,5
Tonnes-kilomètres voyageurs	716,1	720,1	731,3	742,7	755,7	763,5	764,9	774,1	620,0	682,9	752,3
Tonnes-kilomètres marchandises	732,4	726,1	710,1	711,2	728,4	761,6	771,0	791,9	740,6	783,2	780,7

TABLE 7 – Véhicules-kilomètres et tonnes-kilomètres mesurés pour le transport de voyageurs et de marchandises (2012-2022).

## 5 Discussion

Cette étude s’inscrit dans la continuité de la littérature en métabolisme social sur la question plus spécifique de l’empreinte matérielle et environnementale des infrastructures de transport terrestre, et avec une approche comparative systématique entre transport routier et transport ferroviaire. Nous avons dans un premier temps mesuré deux causes de pertes de biodiversité : l’usage de matériaux et la fragmentation des habitats par la présence physique des infrastructures. Dans l’ensemble, les zones denses en usage de matériaux (Figure 3) coïncident peu avec les zones fortement fragmentées (Figures 6 à 9), à l’exception de la Normandie pour certains indicateurs de fragmentation. Les activités de construction des infrastructures sont donc – ou ont été historiquement – moins concentrées dans les zones où la fragmentation est importante. Cependant, les activités d’extraction n’étant pas nécessairement localisées à proximité des sites de construction, ce seul constat n’indique pas que les impacts des activités d’extraction et de la fragmentation par les routes n’affectent pas les mêmes espaces. En pratique, la distribution spatiale de l’extraction de matières minérales semble relativement corrélée avec celle de l’usage de ces matières dans les infrastructures (SDES 2024c). Plus généralement, la question de l’impact effectif sur la biodiversité est irrésolu. Ici, nous ne mesurons que des causes probables. La fragmentation d’espaces, les activités de construction et l’extraction de matériaux peuvent avoir des impacts très variables selon les contextes locaux.

Ensuite, nous avons établi un cadre pour attribuer ces empreintes en fonction de l’usage de transports – c’est-à-dire l’usage des services fournis par ces infrastructures. Nous avons particulièrement développé le cadre pour le transport de marchandises, en mesurant l’usage de transport des différents secteurs économiques, liés à la fois à l’expédition des biens de consommation finale et à l’expédition des biens de consommation intermédiaire utilisés dans leur processus de production. L’absence de spatialisation des flux de transport empêche de confronter explicitement les usages hétérogènes des transports et

les dommages causés par les infrastructures et leur usage (en particulier la fragmentation des habitats). Dépasser cette requiert un travail important dont la portée serait largement limitée par l’indisponibilité de certaines données. Dans la section qui suit, nous abordons les portées et limites des différentes dimensions de ce travail et suggérons des pistes pour l’approfondir, en mettant une emphase particulière sur les opportunités qu’offrent les données existantes concernant la France métropolitaine.

## **5.1 Enjeux de méthode, limites et perspectives de recherche**

### **5.1.1 L’estimation de l’usage de matériaux**

#### **Estimation de la FBCF**

L’estimation de la FBCF par l’approximation de l’équilibre ressources-emplois à des niveaux sectoriels plus fins que ceux publiés dans les comptes nationaux pourrait être utile à l’analyse sectorielle. Ainsi, en analyse input-output, il serait possible d’utiliser cette approximation pour endogénéiser la FBCF de la Construction, ventilée par type d’activité de construction, à des niveaux beaucoup plus fins que ce que permettent les comptes. On pourrait ainsi estimer la FBCF pour chaque sous-classe du Génie civil. Cela constituerait une base relativement solide pour effectuer une analyse sectorielle de la construction, tout en endogénéisant la FBCF. L’estimation de la FBCF ne constitue cependant qu’une étape de l’établissement d’un tableau entrées-sorties désagrégé, et est utile à condition de chercher à endogénéiser la FBCF – ce qui constitue aujourd’hui une frontière et un enjeu important de l’analyse IO (SODERSTEN et al. 2018 ; TAUSCH et MAGACHO 2024).

Cette méthode d’estimation se trouve limitée non seulement par les différences conceptuelles entre les indicateurs publiés par les statistiques d’entreprises et ceux publiés par les comptes nationaux, mais aussi par le retraitement des données d’Esane par les comptes nationaux. De plus, les données de certains secteurs pour certaines années peuvent être soumises au secret statistique, en particulier au niveau sous-classe qui est fortement désagrégé. Pour ces trois raisons au moins, il est irréaliste de penser que l’on peut reproduire à l’identique les données de FBCF non diffusées. Nous explorons donc cette piste comme base pour évaluer l’investissement dans les infrastructures de transport terrestre tout en ayant conscience de ses limites. Nous disposons pour cela des statistiques annuelles d’entreprises publiées entre 2009 et 2022. Si cette méthode permet d’approximer la FBCF, elle ne permettrait pas d’approximer la CCF. Une particularité de la CCF est que son estimation repose sur la méthode de l’inventaire permanent (MIP), qui est complexe, coûteuse en temps et dont il existe plusieurs approches alternatives (BERLEMANN et WESSELHÖFT 2014). En particulier, la MIP nécessite de disposer de séries de FBCF sur le temps très long, et d’attribuer des durées de vie aux différentes composantes de cette FBCF pour estimer la dynamique de la dépréciation du stock (MAHIEU 2019), en utilisant une loi de mortalité qui modélise la distribution des durées de vie (PICART 2004). Le travail de modélisation impliqué est très important, et nous ne disposons avec cette méthode que de proxies de la FBCF pour la période 2009-2022, ce qui est insuffisant pour pouvoir estimer la dépréciation contemporaine.

#### **Estimation par la longueur des réseaux**

Nous quantifions un usage de matériaux total de l’ordre d’environ 14 Gt. Malgré l’importance numérique croissante des flux de maintenance et la chute des flux d’expansion

en France, l'expansion représente de loin le poste d'usage de matériaux le plus important en somme des flux historiques. La masse de matériaux est presque entièrement incorporée dans les routes (13,85 Gt contre 0,24 Gt dans les voies ferrées). Cela s'explique en grande partie par la diffusion du réseau routier à travers toute la France métropolitaine.

Notre estimation de l'usage de matériaux distingue la masse totale pour expansion et la masse totale pour maintenance, et permet de mettre en balance ces deux grandeurs. Les AFM statiques ne permettent pas de prendre en compte la maintenance, et les AFM dynamiques considèrent parfois des périodes trop restreintes pour estimer la somme des masses incorporées dans les cycles de maintenance successifs. Par exemple, WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. (2015) comparent les flux pour maintenance et pour expansion entre 2004 et 2009, mais ne comparent pas la somme historique des flux pour les deux. Nous disposons ici de données sur la longueur des infrastructures entre 1980 et 2023, ce qui nous permet d'estimer les ampleurs de la maintenance sur l'ensemble de ces années, et ainsi de comparer la masse totale liée au développement et à la maintenance. Nous voyons ainsi que l'usage de matériaux pour maintenance constitue la majorité des flux annuels des années récentes, mais une minorité dans la somme des flux historiques. La comparaison entre la masse totale de matériaux (sommée sur l'ensemble des années) pour expansion et pour maintenance est limitée par l'indisponibilité de données avant 1980 : nous n'estimons le cycle de maintenance qu'à partir de cette année, et sommes obligés de modéliser l'âge des stocks en utilisation en 1980 (par une loi uniforme, entre 0 et  $N_s$  la durée du cycle de maintenance).

Les résultats des AFM sont largement tributaires des hypothèses concernant les intensités matérielles, de la délimitation des matériaux étudiés et de la longueur des infrastructures estimée. Des études concernant un même pays peuvent ainsi obtenir des résultats très différents (HABERL, WIEDENHOFER, SCHUG et al. 2021). L'estimation de l'usage de matériaux par la longueur des infrastructures est une première au niveau national en France. Pour cette raison, nous ne disposons d'aucun point de comparaison au niveau français. Cependant, plusieurs études susmentionnées au niveau national dans d'autres pays d'Europe offrent des points d'ancrage – que ce soit pour comparer les intensités matérielles utilisées ou les résultats obtenus. Les intensités matérielles en  $\text{kg}/\text{m}^2$  pour les routes reportées par AUGISEAU et KIM (2021) que nous utilisons sont proches de celles utilisées par HABERL, WIEDENHOFER, SCHUG et al. (2021) pour l'Allemagne et l'Autriche. Cependant, en  $\text{kg}/\text{m}$ , elles sont largement supérieures à celles utilisées par WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. (2015). L'usage total de matériaux pour expansion (environ 12 Gt) semble relativement cohérent avec des études récentes qui estiment cet usage à 8,5 Gt au Royaume-Uni et en Irlande (WIEDENHOFER, SCHUG et al. 2024) et à 13 Gt en Allemagne (HABERL, WIEDENHOFER, SCHUG et al. 2021). Si l'on observe en détail les méthodes, une différence majeure est que l'on prend en compte environ 6 Gt de sables et graviers, alors que HABERL, WIEDENHOFER, SCHUG et al. (2021) estiment que la couche de base est faite uniquement de granulats.

Concernant les omissions de certains types de voies ou de matériaux, nous ne prenons pas en compte les voies qui ne sont pas classées comme appartenant aux types que nous recensons (en l'absence de données). AUGISEAU et KIM (2021) ne fournissent pas d'intensités matérielles pour les ponts, ce qui nous conduit à ignorer l'usage de matériaux incorporé dans les ponts (routiers et ferroviaires). Pour les voies ferrées, nous ne prenons en compte que les voies constituant le réseau, et ignorons les autres voies<sup>45</sup>. Concernant les tunnels, ne disposant pas d'informations sur leur cycle de maintenance, nous ignorons

---

45. Par exemple, nous ignorons les voies de triage et autres voies de service.

l'usage de matériaux induit par leur maintenance.

Sur le plan méthodologique, la question des intensités matérielles pour maintenance est aussi délicate que celle de la durée du cycle de maintenance. La Figure 17, tirée d'un rapport technique de l'ONR (2022), illustre la non-linéarité des dégradations en fonction de l'âge de la chaussée. Elle indique également que des niveaux de dégradation différents appellent des techniques d'entretien différentes (préventif ou curatif). Ainsi, des voies qui seraient entretenues régulièrement pourraient impliquer des travaux plus légers. En particulier, la couche de roulement n'aurait pas besoin d'être entièrement remplacée, impliquant donc un apport d'enrobés bien plus faible que ce que nous estimons. A l'opposé, des chaussées très dégradées pourraient impliquer un renouvellement plus profond que la simple couche de roulement en surface, auquel cas la maintenance n'implique pas que des apports d'enrobés, mais aussi de granulats.

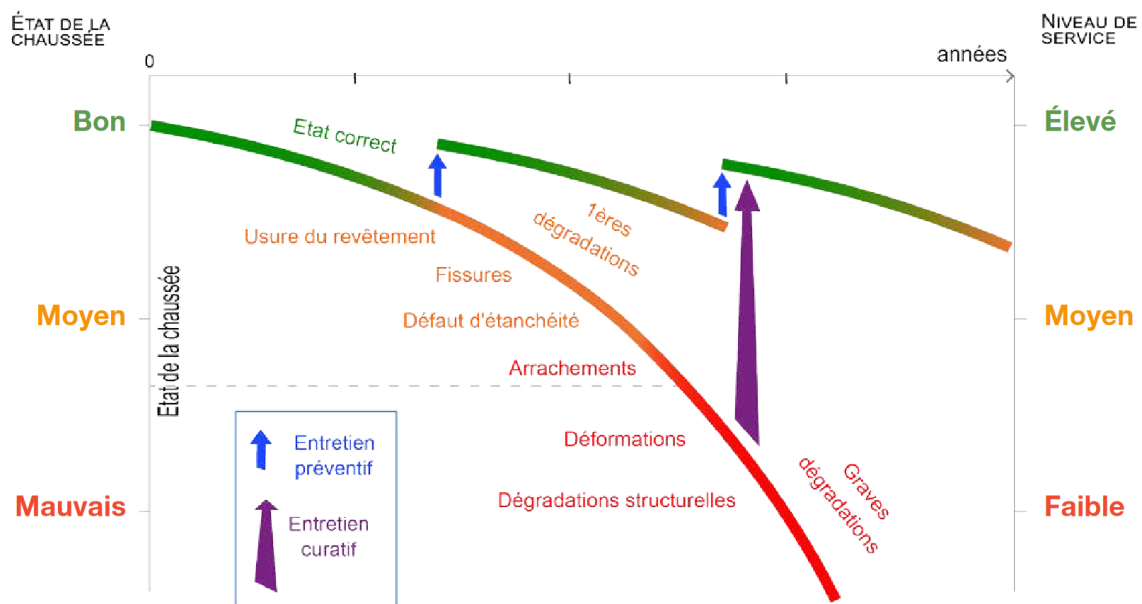


FIGURE 17 – Non-linéarité des dégradations des chaussées routières dans le temps et différences de techniques de maintenance associées. Source : Rapport de l'Observatoire national des routes (ONR 2022).

### 5.1.2 La fragmentation des habitats

La fragmentation des espaces naturels par les routes apparaît bien plus critique que la fragmentation par les voies ferrées. Cela s'explique par le caractère diffus du réseau routier. Ce résultat est validé non seulement par l'usage de trois indicateurs de fragmentation différents, mais aussi par l'usage de deux couches différentes pour délimiter les espaces naturels, dont une délimitant les zones de haute importance pour la biodiversité. L'ampleur de la fragmentation estimée diffère assez fortement entre les indicateurs – particulièrement en fonction de la prise en compte du degré d'occlusion causé par les infrastructures –, mais les massifs montagneux apparaissent globalement comme des *hotspots* où la fragmentation par les routes est importante.

La quantification de la fragmentation des habitats fondée sur des polygones d'espaces naturels délimités en fonction de l'occupation des sols (à partir des données Corine Land Cover) conduit implicitement à mettre en équivalence l'ensemble de ces espaces, à les penser comme étant homogènes sans prendre en compte leur importance effective pour la

biodiversité. De même que la caractérisation des espaces naturels est purement binaire, la caractérisation des routes et voies ferrées et fragmentantes l'est aussi : on considère qu'une route coupe parfaitement en deux un espace naturel ou ne la coupe pas. On voit bien que cette double binarité est purement fictive. Il existe un continuum d'espaces naturels plus ou moins propices à la biodiversité, tout comme il existe un continuum d'infrastructures générant un effet barrière plus ou moins contraignant pour les espèces – d'ailleurs, un des premiers enseignements de la *road ecology* est que toutes les espèces ne sont pas sensibles de la même manière à la présence d'infrastructures. Pour limiter l'impact de ce postulat binaire sur nos résultats, nous complétons nos analyses. D'un côté, pour intégrer l'idée d'un continuum de fragmentation, nous utilisons un indicateur (*l'Infrastructural fragmentation index*) qui prend en compte le degré d'occlusion des infrastructures. De l'autre côté, pour la binarité des espaces naturels, nous appliquons nos trois indicateurs sur une autre couche d'espaces naturels, qui sont répertoriés comme ayant un intérêt important pour la biodiversité (à savoir les Znieff, voir la Méthode). Cela reste binaire au sens où les espaces non classés en Znieff sont simplement ignorés, mais en complément des données sur l'occupation des sols, cela permet de prendre en compte l'importance écologique des espaces. Pour compléter cette prise en compte, on pourrait adapter les indicateurs existants en pondérant par exemple par le pourcentage de surface des espaces naturels (selon leur caractérisation à partir de Corine Land Cover) qui sont classés en Znieff. Le défaut principal est que, pour les indicateurs exprimés en fonction d'unités claires (comme la taille effective de maille et la *edge density*), on perd les unités, rendant l'interprétation moins intuitive.

