

TGV Lyria

Comparaison écologique entre différents moyens de transport pour une sélection de trajets

Rapport final
Zurich, le 5 mars 2021

Cuno Bieler, Daniel Sutter

Mentions légales

Comparaison écologique entre différents moyens de transport pour une sélection de trajets

Rapport final

Zurich, le 5 mars 2021

Ecological comparison of transport modes_TGVLyria_210305_f.docx

TGV Lyria

Pascal Sommer, Valentine Achi, TGV Lyria

Cuno Bieler, Daniel Sutter

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zurich

Tél. +41 44 205 95 95

zuerich@infras.ch

Contenu

Sommaire	4
1. Position initiale et objectif	8
2. Démarche méthodologique	9
2.1. Concept	9
2.2. Démarche méthodologique	9
3. Résultats	19
3.1. Empreinte climatique	19
3.2. Bilan énergétique final	27
3.3. Coûts environnementaux et des accidents	33
3.4. Temps de trajet et temps de travail	40
4. Conclusions	44
Annexe	46
Empreintes climatiques pour chaque trajet	46
Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval	49
Bilan énergétique final pour chaque trajet	51
Coûts environnementaux et des accidents pour chaque trajet	53
Proportions pour les différentes catégories de coûts	55
Bibliographie	57

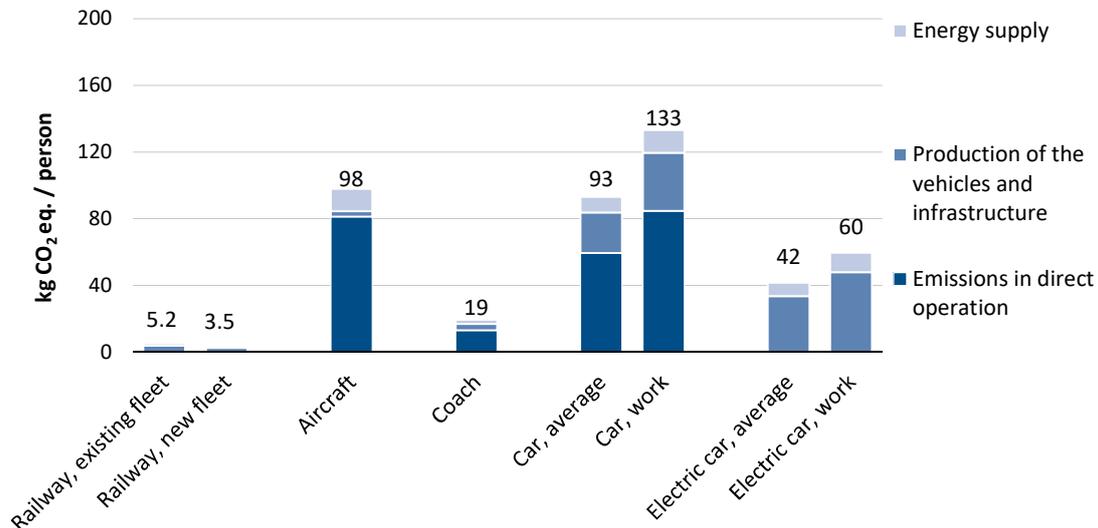
Sommaire

Cette étude inclut une comparaison écologique entre différents moyens de transport sur cinq trajets transnationaux entre la Suisse et la France. INFRAS a réalisé cette comparaison entre plusieurs moyens de transport pour le compte de TGV Lyria, en s'appuyant sur les découvertes et les connaissances scientifiques actuelles. Elle est compatible avec la norme SN EN 16258 «Méthodologie pour le calcul et la déclaration de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) des prestations de transport (fret et passagers)».

Tous les trajets observés sont également desservis par TGV Lyria. Le rail, et plus particulièrement le TGV, est comparé aux autres moyens de transport: le car, la voiture et l'avion. Concernant la voiture, une différence est faite entre moteur électrique et moteur classique (essence ou diesel). L'étude compare les différents moyens de transport à plusieurs niveaux: l'empreinte climatique, le bilan énergétique final, les coûts environnementaux et des accidents, mais aussi le temps de trajet, y compris la durée utilisable pour travailler. Dans un deuxième temps, le parcours qui précède et qui suit l'utilisation du moyen de transport, c'est-à-dire le trajet jusqu'à et depuis la gare ou l'aéroport, est pris en compte dans tous les cas. Les résultats démontrent toutefois que le trajet principal est clairement celui ayant l'impact le plus conséquent, l'impact climatique et environnemental du parcours qui précède et qui suit n'étant que d'une pertinence secondaire. Dans le cas de la voiture, le calcul prend en compte aussi à chaque fois un trajet avec un taux d'occupation faible (1,12 personne par véhicule, conformément aux statistiques pour les voyages d'affaires et par rapport au taux d'occupation moyen de 1,6 personne par véhicule pour les trajets en voiture en général).