Ensuite, la fragmentation que nous observons constitue une borne inférieure de l'impact de la présence des infrastructures sur les habitats. La modélisation de la fragmentation à partir de l'intersection entre les infrastructures et les espaces naturels ne permet de prendre en compte que les effets directs – c'est-à-dire la perte qualitative et quantitative d'habitats liée physiquement à cette intersection. Or, la présence d'infrastructures a également des conséquences indirectes sur les usages des sols, car elle peut rendre plus attractives les zones que celles-ci desservent, notamment en augmentant leur connectivité. Autrement dit, ces mêmes intérêts économiques mentionnés pour justifier le développement d'infrastructures, à commencer par l'accroissement de l'activité économique de la région, peuvent constituer des incitations à l'urbanisation ou à la conversion en terres agricoles. Une revue de littérature de KASRAIAN et al. (2016) résume l'état des connaissances sur les effets de la présence d'infrastructures en termes de changement d'usage des sols. Cette relation a été théorisée comme le « *transport land-use feedback cycle* », qui indique une relation à double sens. D'un côté, le développement d'infrastructures de transport favorise l'urbanisation en augmentant l'accessibilité, et de l'autre, l'urbanisation accroît également la demande locale de transports et peut favoriser à son tour le développement d'infrastructures. Une vaste majorité des études conclut que le développement d'infrastructures routières et ferroviaires est positivement corrélé à l'ampleur du changement d'usage des sols, et l'effet est particulièrement sans ambiguïté pour les routes. Par conséquent, nos données étant purement statiques, nous ne pouvons observer cette dynamique de rétrécissement des espaces naturels potentiellement induite par la présence d'infrastructures. Même si nous pouvions observer les changements d'usage des sols, puisque l'urbanisation et la conversion en terres agricoles est multifactorielle, nous ne pourrions isoler l'effet de la présence d'infrastructures.

Paradoxalement, le niveau de détail élevé des couches Znieff a posé problème pour modéliser la fragmentation. En effet, certaines zones ont été tracées à des niveaux de détails

qui prennent déjà en compte la fragmentation par les routes et les voies ferrées, c'est-à-dire en les excluant du polygone. D'autres n'excluent pas les routes et les voies ferrées du polygone. Lorsque les infrastructures sont exclues, cela rend impossible la modélisation qui consiste à couper les polygones. Cette méthode nous conduit donc à sous-estimer l'ampleur de la fragmentation dans les zones où celle-ci a déjà été prise en compte lors de la délimitation des Znieff. Par ailleurs, quelques différences dans l'usage des données limite la comparabilité de la fragmentation fondée sur l'occupation des sols et celle fondée sur les Znieff. D'abord, nous n'utilisons pas les mêmes couches pour les réseaux routier et ferré. Les données d'occupation des sols datent de 2018, tandis que les données Znieff datent de 2025. Pour 2018, BD CARTO n'est pas disponible mais ROUTE 500 l'est. Pour 2025, nous faisons face au problème inverse. Les deux sources ne fournissent pas systématiquement les mêmes informations, donc les critères d'exclusion des routes non fragmentantes diffèrent nécessairement. De plus, les Znieff continentales contiennent également des zones comme des ruisseaux et des rivières. Nous avons exclu certaines entités par mots-clés pour maximiser la comparabilité, mais cette exclusion ne couvre pas l'ensemble des Znieff que l'on aurait enlevé selon un critère d'Occupation des sols.

### 5.1.3 L'attribution des responsabilités fondée sur l'usage de transports

Concernant l'usage de transports, nous avons identifié les secteurs les plus demandeurs : Fabrication de denrées alimentaires (21,6% du total), la Construction (8,7%) et l'Agriculture (7,6%). Nous avons également présenté cet usage de transport en fonction des emplois finals, mettant ainsi l'emphase sur les consommateurs plutôt que sur les producteurs. Une très grande partie de l'usage de transports sert à satisfaire la consommation finale des ménages (45,7%) ou les exportations (38,1%). L'investissement représente environ 10% de l'usage de transport, majoritairement issu des sociétés. Enfin, nous avons exploré les manières de comparer le transport de voyageurs et le transport de marchandises, en l'appliquant au transport routier. Si le transport de voyageurs semble largement plus important en termes de véhicules-kilomètres (5 à 6 fois supérieur au transport de marchandises), l'utilisation des tonnes-kilomètres comme outil de comparaison aboutit à un équilibre relatif entre voyageurs et marchandises.

S'il constitue une innovation méthodologique, le travail sur l'attribution des responsabilités a été limité par des données incomplètes. Nous revenons ici sur les hypothèses émises et leur incidence sur les résultats. Nous proposons une méthode utilisant un tableau input-output multirégional, cohérente avec notre cadre théorique, qui permettrait de dépasser ces hypothèses et de prendre en compte l'ensemble des effets indirects (liés à la consommation de biens intermédiaires), qu'ils induisent un usage intérieur de transport dans le pays émetteur de la demande finale ou non.

Les données sur le transport routier et sur le transport ferroviaire n'ont pas les mêmes contours, ce qui limite leur comparabilité. On peut décomposer les transports de marchandises en cinq composantes et autant de données différentes, ce qui est illustré par la Figure 18. Les données dont nous disposons pour le fret ferroviaire agrègent à la fois le transport national (C3) et le transport international entrant (C2) et sortant (C4). Pour le transport routier, nous disposons de données présentant séparément le transport national, le transport international entrant et le transport international sortant. Ces différences limitent fortement la comparabilité des résultats. Nous sommes donc contraints d'appliquer des méthodes différentes pour calculer les intensités-transport des produits. Pour le transport ferroviaire, nous sommes obligés de calculer des intensités uniques, en divisant l'usage total de transport par produit (C2 + C3 + C4) par la somme des productions

domestiques et des importations de ce produit :  $\mathbf{TI}^{\text{RAIL}} = \mathbf{p}^{\text{RAIL}}(\widehat{\mathbf{x}^{\text{DOM}}} + \mathbf{x}^{\text{IM}})^{-1}$ . Cela conduit implicitement à supposer que, pour chaque produit, les intensités (c'est-à-dire les tkm générés par la production d'une unité monétaire de ce bien) de transport national des biens produits domestiques sont égales à la somme des intensités de transport national et international des produits importés. Pour le transport routier, puisque nous disposons de données distinguant transport national et international, les hypothèses que nous émettons sont différentes : les intensités de transport national sont identiques entre produits importés et domestiques, mais on ajoute le transport international pour les produits importés. Ces différences d'hypothèses ont des incidences importantes sur les résultats, illustré par l'important écart entre la part dans le transport routier et dans le transport ferroviaire (Figure 12) de la somme des effets liés aux importations (direct importé et indirect importé). La part imputée aux importations dans l'usage de transport routier est particulièrement élevée.

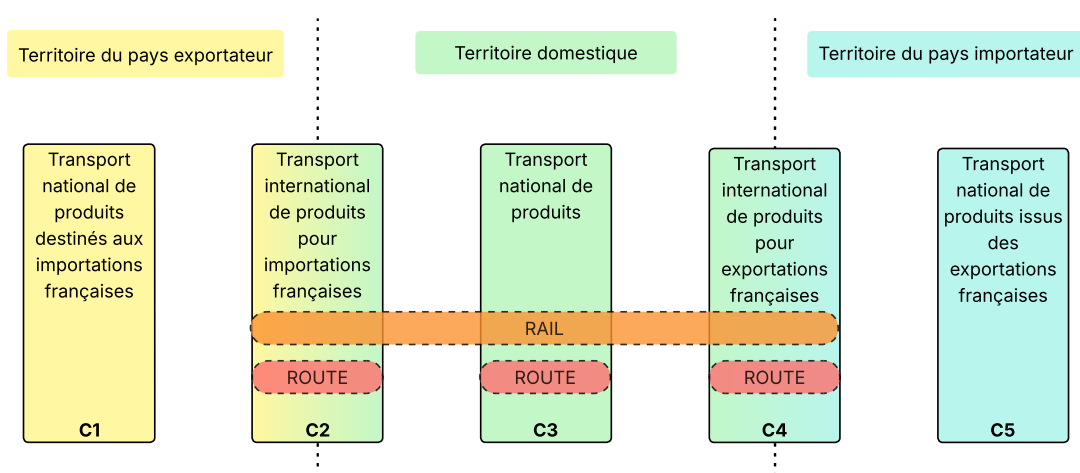


FIGURE 18 – Les cinq composantes de l'usage de transports et le contour de nos données sur le transport routier et ferroviaire.

Il est difficile de trancher quant à la plausibilité de l'une ou l'autre de ces hypothèses. L'ampleur du transport national de marchandises issues des importations est le déterminant principal de leur validité. Ainsi, si un bien est directement acheminé depuis l'étranger vers l'unité géographique française où il sera consommé (qu'il s'agisse d'un emploi final ou intermédiaire), alors il ne génère aucun usage de transport national. Cela peut concerner par exemple les flux commerciaux entre régions frontalières. A l'inverse, si le bien est acheminé vers des hubs commerciaux situés en France – comme les ports ou de grands entrepôts situés à la frontière, sur le territoire français – pour être ré-expédiés vers toute la France, alors ces biens importés génèrent un usage de transport national important, plus élevé que certains biens produits domestiquement et destinés à une consommation majoritairement locale.

Les différentes composantes du transport reflètent un arbitrage entre la prise en compte de l'usage total de transport, et l'identification de l'usage d'infrastructures de transport en France. D'un côté, prendre en compte l'usage total de transports permet d'avoir une approche complète, qui intègre l'usage de transport induit par les importations (C1 et C2) et retranche celui induit par les exportations (C4 et C5), et donnant ainsi l'empreinte totale en termes de transports liée à la demande finale de la France. De l'autre côté, si l'objectif est d'attribuer des responsabilités *fondées sur l'usage des infrastructures françaises* de

transport terrestre, alors une approche complète qui additionne le transport domestique et le transport à l'étranger induit par la demande française ajoute une variable confondante. En pratique, pour les trajets internationaux, nous ne pouvons démêler la part qui a lieu sur le sol français de la part qui a lieu à l'étranger. Ainsi, prendre en compte seulement le transport intérieur en France donne une garantie que les tonnes-kilomètres alloués correspondent intégralement à l'usage des infrastructures de transport en France, mais nous fait omettre la partie des trajets internationaux qui utilise les infrastructures françaises. A l'inverse, prendre en compte à la fois les trajets nationaux et internationaux permet de comptabiliser l'usage total des infrastructures françaises, mais conduit également à comptabiliser une partie des trajets internationaux qui n'utilise pas les infrastructures françaises. Enfin, si l'on pouvait prendre en compte le transport national de produits destinés aux importations françaises (C1) et issus des exportations françaises (C5), on aurait une méthode complète pour l'attribution des usages de transport suivant une perspective expéditeur ou destinataire, mais on sortirait définitivement de la question de l'usage des infrastructures françaises pour aller vers un usage total des infrastructures de transport.

Nous proposons ici un cadre méthodologique permettant de prendre en compte l'usage total de transports induit par la demande des pays, selon les perspectives expéditeur et destinataire. L'intérêt de disposer de C1 et de C5 (Figure 18) serait de gommer plusieurs biais méthodologiques qui limitent la complétude et la comparabilité des résultats dans une perspective *consumption-based* :

- Les exportations françaises se ventilent entre deux usages, à savoir la demande finale et la consommation intermédiaire. La partie de l'usage de transports destinée à exporter des biens de consommation intermédiaire à l'étranger devrait être retranchée des responsabilités des expéditeurs, et attribué aux secteurs étrangers qui utilisent ces biens de consommation intermédiaire pour satisfaire une demande finale. L'autre partie de l'usage de transports incorporé dans les exportations, qui vise à directement satisfaire une demande finale, doit être attribuée aux expéditeurs français.
- Le vecteur des tonnes-kilomètres attribués aux importations françaises actuellement ne contient que la part de l'usage de transports directement induit par les exportations dans ces pays (c'est-à-dire la composante C2 du transport). Or, ces secteurs exportateurs utilisent également des transports intérieurs pour acheminer des biens de consommation intermédiaire utilisés dans le processus de production pour satisfaire la demande française d'importations (première composante). Dans la perspective destinataire, cette part de l'usage de transports à l'étranger induit par les importations françaises est imputable à la demande finale française.

La Figure A10, en annexe, résume la délimitation des usages attribués aux unités françaises et aux unités étrangères, selon le critère d'attribution retenu (expéditeur ou destinataire). Le cadre optimal pour attribuer les usages de transport entre les secteurs et les pays serait un MRIO contenant les tableaux entrées-sorties de l'ensemble des pays. Cela nécessiterait de disposer des données sur les volumes de transport terrestre (1) intérieur par produit et (2) international par origine-destination et par produit. Les besoins en termes de données sur le transport sont donc très importantes, et les réunir pour l'ensemble des pays semble peu réaliste. En revanche, les collecter pour les principaux partenaires commerciaux européens pourrait être réaliste. En pratique, si l'on concentre l'analyse sur le transport routier et ferroviaire en France, le transport intra-Union européenne constitue l'essentiel des flux, qu'ils soient directs ou indirects. En termes de données, on pourrait donc utiliser d'un côté les tables input-output FIGARO (Eurostat)

et les données de transport routier diffusées également par Eurostat, compilées depuis les résultats d'une enquête unifiée, utilisant la même nomenclature de produits dans tous les pays. En restreignant le nombre de pays pour s'assurer de la disponibilité des données, on pourrait concentrer dans un premier temps l'analyse les principaux partenaires commerciaux européens, par exemple la Belgique, l'Allemagne, l'Espagne, l'Italie, les Pays-bas, la Pologne et la Portugal.

## 6 Conclusion

### 6.1 Comment attribuer des empreintes aux différents usages des transports face à leur hétérogénéité ?

La comparaison du transport de marchandises et du transport de voyageurs en fonction des tonnes-kilomètres et véhicules-kilomètres ne doit pas éluder l'hétérogénéité des usages des routes en pratique. Ainsi, le transport de marchandises et le transport collectif interurbain de voyageurs utilisent majoritairement les autoroutes et route nationales (SOES 2016). Au contraire, les routes départementales et surtout les voies communales sont presque exclusivement utilisées pour le transport individuel des ménages, et le transport collectif urbain. Prendre en compte ces caractéristiques d'usage est essentiel si l'on s'attache à ventiler les responsabilités entre différents types d'activités. En termes de stock de matériaux, au niveau local les autoroutes impliquent des intensités matérielles très largement supérieures aux voies communales (WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. 2015; MIATTO, SCHANDL, WIEDENHOFER et al. 2017; AUGISEAU et KIM 2021). Cette concentration spatiale de l'usage de matériaux s'observe sur la Figure 3. Mais à l'échelle nationale, les autoroutes constituent un réseau beaucoup moins dense, donc induisent un usage total de matériaux plus faible que les voies communales (cf. Figure 4(b)). En termes de fragmentation, les autoroutes génèrent un effet barrière localement beaucoup plus important à cause de leurs caractéristiques (largeur de l'emprise, chaussées séparées, glissières de sécurité), mais bien moins étendu du fait de leur rareté relative (21 000 km d'autoroutes et routes nationales sur environ 1 100 000 km de réseau en France d'après le SDES (2024a)). Ainsi, les usages des infrastructures routières liés au transport de marchandises et au transport interurbain de voyageurs génèrent des usages de matériaux et des fragmentations d'une forte intensité locale, mais d'un niveau relativement modéré à l'échelle nationale. Cela est d'autant plus vrai que les caractéristiques techniques de ces routes sont prévues pour accueillir des poids lourds, qui sont très majoritairement dédiés au transport de marchandises. A l'inverse, les routes de moindre importance, utiles exclusivement au transport individuel de voyageurs et au transport de voyageurs de proximité, génèrent des usages de matériaux et des fragmentations d'une faible intensité au niveau local, mais très diffuses sur l'ensemble du territoire.