La figure 1 montre par exemple l'**empreinte climatique** des différents moyens de transport pour un trajet Genève–Paris.

Figure 1: Empreinte climatique pour un trajet Genève-Paris: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport



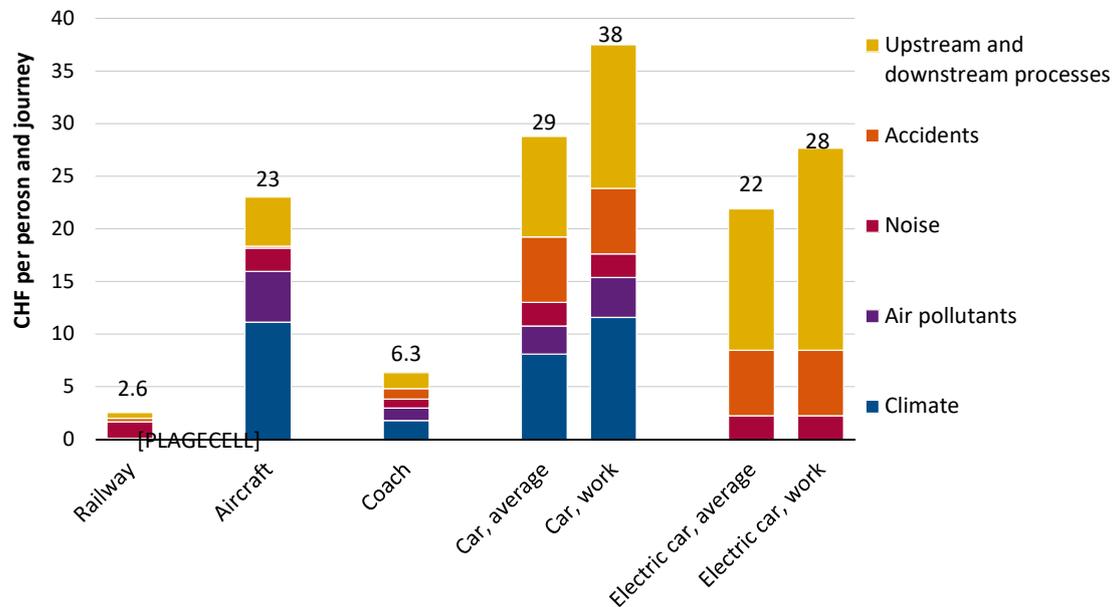
Graphique INFRAS

Après comparaison de l’empreinte climatique, on observe que le rail (TGV) est de loin le moyen de transport qui émet le moins de CO₂ par personne et par trajet. Pour un trajet Genève–Paris (en fonction de l’ancienne ou de la nouvelle flotte), les émissions de gaz à effet de serre par personne sont environ 4 à 6 fois plus faibles en TGV qu’en car, environ 8 à 12 fois plus faibles qu’en voiture électrique moyenne, 18 à 28 fois plus faibles qu’en voiture traditionnelle moyenne, et 19 à 28 fois plus faibles qu’en avion. Du point de vue de la protection du climat, un voyage en TGV est le plus avantageux pour les trajets sur lesquels l’étude a reposé. Il convient ici de noter que les modes de transport à propulsion électrique TGV et e-car ne produisent pas d’émissions directes pendant leur fonctionnement et qu’ils ne produisent que de très faibles émissions pendant la production d’énergie (électricité). La plupart des émissions de ces deux modes de transport provient de la fabrication de l’infrastructure et des véhicules¹.

Les conséquences environnementales, comme les émissions de gaz à effet de serre, engendrent des coûts qui ne sont pas à la charge du pollueur mais de la société dans son ensemble. Dénommés coûts externes ou **coûts environnementaux et coûts des accidents**, ils sont également calculés et comparés pour les trajets avec les différents moyens de transport. La figure 2, par exemple, montre les résultats obtenus pour le trajet Genève–Paris.

¹ Souvent, les comparaisons écologiques des modes de transport ne prennent en compte que les paramètres exigés par la norme SN EN 16258 (exploitation directe et production d’énergie), ce qui explique que les émissions de CO₂ d’un voyage en train sont de 70 à 100 fois inférieures à celles d’un vol sur le même trajet.