De même, l'intensité d'usage des infrastructures est tout aussi inégale que l'intensité des fragmentations qu'elle pourrait générer. Les routes en Ile-de-France connaissent un trafic très soutenu mais fragmentent tout au plus de petits espaces, là où les routes dans les Alpes connaissent un trafic très faible mais fragmentent de grands espaces (6(a)). Cette remarque appelle deux implications. D'un côté, le trafic étant un déterminant majeur de l'ampleur de l'effet barrière<sup>46</sup>, l'intensité de la perturbation générée est bien plus impor-

---

46. Le trafic est d'autant plus un déterminant majeur de l'effet barrière que son ampleur est généralement corrélée aux dimensions des routes utilisées ; les caractéristiques des routes étant elles-mêmes des

tante en Ile-de-France, là où la diversité et l'abondance des espèces est en moyenne bien plus faible. De l'autre, le potentiel de perturbation est largement supérieur dans les Alpes, dans les espaces où les enjeux de conservation peuvent être particulièrement importants, et où le trafic est plus faible. Ainsi, selon les routes empruntées, l'usage des infrastructures peut avoir des impacts très hétérogènes sur la biodiversité. Si l'on souhaite décomposer les impacts par secteurs, encore faut-il voir entre quelles régions circulent les flux et, surtout, quelles routes ils empruntent. Ces hétérogénéités illustrent bien pourquoi on ne peut simplement distribuer les empreintes proportionnellement aux véhicules-kilomètres ou aux tonnes-kilomètres, que ce soit entre les transports de marchandises et de voyageurs, ou au sein du transport de marchandises entre les différents secteurs économiques ou institutionnels.

La spatialisation des flux de transport est une tâche complexe mais cruciale, dont l'aboutissement serait de pouvoir connecter explicitement ces flux avec les dommages causés par les infrastructures qu'ils utilisent. Concernant le transport routier de marchandises et l'attribution des responsabilités aux secteurs économiques ou institutionnels, il existe des pistes sérieuses au vu des données disponibles en France. Le SDES publie des données sur le transport routier de marchandises, par type de produit et par couple de régions origine-destination<sup>47</sup>. Ces données constituent donc une désagrégation au niveau régional des données sur le transport national de marchandises que nous utilisons comme source pour le vecteur de tonnes-kilomètres  $\mathbf{p}$  alloué aux secteurs. L'enjeu principal est alors de modéliser les trajets empruntés entre ces régions, ce qui implique de disposer à la fois de points de départ et de points d'arrivée. Plusieurs pistes sont envisageables, dont la plus sérieuse est l'utilisation des données de comptage du trafic moyen journalier annuel (TMJA) sur les routes nationales et autoroutes. Deux freins ont été identifiés. A cause des problématiques de secret statistique, un nombre important de couples origine-destination-produit sont non-diffusés dans ce jeu de données (la valeur numérique de ces flux est individuellement faible, mais collectivement élevée). De plus, ces données ne permettent de prendre en compte que le transport national et omettent le transport international qui est une composante majeure de transport de marchandises, en particulier dans les régions frontalières.

Si l'on cherche simplement à comparer le transport de voyageurs et de marchandises, les données de comptage du trafic moyen journalier annuel (TMJA) peuvent servir de base. Ces données ne sont pas disponibles pour l'ensemble des routes en France, mais elle sont diffusées : (1) pour les routes du réseau routier national non concédé<sup>48, 49</sup>, et (2) au niveau départemental dans un certain nombre de départements. Ces données sont publiées indépendamment par chaque département. Pour les rendre exploitables à l'échelle nationale, il faudrait en priorité centraliser ces initiatives, et rendre systématique la publication en données ouvertes des fichiers de formes. On peut donc envisager des comparaisons à l'échelle nationale, mais celles-ci seront limitées par l'indisponibilité des données de TMJA pour

---

déterminants de l'effet barrière (BENNETT 2017).

47. Ces données sont disponibles dans le dossier intitulé « Le TRM par origine destination et NST [...] » sur la page suivante : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-transport-routier-de-marchandises-trm-en-france-et-en-europe?rubrique=&dossier=1341>.

48. Le réseau routier national non concédé est constitué de l'ensemble des routes nationales, et des autoroutes non concédées à des entreprises privées.

49. Les données de comptage du trafic moyen journalier annuel sur le réseau routier national non concédé peuvent être consultées via le lien suivant : <https://www.data.gouv.fr/datasets/trafic-moyen-journalier-annuel-sur-le-reseau-routier-national/>.

les autoroutes concédées, et par l'indisponibilité des données relevant des routes départementales et des voies communales. Les données départementales peuvent être utilisées pour faire un focus sur un ou plusieurs départements. On dispose par exemple de données sur le « TMJA Tous véhicules » et sur le « TMJA Poids lourds » en Haute-Savoie – département dont les habitats sont en moyenne très vastes et de haute valeur pour la biodiversité. Il est ainsi possible de confronter les degrés de fragmentation induits par les routes, et la comparaison entre trafic de poids lourds et d'autres véhicules. La Figure A7, en Annexe, permet de confronter le pourcentage de poids lourds dans le trafic et l'ampleur de la fragmentation. En Haute-Savoie, les zones les plus fragmentées sont plutôt celles où il y a moins de poids lourds. Schématiquement, le trafic de poids lourds peut être associé au transport de marchandises et le trafic d'autres véhicules peut être associé au transport de voyageurs. Dans le cas de la Haute-Savoie, le transport de voyageurs semble donc affecter des zones particulièrement critiques pour la biodiversité par rapport au transport de marchandises. Cette approche est très exploratoire, mais son développement permettrait d'effectuer une comparaison spatialement explicite des empreintes des infrastructures utilisées pour le transport de voyageurs et pour le transport de marchandises.

## 6.2 Penser la place des infrastructures dans les transitions écologiques

Les infrastructures de transport constituent un substrat des activités économiques, et sont souvent pensées uniquement comme telles dans les études qui envisagent les transitions dans le secteur des transports. Ce sont les flux qui sont regardés en priorité lorsqu'on pense en termes de décarbonation. Les études sur la transition énergétique recommandent par exemple une transition vers le transport ferroviaire (HAINSCH 2023) ou vers les véhicules électriques (DOMINKOVIĆ et al. 2018). Ici, les infrastructures sont vues comme un moyen de faciliter ou rendre possible la transition (JELTI et al. 2023), par exemple suivant l'idée que construire de nouvelles routes permettrait de décongestionner les réseaux existants et donc d'améliorer l'efficacité énergétique de l'usage des véhicules (AHMAD et al. 2023). D'un autre côté, un nombre important d'études regardent les impacts environnementaux des infrastructures avec l'objectif minimiser les impacts liés à leur construction, par exemple en recommandant d'utiliser certains types de revêtements pour minimiser les émissions de GES (JELTI et al. 2023), ou d'adapter les routes pour minimiser leur empreinte biodiversité (KARLSON et al. 2014 ; BENNETT 2017). Une relative perméabilité semble s'être formée entre les travaux pour lesquels la transition passe par la réduction des flux de dommages liés à l'usage des transports, et ceux qui regardent la transition des infrastructures, c'est-à-dire les stocks sous-jacents à cet usage. Dans une certaine mesure, notre étude connecte les flux liés à l'usage de transports et le stock lié aux infrastructures sous-jacentes au travers de l'attribution des responsabilités basée sur l'usage. Cela s'appuie sur le constat que les dommages causés par les infrastructures sont indissociables des usages qui sont faits de ces infrastructures. Cependant, le périmètre des dommages environnementaux que nous prenons en compte n'est que celui des infrastructures : nous n'analysons pas conjointement les dommages environnementaux liés aux infrastructures et aux usages.

Il se dégage de cette réflexion l'implication suivante : dans une perspective de transition écologique, il faut penser conjointement les impacts des flux et les impacts des stocks. La recommandation de construire de nouvelles routes pour décongestionner les réseaux existants, par exemple, devrait être confrontée aux impacts environnementaux de ces in-

frastructures. Nos résultats sur la fragmentation pointent un effet total des routes très important, lié au caractère diffus du réseau routier : la construction de nouveaux tronçons en appelle souvent d'autres. A l'inverse, les voies ferrées sont très linéaires et isolées spatialement, ce qui permet de limiter la diffusion du réseau et donc son empreinte physique et matérielle. On voit ici comment prendre en compte l'impact environnemental des infrastructures amène à considérer autrement les transitions. Schématiquement, construire de nouvelles routes pourrait diminuer l'empreinte carbone de l'usage des véhicules, mais augmenter considérablement l'empreinte biodiversité. Construire de nouvelles voies ferrées, à l'inverse, pourrait créer une synergie entre empreinte carbone et empreinte biodiversité. Cela est évidemment hypothétique, et notre étude ne permet pas de formuler une telle recommandation. Elle indique cependant l'importance de considérer simultanément les flux et les stocks lorsqu'on pense les transitions.

## Références

- AHMAD, Furkan et al. (2023). “Applications of evolutionary game theory in urban road transport network : A state of the art review”. In : *Sustainable Cities and Society* 98, p. 104791.
- ALISES, Ana et José Manuel VASSALLO (2016). “The impact of the structure of the economy on the evolution of road freight transport : a macro analysis from an Input-Output approach”. In : *Transportation Research Procedia* 14, p. 2870-2879.
- ANSES (2013). *Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs*. Rapp. tech. Agence nationale de sécurité sanitaire.
- ART (2025). *Le marché français du transport ferroviaire en 2023*. Rapp. tech. Autorité de régulation des transports.
- ARYAN, Yash et al. (2023). “A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures”. In : *Journal of Environmental Management* 336, p. 117697.
- ASCENSÃO, Fernando et al. (2018). “Environmental challenges for the Belt and Road Initiative”. In : *Nature Sustainability* 1.5, p. 206-209.
- AUGISEAU, Vincent et Sabine BARLES (2017). “Studying construction materials flows and stock : A review”. In : *Resources, Conservation and Recycling* 123, p. 153-164.
- AUGISEAU, Vincent et Eunhye KIM (2021). “Spatial characterization of construction material stocks : The case of the Paris region”. In : *Resources, Conservation and Recycling* 170, p. 105512.
- BARBER, Christopher P et al. (2014). “Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon”. In : *Biological conservation* 177, p. 203-209.
- BARRIENTOS, Rafael, Fernando ASCENSÃO, Pedro BEJA et al. (2019). “Railway ecology vs. road ecology : similarities and differences”. In : *European journal of wildlife research* 65.1, p. 12.
- BARRIENTOS, Rafael, Fernando ASCENSÃO, Marcello D'AMICO et al. (2021). “The lost road : Do transportation networks imperil wildlife population persistence ?” In : *Perspectives in Ecology and Conservation* 19.4, p. 411-416.
- BENNETT, Victoria J (2017). “Effects of road density and pattern on the conservation of species and biodiversity”. In : *Current Landscape Ecology Reports* 2.1, p. 1-11.
- BERLEMANN, Michael et Jan-Erik WESSELHÖFT (2014). “Estimating aggregate capital stocks using the perpetual inventory method : A survey of previous implementations and new empirical evidence for 103 countries”. In : *Review of Economics* 65.1, p. 1-34.
- BREHME, Cheryl S et al. (2013). “Permeability of roads to movement of scrubland lizards and small mammals”. In : *Conservation Biology* 27.4, p. 710-720.
- BRUSCHI, Daniele et al. (2015). “Characterizing the fragmentation level of Italian's National Parks due to transportation infrastructures”. In : *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 36, p. 18-28.
- CEREMA (2020). *Indicateurs de fragmentation des espaces naturels. France métropolitaine*.  
— (2022). *La taille effective de maille des espaces naturels. Un indicateur de la fragmentation des espaces naturels calculé sur les périmètres des contrats de relance et de transition écologique de France métropolitaine*. Rapp. tech. Cerema.  
— (2024). *La taille effective de maille des espaces naturels. Création d'une couche géographique d'espaces naturels et semi-naturels continus après fragmentation anthropique*. Rapp. tech. Cerema.

- CHOWDHURY, Mashrur et al. (2013). *Rate of deterioration of bridges and pavements as affected by trucks*.
- DE MONTIS, Andrea et al. (2017). “Landscape fragmentation in Mediterranean Europe : A comparative approach”. In : *Land use policy* 64, p. 83-94.
- DESROSIÈRES, Alain et Sandrine KOTT (2005). “Quantifier”. In : *Genèses* 1, p. 002-003.
- DI LUDOVICO, D. et B. ROMANO (2000). “The Evaluation of Environmental Fragmentation using GIS Techniques”. In : *PLANECA Newsletter* 5/2000.
- DÍAZ, Sandra et Yadvinder MALHI (2022). “Biodiversity : concepts, patterns, trends, and perspectives”. In : *Annual Review of Environment and Resources* 47.1, p. 31-63.
- DIDOU, Olivier (2023). *38,9 millions de voitures en circulation en France au 1er janvier 2023*. Rapp. tech. Services des données et études statistiques.
- DOMINKOVIĆ, Dominik Franjo et al. (2018). “The future of transportation in sustainable energy systems : Opportunities and barriers in a clean energy transition”. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, p. 1823-1838.
- EUROPEAN COMMISSION (2013). *European System of Accounts – ESA 2010*. Publications Office of the European Union.
- (2023). *Manual on government deficit and debt – Implementation of ESA 2010 – 2022 edition*. Publications Office of the European Union. DOI : doi/10.2785/244294.
- FEDERICI, Mirco et al. (2008). “A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems”. In : *Energy* 33.5, p. 760-775.
- FITCH, Gordon et Chatura VAIDYA (2021). “Roads pose a significant barrier to bee movement, mediated by road size, traffic and bee identity”. In : *Journal of Applied Ecology* 58.6, p. 1177-1186.
- FLOWERS, Bryon et al. (2020). “Analysis of the habitat fragmentation of ecosystems in Belize using landscape metrics”. In : *Sustainability* 12.7, p. 3024.
- FOSTER, Vivien et al. (2023). *The impact of infrastructure on development outcomes*. World Bank Washington, DC.
- GILJUM, Stefan et al. (2016). “Identifying priority areas for European resource policies : a MRIO-based material footprint assessment”. In : *Journal of Economic Structures* 5.1, p. 17.
- GROSSEGGER, Daniel et al. (2024). “A critical review of road network material stocks and flows : current progress and what we can learn from it”. In : *Resources, Conservation and Recycling* 205, p. 107584.
- GUILHOTO, Joaquim JM (2021). “Input–output models applied to environmental analysis”. In : *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- GUPTA, Ankit et al. (2011). “Pavement deterioration and maintenance model for low volume roads”. In : *International Journal of Pavement Research and Technology* 4.4, p. 195.
- HABERL, Helmut, Dominik WIEDENHOFER, Karl-Heinz ERB et al. (2017). “The material stock–flow–service nexus : A new approach for tackling the decoupling conundrum”. In : *Sustainability* 9.7, p. 1049.
- HABERL, Helmut, Dominik WIEDENHOFER, Franz SCHUG et al. (2021). “High-resolution maps of material stocks in buildings and infrastructures in Austria and Germany”. In : *Environmental science & technology* 55.5, p. 3368-3379.
- HAINSCH, Karlo (2023). “Identifying policy areas for the transition of the transportation sector”. In : *Energy Policy* 178, p. 113591.
- HARGIS, Christina D et al. (1998). “The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation”. In : *Landscape ecology* 13.3, p. 167-186.