Figure 2: Coûts environnementaux et des accidents pour chaque moyen de transport pour le trajet Genève-Paris, par personne et par trajet



Graphique INFRAS

Les résultats montrent qu'en matière de coûts environnementaux ainsi que des accidents, les trajets en TGV Lyria sont ceux qui engendrent les conséquences les plus faibles par personne et par trajet. Cela s'explique principalement par les coûts directs très faibles du TGV en lien avec le climat, les polluants atmosphériques et les accidents, alors que ces catégories sont les plus significatives pour les autres moyens de transport. Les coûts environnementaux et des accidents du car sont environ deux fois et demie plus élevés que ceux du TGV, ceux de la voiture électrique et de l'avion sont presque 8 fois supérieurs, alors que ceux de la voiture traditionnelle sont approximativement 11 fois plus importants.

Au niveau de la **comparaison globale** entre les trajets pour le trafic grandes lignes considérés, le rail, c'est-à-dire TGV Lyria, occupe la première place dans tous les domaines et pour tous les trajets. Le TGV est clairement en tête, aussi bien pour l'empreinte climatique que pour les coûts environnementaux et des accidents. En matière d'environnement, le moyen de transport le plus proche du train est toutefois le car, bien que ses émissions de gaz à effet de serre et ses coûts environnementaux soient nettement supérieurs. L'empreinte climatique et environnementale de la voiture et de l'avion est bien moins bonne que celle du train (TGV Lyria). De fait, la voiture électrique affiche une meilleure empreinte climatique et des coûts environnementaux plus bas que la voiture essence ou diesel. Pour autant, l'empreinte climatique et les coûts environnementaux de la voiture électrique pour les trajets qui ont fait l'objet de l'étude restent supérieurs à ceux du TGV. Le train reste donc bien plus avantageux

pour l'environnement que la voiture pour le trafic à grande distance, et ce malgré l'avancée de l'électrification de la voiture. L'avantage du train par rapport à l'avion est tout aussi significatif.

1. Position initiale et objectif

La comparaison de l'impact écologique des différents moyens de transport pour des voyages longue distance prend toute son importance dans le cadre des débats sur le climat. Le point décisif ici est l'empreinte climatique de chacun des moyens de transport. Outre son impact sur le climat, le trafic entraîne un large éventail d'autres conséquences néfastes pour l'environnement (émissions de polluants, nuisances sonores, accidents, etc.). Ces conséquences néfastes engendrent à leur tour des coûts économiques, dénommés coûts externes ou coûts environnementaux.

En Suisse comme à l'étranger, de nombreuses études comparent l'impact climatique, d'autres conséquences environnementales ainsi que les coûts environnementaux externes des différents moyens de transport les uns par rapport aux autres. Pourtant, la majorité des études se concentrent sur l'effet général pour un pays (le volume total d'émissions de gaz à effet de serre ou les coûts environnementaux totaux, par exemple) ou sur l'impact moyen pour un pays dans son ensemble (les conséquences d'un voyageur-kilomètre moyen en Suisse, par exemple). Des chiffres établis suite à la comparaison entre plusieurs moyens de transport pour des trajets spécifiques (Zurich–Paris par exemple) n'ont été que très rarement disponibles jusqu'à aujourd'hui. Certains outils permettent d'effectuer de telles comparaisons mais les coûts environnementaux, par exemple, ne sont pas pris en compte et les bases utilisées pour les calculs ne sont généralement pas ajustées à l'itinéraire spécifique (il n'existe notamment pas de données pour le TGV).

Dans le cadre de cette étude, une comparaison a donc été engagée entre différents moyens de transport pour des trajets desservis par le TGV Lyria. Cette comparaison inclut les paramètres suivants:

- empreinte climatique (émissions de gaz à effet de serre, «bilan CO₂»)
- bilan énergétique
- coûts environnementaux et des accidents
- utilisation du temps (temps de trajet utilisable de manière productive)

Cette étude s'appuie sur les découvertes et les connaissances scientifiques les plus récentes en matière d'émissions climatiques, de coûts environnementaux, etc. Ses résultats constituent une base pour les communications futures cherchant à comparer différents moyens de transport pour des itinéraires spécifiques à TGV Lyria.

2. Démarche méthodologique

2.1. Concept

Le concept s'appuie sur une comparaison entre différents moyens de transport, pour un même trajet, c'est-à-dire sur la comparaison de l'empreinte écologique des moyens de transport choisis pour cinq itinéraires identiques (d'une part, pour le trajet du moyen de transport principal, et, d'autre part, pour les parcours de porte à porte). Les éléments faisant l'objet de la comparaison sont l'empreinte climatique (émissions de gaz à effet de serre), le bilan énergétique et les coûts environnementaux et des accidents. Une évaluation des différences en matière d'utilisation du temps (sur la base du temps de trajet utilisable de manière productive) pour chaque moyen de transport vient compléter les conséquences environnementales. Tous les calculs s'entendent par personne et par trajet (trajet aller uniquement).