- HORELLOU, Arnaud et al. (2017). “Les Zones naturelles d’Intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) : de l’inventaire à l’expertise”. In : *Naturae* 12, p. 1-11.
- INSEE (2025). *Guide du secret statistique, version de mars 2025*. Rapp. tech. Institut national de la statistique et des études économiques.
- INYIM, Peeraya et al. (2016). “Environmental assessment of pavement infrastructure : A systematic review”. In : *Journal of environmental management* 176, p. 128-138.
- JAEGER, Jochen AG (2000). “Landscape division, splitting index, and effective mesh size : new measures of landscape fragmentation”. In : *Landscape ecology* 15.2, p. 115-130.
- JELTI, Faissal et al. (2023). “Transition paths towards a sustainable transportation system : a literature review”. In : *Sustainability* 15.21, p. 15457.
- KARLSON, Mårten et al. (2014). “Road ecology in environmental impact assessment”. In : *Environmental impact assessment review* 48, p. 10-19.
- KASRAIAN, Dena et al. (2016). “Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change : an international review of empirical studies”. In : *Transport reviews* 36.6, p. 772-792.
- KODIKARA, Jayantha et al. (2018). “Review of soil compaction : History and recent developments”. In : *Transportation Geotechnics* 17, p. 24-34.
- KRAUSMANN, Fridolin et al. (2017). “Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use”. In : *Proceedings of the national academy of sciences* 114.8, p. 1880-1885.
- KUNC, Hansjoerg P et Rouven SCHMIDT (2019). “The effects of anthropogenic noise on animals : a meta-analysis”. In : *Biology Letters* 15.11, p. 20190649.
- LEDDA, Antonio et Andrea DE MONTIS (2019). “Infrastructural landscape fragmentation versus occlusion : A sensitivity analysis”. In : *Land Use Policy* 83, p. 523-531.
- LEE, Min-Kyu et Seung-Hoon YOO (2016). “The role of transportation sectors in the Korean national economy : An input-output analysis”. In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 93, p. 13-22.
- LENZEN, Manfred et al. (2012). “International trade drives biodiversity threats in developing nations”. In : *Nature* 486.7401, p. 109-112.
- LEPAREUR, Fanny et al. (2022). “The nationwide ‘ZNIEFF’ inventory in France : an open dataset of more than one million species data in zones of high ecological value”. In : *Biodiversity Data Journal* 10, e71222.
- MAGALHÃES, Nelo (2022). “Matières à produire l’espace : une histoire environnementale des grandes infrastructures depuis 1945”. Thèse de doct. Université Paris Cité.
- MAHIEU, Ronan (2019). *Sources et méthodes pour l’élaboration des comptes nationaux*. Vertus, limites et perspectives de la comptabilité nationale - 16e colloque de l’Association de Comptabilité Nationale.
- MASRI, Jafar et al. (2024). “A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness : A state-of-the-art”. In : *Ain Shams Engineering Journal* 15.10, p. 102957.
- MCGARIGAL, Kevin (1995). *FRAGSTATS : spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. T. 351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- MIATTO, Alessio, Heinz SCHANDL, Tomer FISHMAN et al. (2017). “Global patterns and trends for non-metallic minerals used for construction”. In : *Journal of Industrial Ecology* 21.4, p. 924-937.
- MIATTO, Alessio, Heinz SCHANDL, Dominik WIEDENHOFER et al. (2017). “Modeling material flows and stocks of the road network in the United States 1905–2015”. In : *Resources, Conservation and Recycling* 127, p. 168-178.

- MTWEVE, Philipo et al. (2025). “Exploring socioeconomic and environmental impacts of road infrastructure development in Sub-Saharan Africa : A systematic literature review”. In : *Environmental Development* 54, p. 101177.
- NAWAZ, Muhammad Farrakh et al. (2013). “Soil compaction impact and modelling. A review”. In : *Agronomy for sustainable development* 33.2, p. 291-309.
- NEALER, Rachael et al. (2011). “Modal freight transport required for production of US goods and services”. In : *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 47.4, p. 474-489.
- NG, CP et al. (2019). “Road infrastructure development and economic growth”. In : *IOP conference series : materials science and engineering*. T. 512. 1. IOP Publishing, p. 012045.
- NORTH, Douglass C. (1991). “Institutions”. In : *The Journal of Economic Perspectives* 5.1, p. 97-112.
- OLIVEIRA JR, Paulo Roberto Ramos de et al. (2011). “Impact of road clearings on the movements of three understory insectivorous bird species in the Brazilian Atlantic Forest”. In : *Biotropica* 43.5, p. 628-632.
- ONR (2022). *Rapport ONR 2021*. Rapp. tech. Observatoire national des routes.
- (2025). *Rapport ONR 2024*. Rapp. tech. Observatoire national des routes.
- PARK, Won-Jun et al. (2020). “Analysis of major environmental impact categories of road construction materials”. In : *Sustainability* 12.17, p. 6951.
- PAULIUK, Stefan et Daniel B MÜLLER (2014). “The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation”. In : *Global Environmental Change* 24, p. 132-142.
- PENDRILL, Florence et al. (2019). “Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions”. In : *Global environmental change* 56, p. 1-10.
- PETERS, Glen P (2008). “From production-based to consumption-based national emission inventories”. In : *Ecological economics* 65.1, p. 13-23.
- PICART, Claude (2004). “Evaluer la rentabilité des sociétés non financières”. In : *Economie et statistique* 372.1, p. 89-116.
- ROCA FLORIDO, Alberto et Simon MAIR (2025). “Tensions between the carbon, employment and value added generated by marine sectors : Triple bottom line analysis using a novel input–output table for the UK”. In : *Sustainable Development* 33.1, p. 1366-1380.
- SALGUEIRO, Pedro A et al. (2020). “Enhancing biodiversity and ecosystem services in quarry restoration—challenges, strategies, and practice”. In : *Restoration Ecology* 28.3, p. 655-660.
- SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, Manuel et al. (2022). “Impact of roads on environmental protected areas : analysis and comparison of metrics for assessing habitat fragmentation”. In : *Land* 11.10, p. 1843.
- SANTOS, Georgina (2017). “Road transport and CO2 emissions : What are the challenges?” In : *Transport Policy* 59, p. 71-74.
- SAYARA, Tahseen et al. (2016). “Impact of air pollution from quarrying and stone cutting industries on agriculture and plant biodiversity”. In.
- SCHULTZ, Siegfried (1977). “Approaches to identifying key sectors empirically by means of input-output analysis”. In : *The Journal of development studies* 14.1, p. 77-96.
- SDES (2019). *Résultats détaillés de l’enquête mobilité des personnes de 2019*. Rapp. tech. Services des données et études statistiques.
- (2024a). *Bilan annuel des transports en 2023*. Rapp. tech. Service des données et études statistiques.

- SDES (2024b). *Données sur le parc automobile français au 1er janvier 2024*. Rapp. tech. Services des données et études statistiques.
- (2024c). *Les sites d'extraction de matières minérales et énergétiques en France : près de 3 000 carrières, 123 mines et 64 gisements pétroliers et gaziers en 2023*. Rapp. tech. Services des données et études statistiques.
- SEIDLER, Renee G et al. (2015). "Identifying impediments to long-distance mammal migrations". In : *Conservation Biology* 29.1, p. 99-109.
- SFF (1982). *Instructions à l'usage du formulaire « Inventaire des Zones naturelles d'Intérêt écologique, faunistique, floristique » (formulaire S.F.F. n° 305, juin 1982)*. Rapp. tech. Secrétariat de la Faune et de la Flore.
- SODERSTEN, Carl-Johan H et al. (2018). "Endogenizing capital in MRIO models : the implications for consumption-based accounting". In : *Environmental science & technology* 52.22, p. 13250-13259.
- SOES (2016). *Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans*. Rapp. tech. Service de l'observation et des statistiques.
- STEFFEN, Will et al. (2015). "The trajectory of the Anthropocene : the great acceleration". In : *The anthropocene review* 2.1, p. 81-98.
- TAUSCH, Luca et Guilherme MAGACHO (2024). *Challenges in the transition to a low-carbon economy for developing countries : estimating capital-use matrices and imported needs*.
- TEO, Hoong Chen et al. (2019). "Environmental impacts of infrastructure development under the belt and road initiative". In : *Environments* 6.6, p. 72.
- VAN FAN, Yee et al. (2018). "A review on air emissions assessment : Transportation". In : *Journal of cleaner production* 194, p. 673-684.
- WANG, Jie et al. (2023). "Environmental justice, infrastructure provisioning, and environmental impact assessment : Evidence from the California Environmental Quality Act". In : *Environmental Science & Policy* 146, p. 66-75.
- WANG, Zhaoxing et al. (2023). "High-resolution mapping of material stocks in Belgian road infrastructure : material efficiency patterns, material recycling potentials, and greenhouse gas emissions reduction opportunities". In : *Environmental Science & Technology* 57.34, p. 12674-12688.
- WIEDENHOFER, Dominik, Franz SCHUG et al. (2024). "Mapping material stocks of buildings and mobility infrastructure in the United Kingdom and the Republic of Ireland". In : *Resources, Conservation and Recycling* 206, p. 107630.
- WIEDENHOFER, Dominik, Julia K STEINBERGER et al. (2015). "Maintenance and expansion : modeling material stocks and flows for residential buildings and transportation networks in the EU25". In : *Journal of Industrial Ecology* 19.4, p. 538-551.
- WIEDMANN, Thomas O et al. (2015). "The material footprint of nations". In : *Proceedings of the national academy of sciences* 112.20, p. 6271-6276.
- WILLIAMSON, Oliver E (1985). "The economic institutions of capitalism. Firms, markets, relational contracting". In : *Das Summa Summarum des Management : Die 25 wichtigsten Werke für Strategie, Führung und Veränderung*. Springer, p. 61-75.
- XU, Xun et al. (2021). "Economic structural change and freight transport demand in China". In : *Energy Policy* 158, p. 112567.
- YE, Quanliang et al. (2021). "Linking the Environmental Pressures of China's Capital Development to Global Final Consumption of the Past Decades and into the Future". In : *Environmental Science & Technology* 55.9, p. 6421-6429.

# Annexe

## A.1 Résultats et figures complémentaires

### A.1.1 Fragmentation des habitats

#### Commentaires

- **Taux de variation de la taille effective de maille** : Les pixels fragmentés par les voies ferrées voient généralement une baisse de  $M_{eff}$  comprise entre 15 et 50%, là où un nombre important de pixels fragmentés par les routes ont une  $M_{eff}$  diminuant d'entre 50 et 80% (Figure A2). En termes de variations relatives, la Normandie, le Grand-Est et le Massif central semblent être les zones les plus affectées localement par la fragmentation par les routes. Les Alpes, dont les espaces naturels sont vastes en l'absence de fragmentation, semblent moins affectées par le passage de routes.
- **Taux de variation de Edge density** : Avec le passage des voies ferrées, les variations de  $ED$  sont nulles ou positives sur une très grande partie des mailles du territoire. Le passage des routes, quant à lui, augmente pour la moitié de mailles la  $ED$  d'au moins 11,4%, et pour 10% des mailles cet indicateur de fragmentation augmente d'au moins 68,2%. Les espaces naturels de Gascogne, du Grand-Est et du Massif central sont particulièrement affectés, ce qui indique une certaine corrélation avec le premier indicateur. Suivant cet indicateur, le degré de fragmentation semble moins uniformément réparti dans les chaînes de montagnes, où il semble exister des poches non affectées par l'augmentation de la surface relative de bordures.

#### Figures

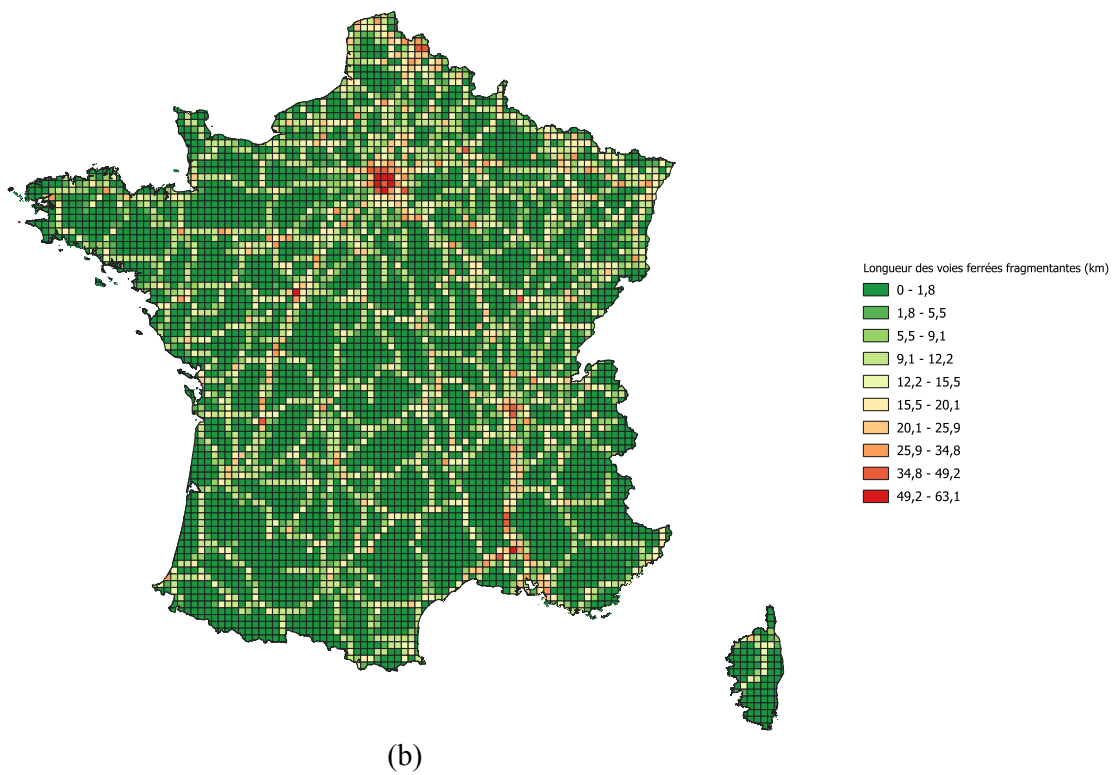
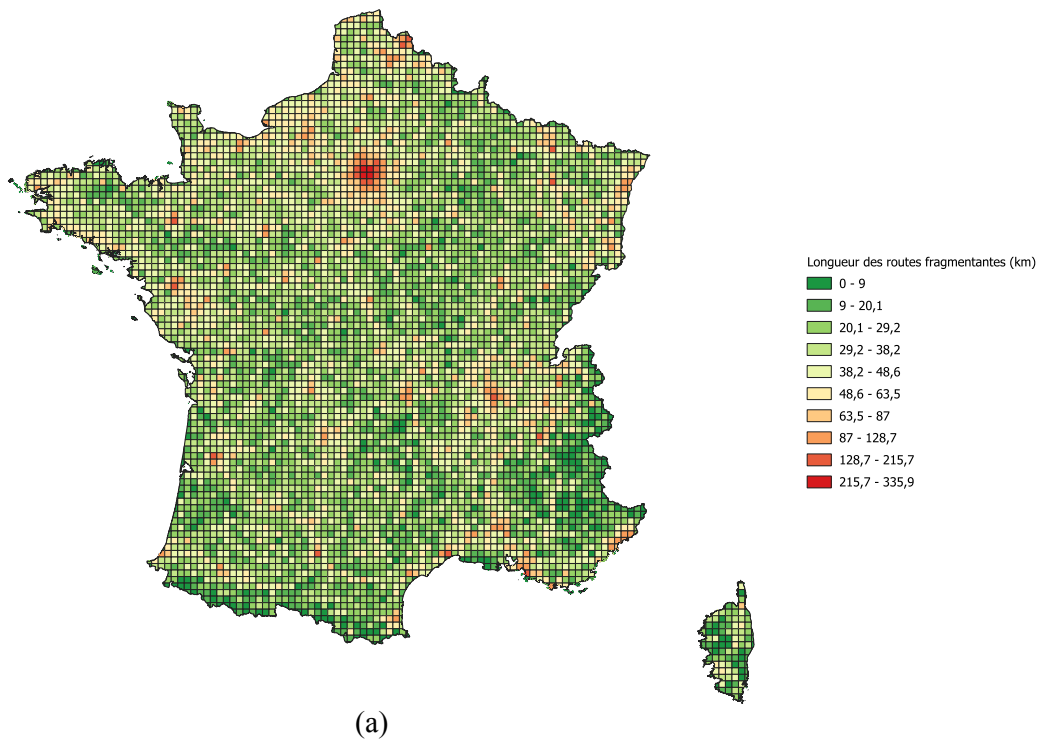


FIGURE A1 – Longueur (a) des routes fragmentantes et (b) des voies ferrées fragmentantes par maille en km. Les ruptures numériques correspondent aux ruptures naturelles de Jenks.

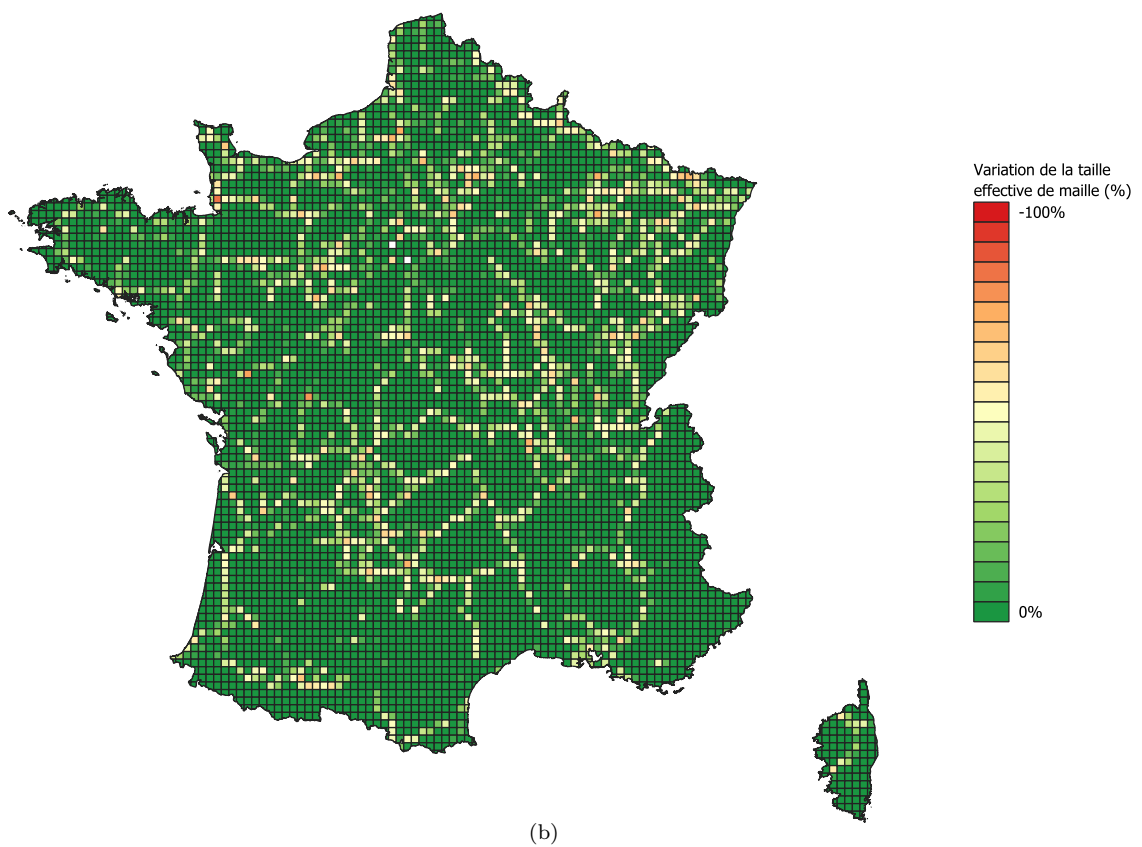
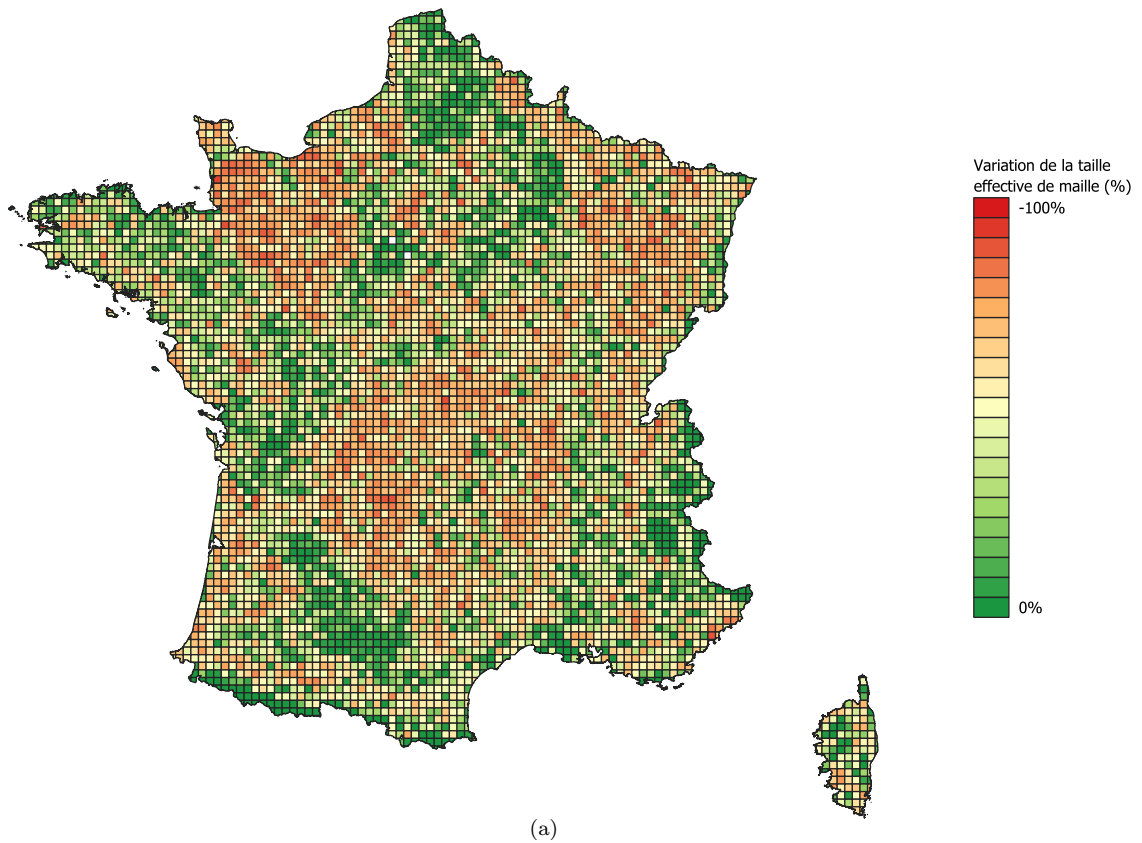


FIGURE A2 – Taux de variation de la taille effective de maille dû à la fragmentation (a) par les routes et (b) par les voies ferrées. Les deux pixels blancs indiquent une absence totale d'espaces naturels au sein de la maille.

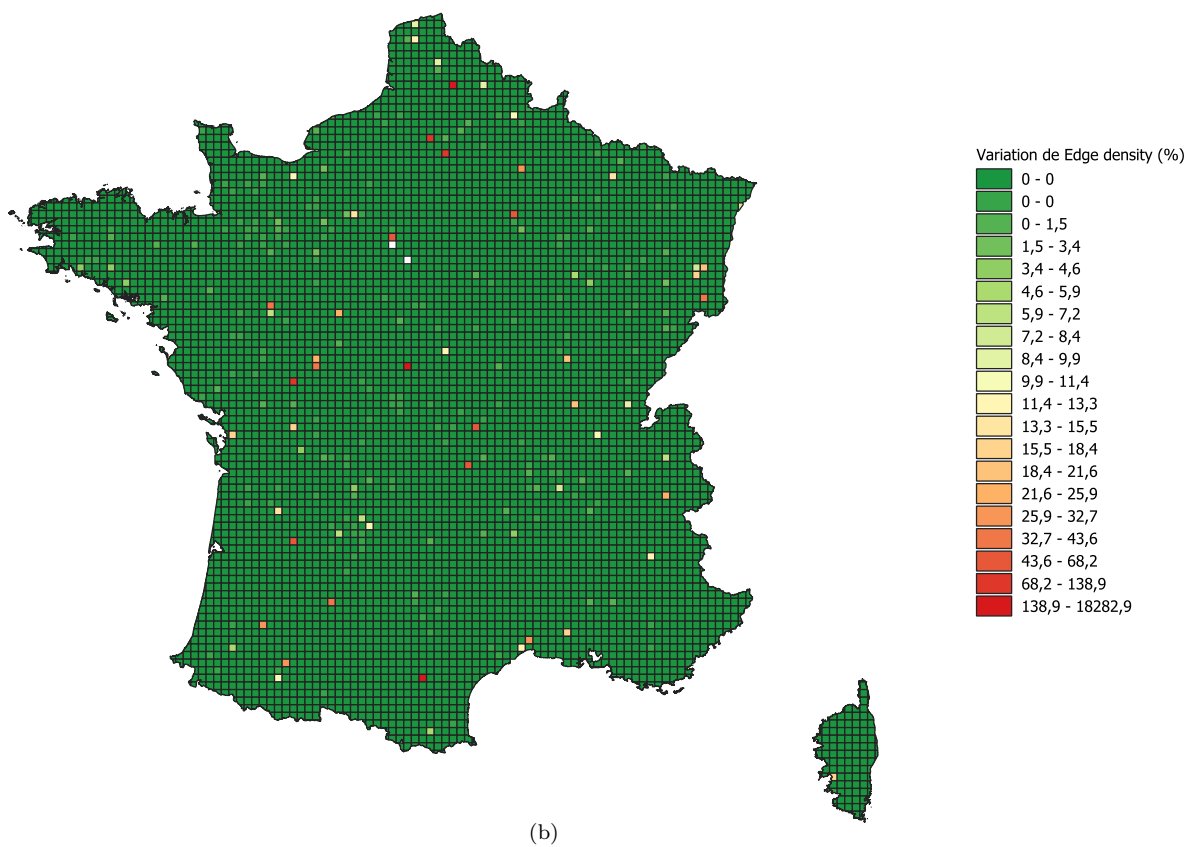
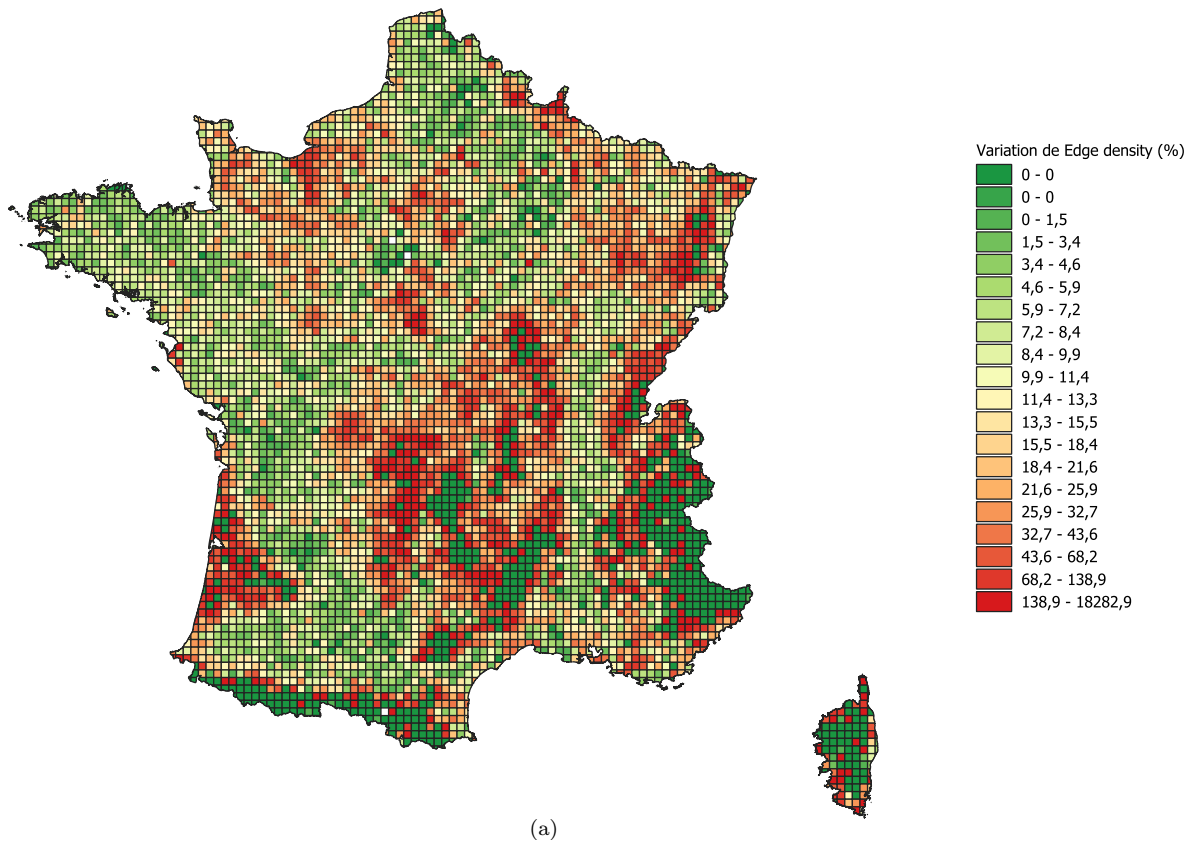


FIGURE A3 – Taux de variation de la *edge density* dû à la fragmentation (a) par les routes et (b) par les voies ferrées. Les ruptures représentent les vingtilles de la fragmentation par les routes. Les deux pixels blancs indiquent une absence totale d'espaces naturels au sein de la maille.

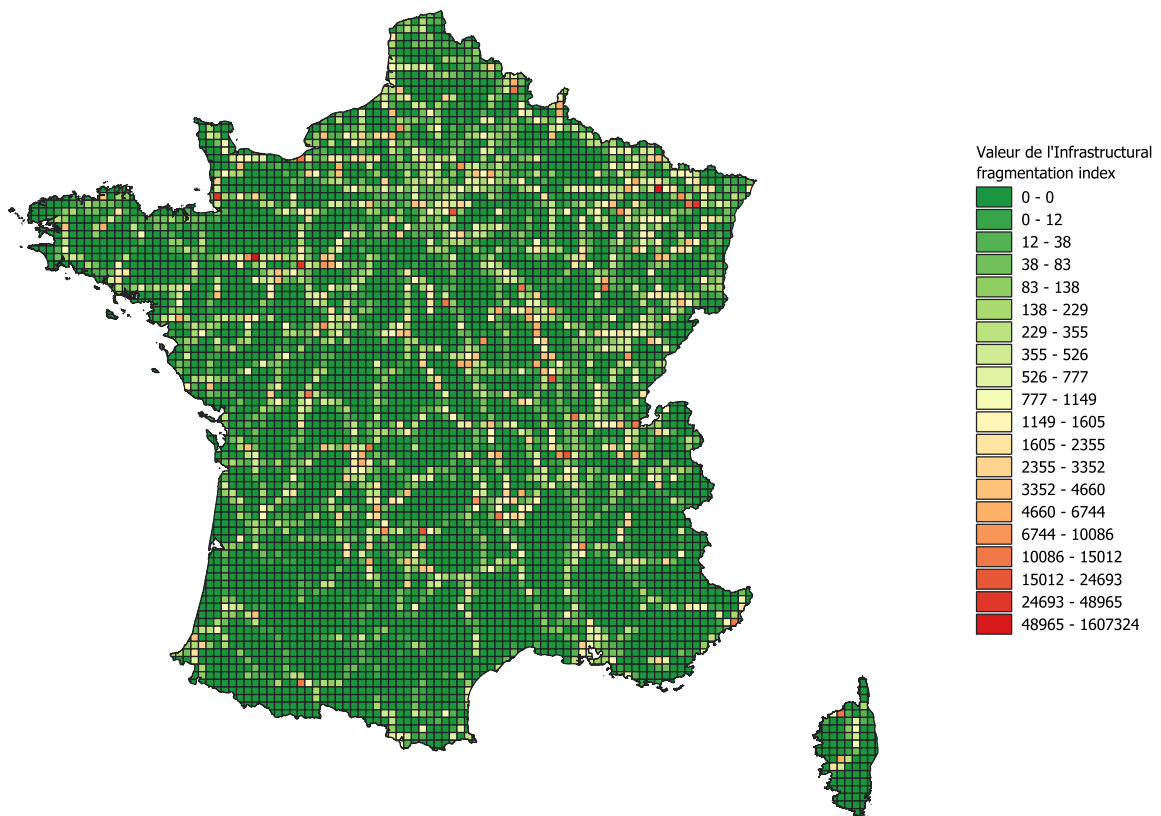
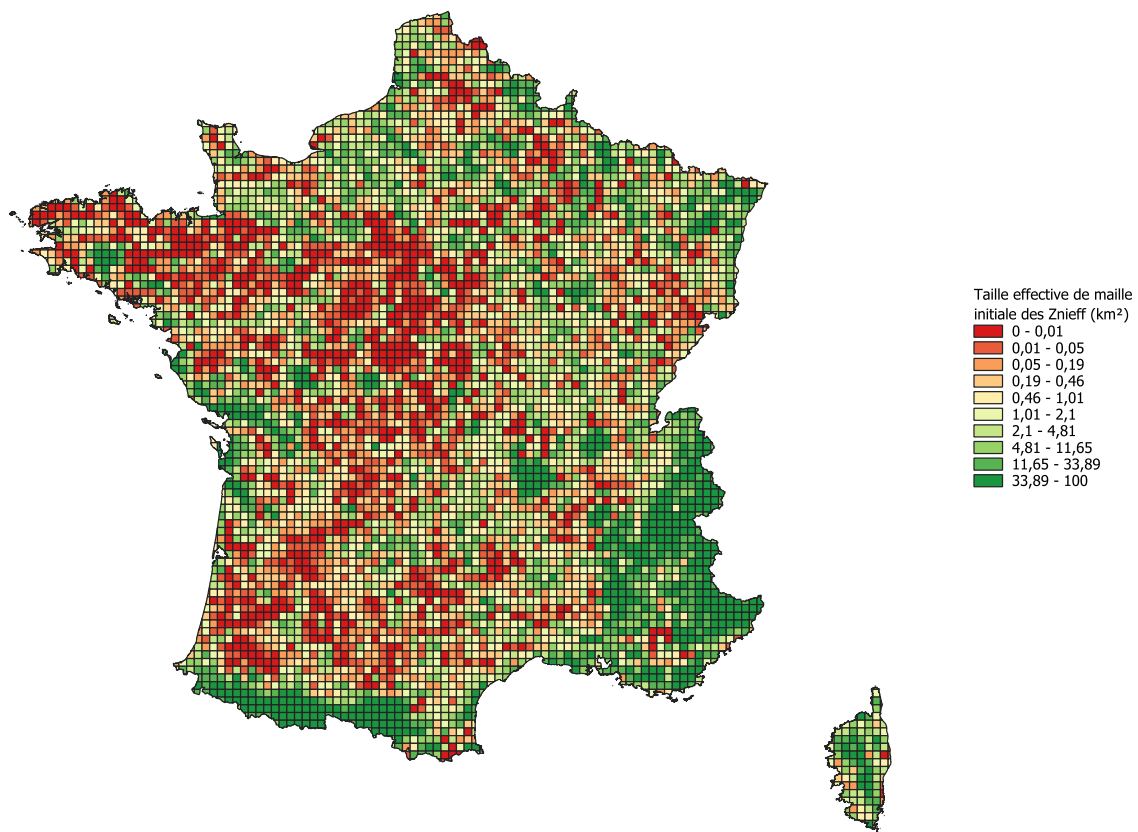
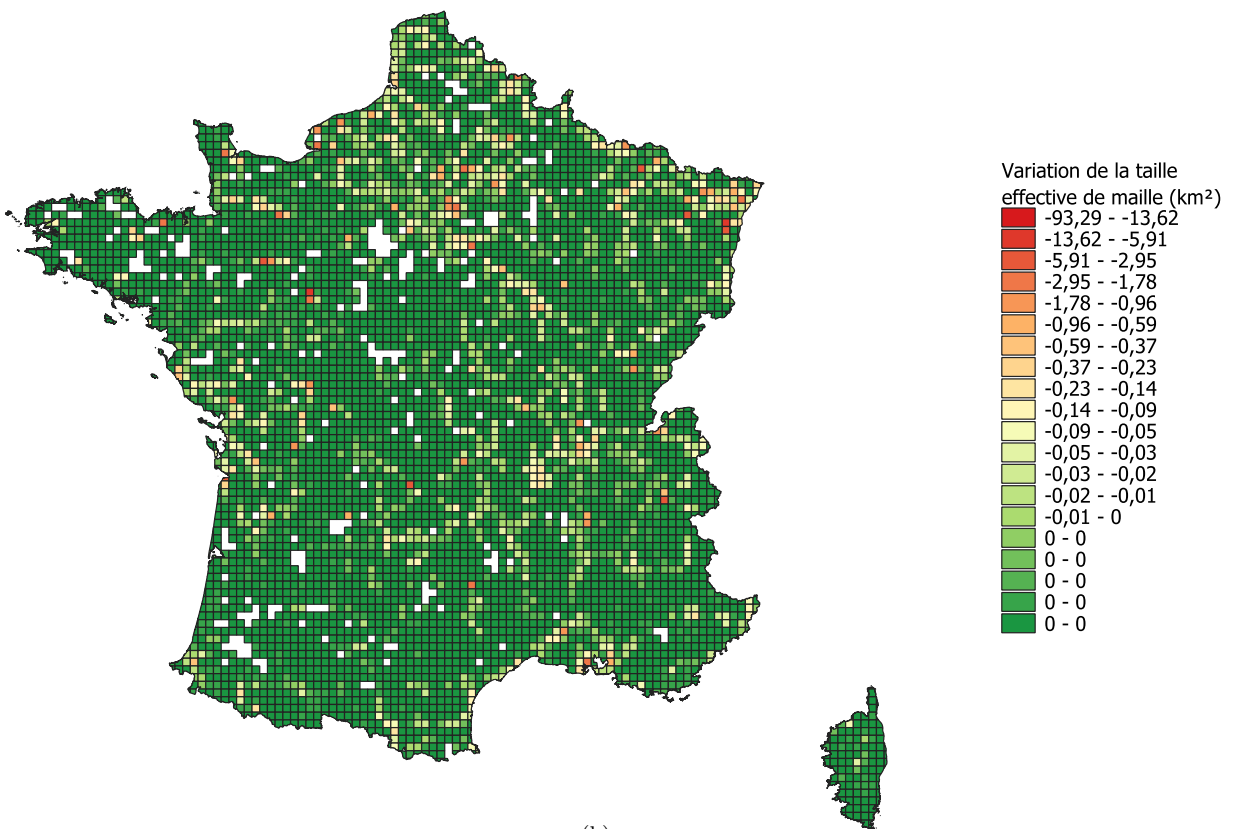


FIGURE A4 – Valeur de l'*Infrastructural fragmentation index* dû à la fragmentation par les voies ferrées. Les ruptures représentent les vingtiles de la fragmentation par les routes. L'*IFI* est un indicateur sans unité.

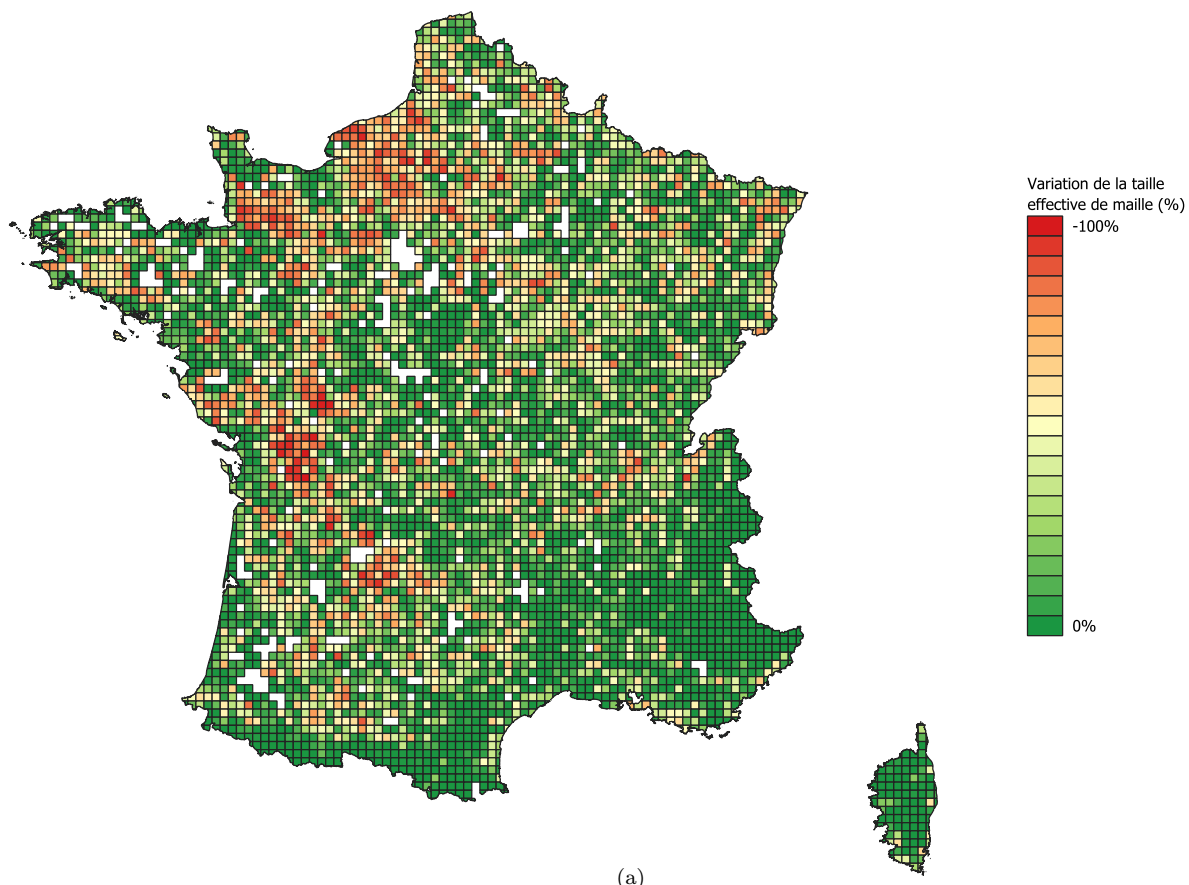


(a)

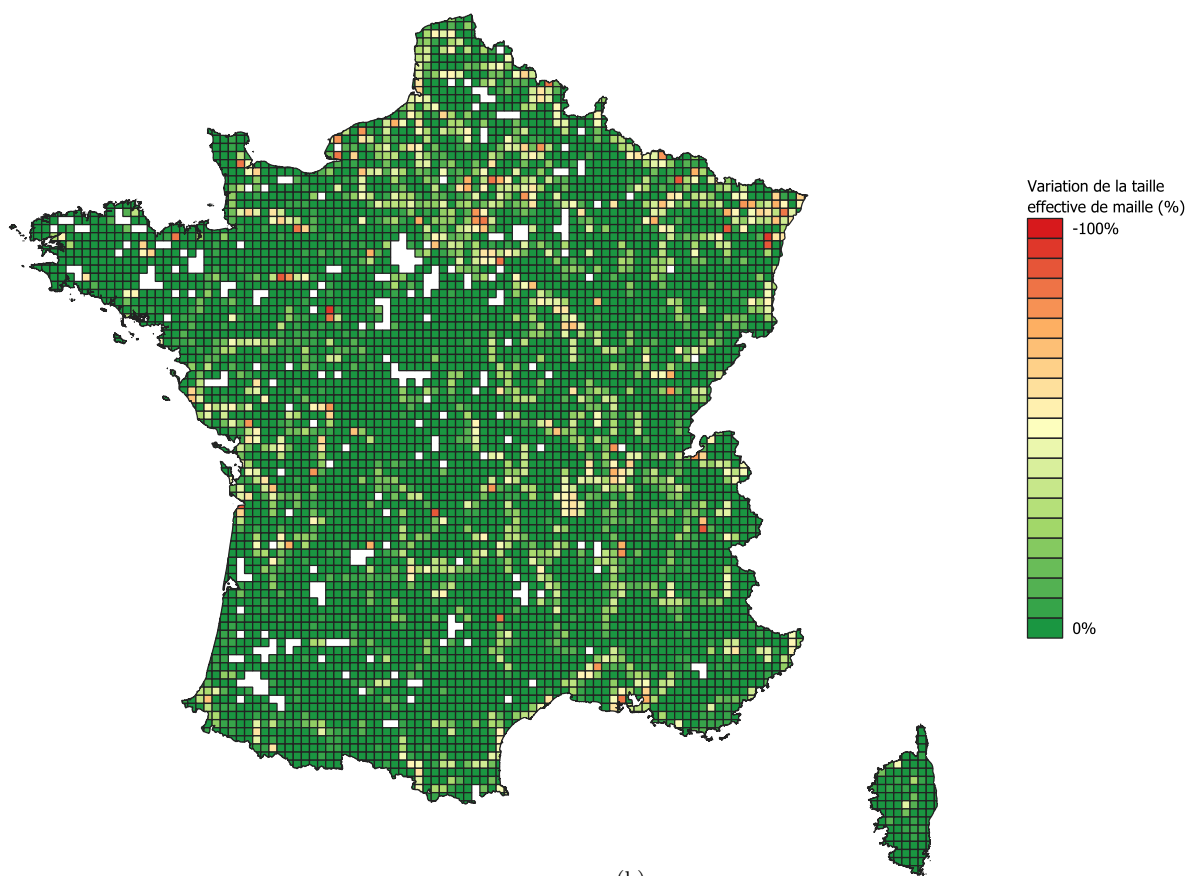


(b)

FIGURE A5 – (a) Taille effective de maille des Znieff en l’absence de fragmentation par les infrastructures de transport et (b) variation en valeur absolue de la taille effective de maille des Znieff due à la fragmentation par les voies ferrées. Les pixels mesurent 10x10km. Les ruptures numériques correspondent aux déciles de la taille effective de maille. Les pixels blancs dans la figure (b) indiquent une absence totale de zones classées en Znieff au sein de la maille.



(a)



(b)

FIGURE A6 – Taux de variation de la taille effective de maille des Znieff dû à la fragmentation (a) par les routes et (b) par les voies ferrées. Les ruptures représentent les vingtiles de la fragmentation par les routes. Les pixels blancs indiquent une absence totale de zones Znieff au sein de la maille.

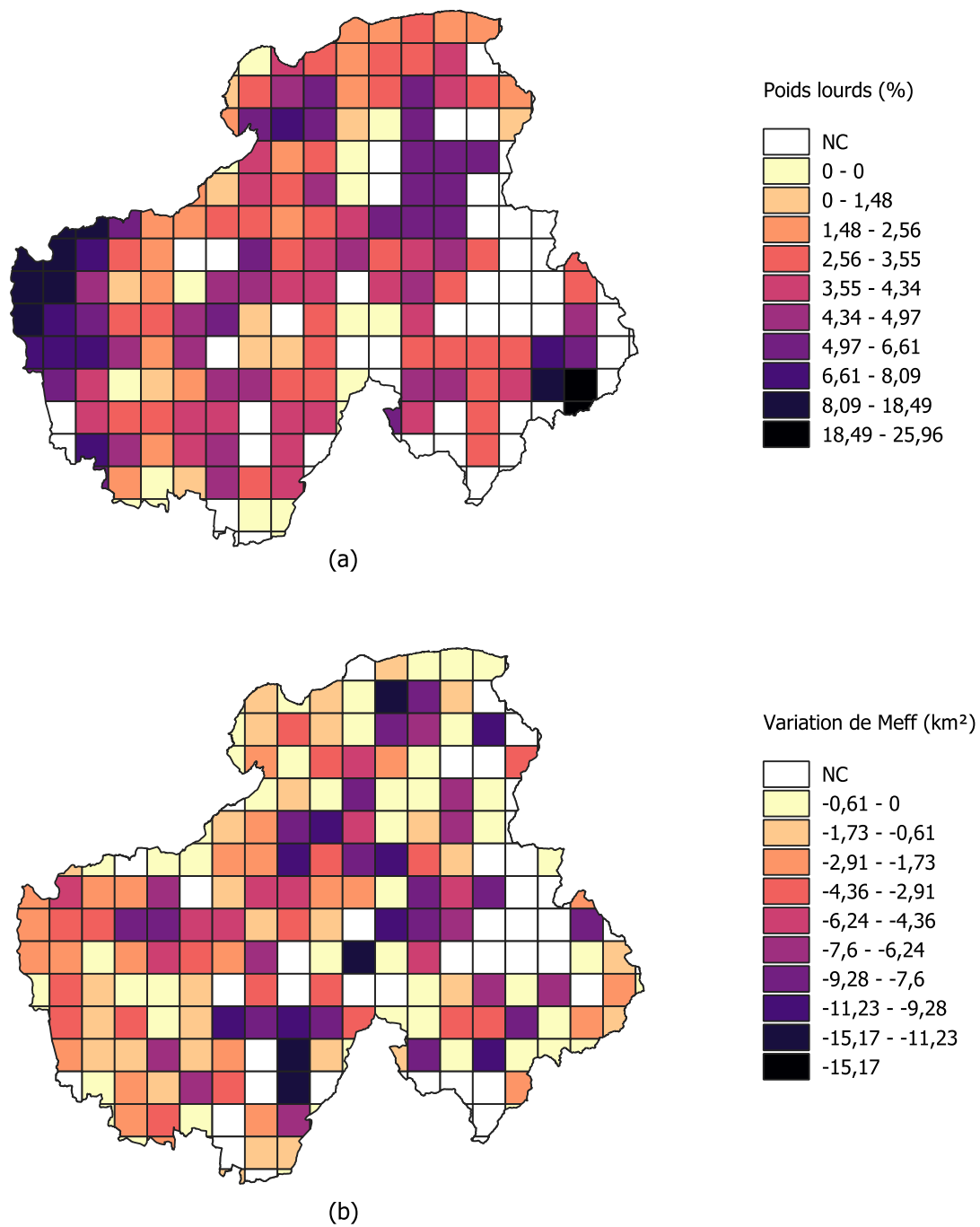
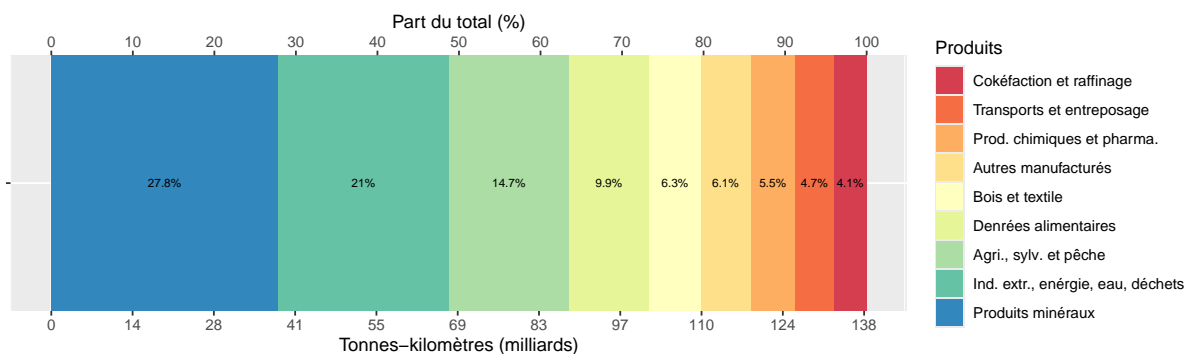


FIGURE A7 – (a) Pourcentage de poids lourds dans le trafic routier et (b) variation en valeur absolue de la taille effective de maille due à la fragmentation par les routes en Haute-Savoie. Les mailles mesurent 25km<sup>2</sup>. Les « NC » indiquent une absence de routes (a) ou une absence d'espaces naturels (b).

## A.1.2 Attribution des responsabilités

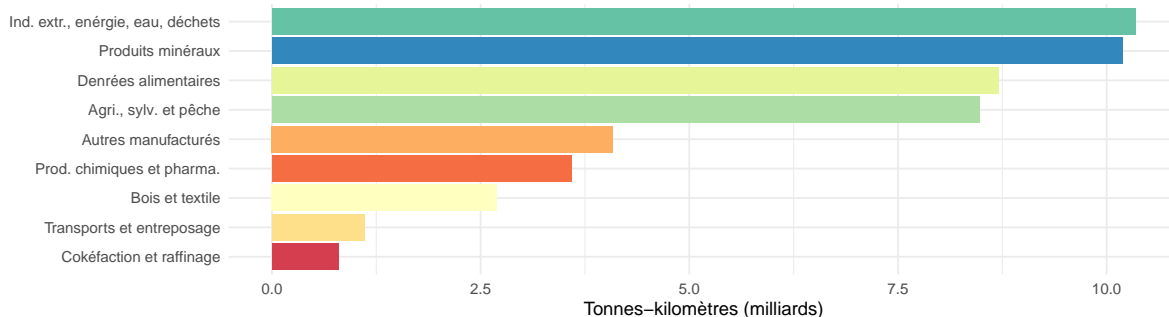
### Effets indirects liés à la consommation intermédiaire

La Figure A8 présente l'usage de transport routier de marchandises incorporé dans la consommation intermédiaire par produit, en tkm et en pourcentage. Par exemple, la consommation intermédiaire de Produits minéraux génère indirectement environ 37 milliards de tkm de fret routier. Dans le cadre d'une approche *consumption-based*, ces tkm sont soustraits de l'usage de transport des secteurs des Produits minéraux, et additionnés à l'usage de transport des secteurs utilisant de Produits minéraux dans leur processus de production, proportionnellement à leur consommation intermédiaire de Produits minéraux et à la demande finale adressée à ces secteurs. On voit ainsi que les Produits minéraux, les Industries extractives et l'Agriculture sont les trois principaux secteurs (ou groupes de secteurs) dont la consommation intermédiaire génère des usages de transport important (près de 90 milliards tkm). Au total, une moyenne annuelle de 138 milliards tkm (sur environ 222 milliards tkm de transport routier de marchandises) sont redistribués entre les secteurs via les effets indirects. Ce résultat indique l'importance de ce choix méthodologique dans l'attribution des responsabilités.



**FIGURE A8 – Volumes de transport routier incorporés dans la consommation intermédiaire des produits, en pourcentage des effets indirects totaux et en tonnes-kilomètres.** Les valeurs présentées sont des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Les biens de consommation intermédiaire sont agrégés en 9 produits au lieu de 13. « Produits minéraux » agrège « Produits minéraux non-métalliques » et « Produits métalliques ». « Textile et bois » agrège « Textile » et « Bois ». Enfin, « Autres manufacturés » agrège « Autres produits manufacturés », « Matériels de transport » et « Equipements électriques, informatiques et machines ». Exemple d'interprétation : La consommation intermédiaire de Produits minéraux génère environ 38 milliards de tkm, soit environ 27,8% de l'usage total de transports d'intrants.

### Volumes de transport routier induits par les exportations par produit



**FIGURE A9 – Volumes de transport routier international de produits français exportés.** Les valeurs présentées sont des moyennes annuelles entre 2010 et 2022 (hors 2014). Les secteurs sont agrégés pour former 9 catégories au lieu de 13. « Produits minéraux » agrège « Produits minéraux non-métalliques » et « Produits métalliques ». « Textile et bois » agrège « Textile » et « Bois ». Enfin, « Autres manufacturés » agrège « Autres produits manufacturés », « Matériels de transport » et « Equipements électriques, informatiques et machines ».

## A.2 Compléments de méthode

### A.2.1 Estimation de l’usage de matériaux par la longueur des infrastructures

#### Estimation du cycle de maintenance

Pour les routes, nous estimons le cycle de maintenance à partir du rapport de l’ONR (2025). Celui-ci rapporte que les couches de roulement du réseau routier national non concédé (autoroutes non concédées et nationales) sont renouvelées tous les 20 à 25 ans – nous retenons arbitrairement 20 ans. De plus, il rapporte l’âge moyen des couches de roulement des routes gérées par les départements, qui est de 13,8 ans. Nous estimons donc que les routes départementales et voies communales sont refaites tous les 14 ans en moyenne – ce qui peut être surestimé pour les voies communales.

Pour les voies ferrées, le cycle de maintenance est estimé à partir du rapport de l’ART (2025), qui reporte les durées de vie par type de voie et leur âge moyen. Nous utilisons l’âge moyen comme proxy du cycle de maintenance. Pour les 2 voies et 3 voies ou plus, nous utilisons l’âge moyen des voies relativement fréquemment utilisées (29 ans). Pour les voies uniques, nous utilisons l’âge moyen des voies les moins fréquentées (36 ans), considérant que ces voies uniques représentent de petites lignes. Enfin, pour les LGV, l’âge moyen est d’environ 19 ans.

#### Conversion des intensités matérielles en kg par mètre linéaire

Les intensités matérielles de la construction de routes est reportée en  $\text{kg}/\text{m}^2$  dans l’étude de AUGISEAU et KIM (2021). Nous souhaitons la convertir en  $\text{kg}/\text{m}$  pour pouvoir appliquer ces intensités aux données sur la longueur des infrastructures. Pour cela, nous appliquons ces intensités aux données spatiales de BD CARTO<sup>50</sup>. Cette base offre, entre autres, des variables concernant la largeur de la chaussée et le nombre de chaussées. Nous estimons l’aire de chaque tronçon de route avec ces variables et utilisons les intensités en  $\text{kg}/\text{m}^2$  appropriées. Nous obtenons ainsi une mesure des intensités moyennes par type

50. BD CARTO 5.0 France métropolitaine, version de mars 2025.

de route (en fonction du classement administratif : autoroutes, routes nationales, routes départementales et voies communales).

Nous calculons également, pour les routes et pour les voies ferrées, la longueur du réseau qui est en tunnel par type de voie. Nous utilisons ensuite cette proportion calculée pour estimer le stock de ciment et d'acier induit par la construction de tunnels. Nous obtenons une intensité en kg/m d'infrastructure qui est dépendante de la proportion de tunnels dans ce type d'infrastructures. Ainsi, les autoroutes et les voies ferrées sont fortement intensives en ciment et en acier pour les tunnels, là où les routes départementales et voies communales sont très faiblement intensives en ciment et acier du fait de la rareté et de la longueur relative des tunnels. Concernant la maintenance, nous supposons que le cycle de maintenance des tunnels est de la même longueur que celui des voies, à défaut d'une mesure plus appropriée.

Si l'on compare ces valeurs à celles issues de WIEDENHOFER, STEINBERGER et al. (2015), on obtient des intensités largement supérieures, en particulier pour les autoroutes et les routes nationales.

	Enrobé	Agrégats	Pit-run	Ciment	Acier (tunnel)	Acier (rail)	Bois
<b>Voies ferrées</b>							
1 voie	0	1350	0	668	23	120	135
2 voies	0	2700	0	668	23	240	270
3 voies ou plus	0	4050	0	668	23	360	405
Ligne grande vitesse	0	3600	0	1297	45	240	270
<b>Routes</b>							
Autoroute	19166	39929	57498	584	20	0	0
Route nationale	6692	14848	20067	100	3,56	0	0
Route départementale	2025	3536	5642	3,77	0,13	0	0
Voie communale	1457	1707	3682	3,33	0,12	0	0

TABLE A1 – Intensités matérielles pour le développement des infrastructures

	Enrobé	Agrégats	Acier (rail)	Bois	Maintenance
<b>Voies ferrées</b>					
1 voie	0	1350	120	135	36 ans
2 voies	0	2700	240	270	29 ans
3 voies ou plus	0	4050	360	405	29 ans
Ligne grande vitesse	0	3600	240	270	19 ans
<b>Routes</b>					
Autoroute	19166	0	0	0	20 ans
Route nationale	6693	0	0	0	20 ans
Route départementale	2025	0	0	0	14 ans
Voie communale	1457	0	0	0	14 ans

TABLE A2 – Intensités matérielles pour la maintenance des infrastructures et cycles de maintenance

## A.2.2 Les secteurs de la nomenclature NAF et les produits de la nomenclature NST

1	Produits de l'agriculture, de la chasse, de la forêt et de la pêche
2	Houille et lignite ; pétrole brut et gaz naturel
3	Minerais, tourbe et autres produits d'extraction
4	Produits alimentaires, boissons et tabac
5	Textiles, cuir et produits dérivés
6	Bois, pâte à papier, papier et produits de l'édition
7	Coke et produits pétroliers raffinés
8	Produits chimiques, caoutchouc, plastique et combustible nucléaire
9	Autres produits minéraux non métalliques
10	Métaux de base, produits métalliques
11	Machines et matériel n.c.a., produits des TIC et instruments de précision
12	Matériel de transport
13	Meubles ; autres produits manufacturés n.c.a.
14	Matières premières secondaires ; déchets
15	Courrier, colis
16	Équipement pour le transport de marchandises
17	Déménagements ; biens non marchands ; véhicules en réparation
18	Marchandises groupées
19	Marchandises non identifiables
20	Autres marchandises n.c.a.

**TABLE A3 – Noms des 20 types de produits de la Nomenclature Statistiques Transport (NST).**

AGRICULTURE, SYLVICULTURE ET PÊCHE	AZ
INDUSTRIES EXTRACTIVES	BZ
FABRICATION DE DENRÉES ALIMENTAIRES, DE BOISSONS ET DE PRODUITS À BASE DE TABAC	CA
FABRICATION DE TEXTILES, INDUSTRIES DE L'HABILLEMENT, INDUSTRIE DU CUIR ET DE LA CHAUSSURE	CB
TRAVAIL DU BOIS, INDUSTRIES DU PAPIER ET IMPRIMERIE	CC
COKÉFACTION ET RAFFINAGE	CD
INDUSTRIE CHIMIQUE	CE
INDUSTRIE PHARMACEUTIQUE	CF
FABRICATION DE PRODUITS EN CAOUTCHOUC, EN PLASTIQUE ET D'AUTRES PRODUITS MINÉRAUX NON MÉTALLIQUES	CG
MÉTALLURGIE ET FABRICATION DE PRODUITS MÉTALLIQUES, HORS MACHINES ET ÉQUIPEMENTS	CH
FABRICATION DE PRODUITS INFORMATIQUES, ÉLECTRONIQUES ET OPTIQUES	CI
FABRICATION D'ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES	CJ
FABRICATION DE MACHINES ET ÉQUIPEMENTS N.C.A.	CK
FABRICATION DE MATÉRIELS DE TRANSPORT	CL
AUTRES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES ; RÉPARATION ET INSTALLATION DE MACHINES ET D'ÉQUIPEMENTS	CM
PRODUCTION ET DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ, DE GAZ, DE VAPEUR ET D'AIR CONDITIONNÉ	DZ
PRODUCTION ET DISTRIBUTION D'EAU ; ASSAINISSEMENT, GESTION DES DÉCHETS ET DÉPOLLUTION	EZ
CONSTRUCTION	FZ
COMMERCE ; RÉPARATION D'AUTOMOBILES ET DE MOTOCYCLES	GZ
TRANSPORTS ET ENTREPOSAGE	HZ
HÉBERGEMENT ET RESTAURATION	IZ
ÉDITION, AUDIOVISUEL ET DIFFUSION	JA
TÉLÉCOMMUNICATIONS	JB
ACTIVITÉS INFORMATIQUES ET SERVICES D'INFORMATION	JC
ACTIVITÉS FINANCIÈRES ET D'ASSURANCE	KZ
ACTIVITÉS IMMOBILIÈRES	LZ
ACTIVITÉS JURIDIQUES, COMPTABLES, DE GESTION, D'ARCHITECTURE, D'INGÉNIERIE, DE CONTRÔLE ET D'ANALYSES TECHNIQUES	MA
RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT SCIENTIFIQUE	MB
AUTRES ACTIVITÉS SPÉCIALISÉES, SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	MC
ACTIVITÉS DE SERVICES ADMINISTRATIFS ET DE SOUTIEN	NZ
ADMINISTRATION PUBLIQUE ET DÉFENSE - SÉCURITÉ SOCIALE OBLIGATOIRE	OZ
ENSEIGNEMENT	PZ
ACTIVITÉS POUR LA SANTÉ HUMAINE	QA
HÉBERGEMENT MÉDICO-SOCIAL ET SOCIAL ET ACTION SOCIALE SANS HÉBERGEMENT	QB
ARTS, SPECTACLES ET ACTIVITÉS RÉCRÉATIVES	RZ
AUTRES ACTIVITÉS DE SERVICES	SZ
ACTIVITÉS DES MÉNAGES EN TANT QU'EMPLOYEURS ; ACTIVITÉS INDIFFÉRENCIÉES DES MÉNAGES EN TANT QUE PRODUCTEURS DE BIENS ET SERVICES POUR USAGE PROPRE	TZ

TABLE A4 – Noms et codes des secteurs des comptes nationaux français au niveau 38 branches.

## Table de correspondance entre NST et TES

La Table A5 présente la table de correspondance initiale  $\tilde{G}$  entre les produits de la nomenclature NST (en ligne) et les secteurs du TES. Le critère d’attribution d’un produit à un secteur du TES est que ce secteur soit à l’origine de l’expédition du produit. Pour la plupart des produits du TES – ceux qui correspondent explicitement à la production d’un type de biens par un secteur –, l’allocation est intuitive. Ainsi, c’est le secteur Agriculture, sylviculture et pêche qui est expéditeur des Produits de l’agriculture, de la chasse, de la forêt et de la pêche. D’autres produits sont moins intuitifs. Par exemple, le produit « Déménagements ; Biens non marchands ; Véhicules en réparation » est attribué au secteur Transports et entreposage (HZ) car cet usage de transports correspond à l’activité économique des entreprises spécialisées appartenant au secteur de transports. En omettant les marchandises de type 18 et 19, certains secteurs se voient attribuer plusieurs types de produits, comme les Industries extractives ou la Fabrication de produits en caoutchouc, en plastique et d’autres produits minéraux non métalliques. Les Marchandises groupées (code 18) et Marchandises non identifiées (Code 19) sont inobservés. Notre parti pris est donc de les attribuer à l’ensemble des secteurs producteurs de biens (AZ à CM). Cette table n’est pas la table finale puisque nous imposons une contrainte qui est que, pour chaque ligne, la somme des colonnes doit valoir 1. Cette transformation est expliquée en Méthode.

	AZ	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	DZ	EZ	FZ	GZ	HZ	IZ-TZ
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

TABLE A5 – **Table de correspondance entre les 20 produits de la nomenclature NST et les 37 secteurs du TES.** Les codes correspondent aux noms présentés dans les deux tables précédentes. Les secteurs IZ à TZ sont agrégés dans une seule et même colonne associée au vecteur nul car tous les coefficients associés à leurs colonnes sont nuls.

### A.2.3 Modèle input-output

#### Recalibration des valeurs des données de transport par produit d’Eurostat

Les séries temporelles d’Eurostat sur le transport routier par produit et par couple origine-destination présentent de grandes disparités par rapport aux séries d’Eurostat et du SDES sur le transport routier total par couple origine-destination. Les valeurs totales par pays sont bien plus faibles dans la première série que dans la seconde. Cela indique

qu'on ignore la composition d'une partie importante des cargaisons transportées entre les pays. Pour pallier cela, nous recalibrons les données issues de la première série sur les valeurs totales par pays de la seconde. En pratique, nous calculons au sein de chaque pays la part que représente chaque produit dans les exportations annuelles vers la France et dans les importations annuelles depuis la France. Ensuite, nous multiplions cette proportion par la valeur totale en tonnes-kilomètres des exportations vers la France et des importations depuis la France (respectivement) issue de la deuxième série. De cette sorte, nous obtenons une nouvelle série avec des tonnes-kilomètres par produit, dont la valeur totale par pays est égale à celle de la deuxième série.

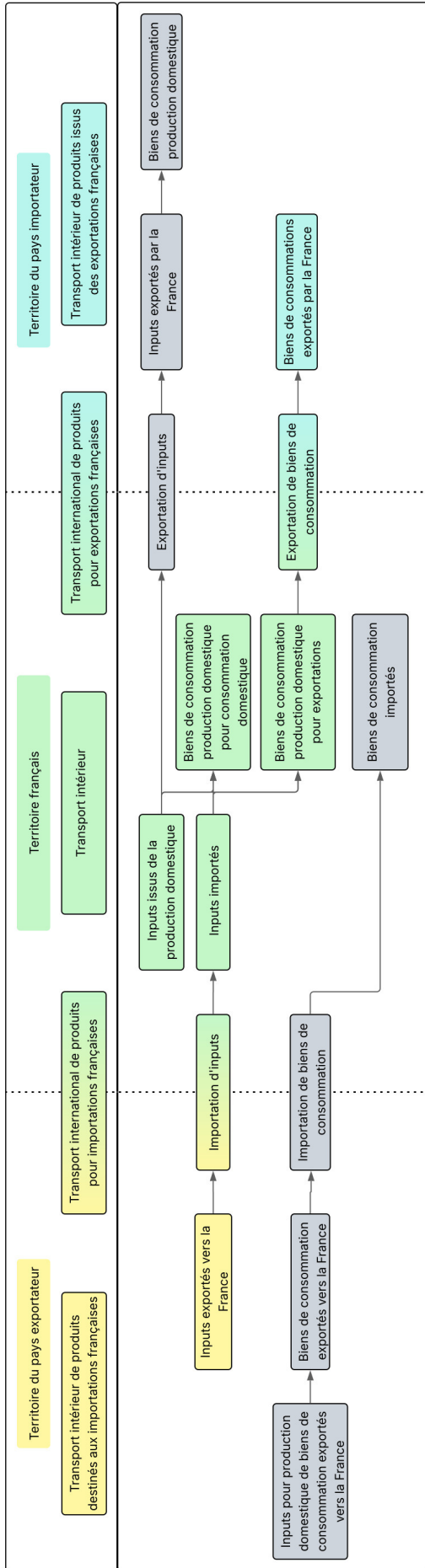
### **Agrégations et retranchements de certaines composantes du TES**

Nous retranchons de la demande finale ( $\mathbf{y}^{\text{DOM}}$  et  $\mathbf{y}^{\text{IM}}$ ) la variation des stocks et l'acquisition moins cession d'objets de valeur. La première pose des problèmes méthodologiques d'allocation car ses valeurs sont parfois négatives, ce qui conduirait à attribuer des valeurs négatives de volumes de marchandises transportés à ces secteurs pour ce type d'emploi final. La seconde est nulle pour presque tous les secteurs, et négligeable pour les secteurs où elle est non-nulle.

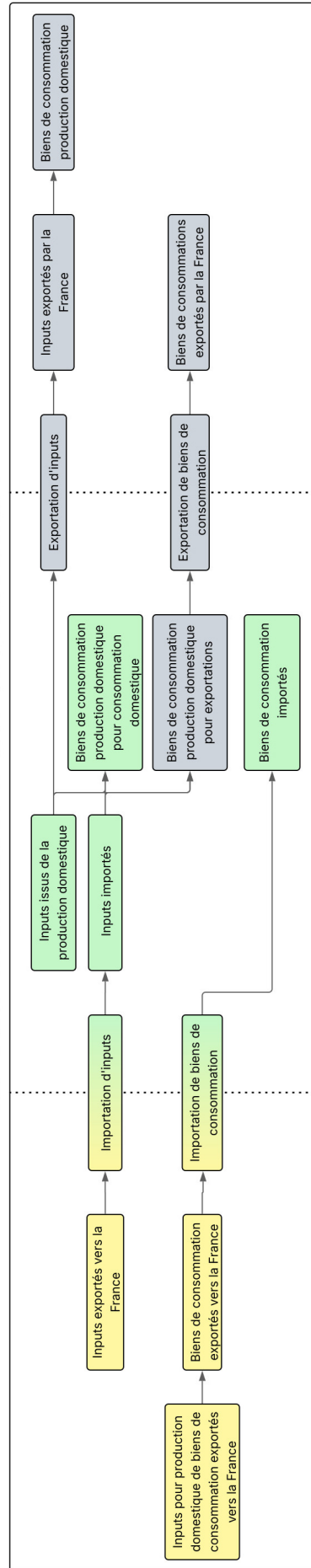
Nous utilisons ensuite la ventilation de la demande finale entre les différents emplois finals pour présenter les résultats en fonction des secteurs institutionnels. Cette ventilation apparaît dans les matrices  $\mathbf{Y}^{\text{DOM}}$  et  $\mathbf{Y}^{\text{IM}}$  de dimension  $37 \times 7$ , où chaque colonne correspond à un emploi final. Pour être cohérent avec la demande finale totale, nous supprimons les colonnes correspondant à la variation des stocks et aux objets de valeur. De plus, la consommation des institutions sans but lucratif au service des ménages (ISBLSM) étant très faible et nulle pour la plupart des produits, nous agrégeons la consommation des ISBLSM avec la consommation des ménages pour simplifier la présentation des résultats – et nous supprimons donc la colonne correspondante. Pour ventiler la FBCF par secteur institutionnel, nous utilisons les données du TES au prix d'acquisition qui fournit ces informations.

### **Contours des usages de transport attribués aux unités françaises selon la perspective**

## ATTRIBUTION BASEE SUR L'EXPEDITEUR



## ATTRIBUTION BASEE SUR LE DESTINATAIRE



**FIGURE A10 – Usage de transports attribué aux unités françaises, dans une perspective expéditeur et dans une perspective destinataire.** Pour chacun des deux cadres conceptuels d’attribution, les cases colorées correspondent aux usages de transport attribués aux unités françaises, et les grisées correspondent aux usages de transport attribués aux unités étrangères.

#### A.2.4 Méthode de conversion des véhicules-kilomètres et voyageurs-kilomètres en tonnes-kilomètres

La conversion des véhicules-kilomètres en tonnes-kilomètres implique d'estimer un poids unitaire des véhicules, et de multiplier ce poids unitaire par les véhicules-kilomètres. De même, la conversion des voyageurs-kilomètres se calcule comme le produit du poids unitaire des voyageurs et des voyageurs-kilomètres. Disposant des données sur les tonnes-kilomètres, voyageurs-kilomètres et véhicules-kilomètres dans le Bilan annuel des transports, la difficulté méthodologique réside ici dans l'estimation du poids unitaire des véhicules et des voyageurs.

Nous estimons le poids des véhicules par type de véhicule, suivant la classification par type disponible dans les données des véhicules-kilomètres : voitures particulières, véhicules utilitaires légers, autobus et autocars, motocycles, poids lourds. Nos données couvrent la période 2012-2022. Pour les voitures particulières, nous disposons de données officielles sur le poids moyen annuel des voitures du parc français (DIDOU 2023). Pour les autres types de véhicules, cela doit être estimé. Le poids moyen des véhicules utilitaires légers (VUL) est estimé à partir d'un document de l'Union européenne qui donne un poids à vide moyen de 1875kg en 2019, 2020 et 2021<sup>51</sup>. Aucune donnée officielle n'est disponible concernant les autres types de véhicules. Nous effectuons donc des estimations jugées raisonnables fondées sur le croisement de multiples sources sur internet : poids moyen de 10t pour les poids lourds, 200kg pour les motocycles, et 12375kg pour les autobus et autocars. Cette estimation se base sur un poids moyen de 10,5t pour les autobus, 13t pour les autocars, et les pondère respectivement par 0,25 et 0,75 en utilisant les données sur le parc automobile français pour les transports en communs, les autobus et autocars représentant respectivement 1/4 et 3/4 des véhicules-kilomètres parcourus (SDES 2024b). Nous attribuons ensuite chaque type de véhicule à son usage (transport de marchandises ou de voyageurs). Les VUL ont un statut ambigu car ils servent à la fois au transport de marchandises et au transport de voyageurs. Nous utilisons là aussi les données sur le parc automobile français, qui reportent séparément les véhicules-kilomètres associés aux VUL à usage personnel et ceux associés aux VUL à usage professionnel. Nous utilisons cette décomposition de manière schématique, en attribuant au transport de voyageurs les vkm associés aux VUL à usage personnel, et au transport de marchandises les autres. Cela induit un biais puisque les VUL à usage professionnel peuvent être également utilisés à des fins personnelles dans certains cas.

Ensuite, nous estimons le poids des voyageurs en nous basant sur ce qu'on peut appeler un passager moyen. Ce passager moyen est basé sur l'utilisation des transports par catégorie d'âge et par genre (SDES 2019), que l'on croise avec des données sur le poids moyen par catégorie d'âge et par genre<sup>52</sup>. Cela est sujet à un certain nombre de limites. L'enquête datant de 2006-2007 n'est plus forcément représentative de la société française, et il existe un décalage entre les catégories d'âge utilisées dans l'Enquête mobilité des personnes et celles utilisées dans cette enquête. Nous prenons, pour chaque catégorie d'âge de

---

51. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:32023R2502>

52. Les données anthropométriques issues de l'Etude nationale nutrition santé (2006-2007) ont été publiées pour la population enfants via ce lien : <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/enns-etude-nationale-nutrition-sante/anthropometrie-enfants-tableaux-de-distribution-enns> et pour la population adultes via ce lien : <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/enns-etude-nationale-nutrition-sante/anthropometrie-adultes-tableaux-de-distribution-enns>.

l'Enquête mobilité des personnes, le poids moyen associé à la catégorie d'âge ayant la plus grande intersection. Notre méthode revient à faire une moyenne pondérée du poids des voyageurs en fonction des voyageurs-kilomètres par catégorie d'âge et par genre (issus des données Mobilité des personnes). Nous estimons un passager moyen de 70kg, soit 0,07t.

Nous appliquons enfin la formule présentée en méthode pour calculer (1) les tonnes-kilomètres associés au transport de marchandises comme somme des tkm de marchandises transportées et tkm associés au poids des véhicules utilisés pour le transport de marchandises ; et (2) les tonnes-kilomètres associés au transport de voyageurs comme somme des tkm de voyageurs transportés et tkm associés au poids des véhicules utilisés pour le transport de voyageurs.