2.2. Démarche méthodologique

Limites du système

L'année de référence pour les calculs effectués lors de cette comparaison écologique entre les moyens de transport est 2019. Si cette donnée n'a pas d'influence significative sur les principes de base tels que le temps de trajet et les distances parcourues, les facteurs d'émissions et les taux appliqués aux coûts dépendent de l'année concernée. Les facteurs d'émissions sont liés aux avancées technologiques (émissions d'oxydes d'azote des voitures par exemple) et les taux appliqués aux coûts ont dû être mis à jour pour l'année concernée (ajustement en fonction de l'inflation).

L'espace géographique est clairement délimité par les trajets définis. En matière de contenu, les émissions et coûts directs liés au fonctionnement, tout comme les émissions et coûts indirects engendrés par la production, l'entretien et l'élimination de l'énergie, des véhicules et des infrastructures sont pris en compte dans tous les cas.

Trajets

La première étape a consisté à sélectionner cinq trajets parcourus par TGV Lyria entre la France et la Suisse. Tous ces trajets sont composés d'un trajet principal ainsi que du parcours qui précède et du parcours qui suit le trajet principal. Le trajet principal est défini comme l'itinéraire pris par le véhicule observé pour chaque moyen de transport, c'est-à-dire de gare à gare ou d'aéroport à aéroport. Dans un premier temps, seuls ces trajets principaux seront pris en compte dans le bilan climatique et énergétique. Dans un deuxième temps, il s'agira de déterminer quels sont les véhicules complétant le moyen de transport principal (avion, train, voiture ou car) et qui doivent être pris en compte pour la réalisation d'une comparaison de porte à porte. En effet, plusieurs options s'offrent aux passagers (tramway ou taxi, par exemple) pour rejoindre leur destination finale (le terme de «porte»

désigne le lieu où se tient la réunion pour les personnes en voyage d'affaires, ou bien l'hébergement pour les personnes en voyage d'agrément). Le tableau 1 indique les cinq trajets ainsi que, pour chaque cas, les parcours qui précèdent et qui suivent. Le trajet Genève–Paris est un exemple de trajet de centre-ville à centre-ville (c'est-à-dire avec des parcours qui précèdent et qui suivent minimales). Dans le cas du train, le trajet principal est fixé de gare à gare; dans le cas de l'avion, ce trajet est fixé d'aéroport à aéroport; dans le cas du car, il est fixé de gare routière à gare routière. Les parcours qui précèdent et qui suivent sont effectués en taxi, voiture, bus du réseau local, tramway, train régional ou métro. Dans le cas de la voiture, le trajet est assuré de porte à porte, ce qui explique l'absence de parcours qui précède ou qui suit.

Tableau 1: Trajets considérés, parcours précédant et suivant le voyage inclus

Route	From	to	Main mode of transport	Notes on the main journey
Geneva–Paris	Geneva city centre	Paris city centre	Railway	Geneva Cornavin–Paris Gare de Lyon
Geneva–Paris	Geneva city centre	Paris city centre	Aircraft	Geneva Airport (GVA)–Paris Charles de Gaulle (CDG)
Geneva–Paris	Geneva city centre	Paris city centre	Coach	Geneva ZOB–Paris Bercy Seine
Geneva–Paris	Geneva city centre	Paris city centre	Car	From door to door by car
Zurich–Paris	Zurich city centre	Boulogne-Billancourt	Railway	Zurich main station–Paris Gare de Lyon
Zurich–Paris	Zurich city centre	Boulogne-Billancourt	Aircraft	Zurich Airport (ZRH)–Paris Charles de Gaulle (CDG)
Zurich–Paris	Zurich city centre	Boulogne-Billancourt	Coach	Sihlquai car park–Paris Bercy Seine
Zurich–Paris	Zurich city centre	Boulogne-Billancourt	Car	From door to door by car
Basel–Paris	Reinach	Paris city centre	Railway	Basel SBB–Paris Gare de Lyon
Basel–Paris	Reinach	Paris city centre	Aircraft	EuroAirport (BSL)–Paris Charles de Gaulle (CDG)
Basel–Paris	Reinach	Paris city centre	Coach	Basel SBB–Paris Bercy Seine
Basel–Paris	Reinach	Paris city centre	Car	From door to door by car
Lausanne–Paris	Montreux	Paris city centre	Railway	Lausanne SBB–Paris Gare de Lyon
Lausanne–Paris	Montreux	Paris city centre	Aircraft	Geneva Airport (GVA)–Paris Charles de Gaulle (CDG)
Lausanne–Paris	Montreux	Paris city centre	Coach	Lausanne P+R Velodrome–Paris Bercy Seine
Lausanne–Paris	Montreux	Paris city centre	Car	From door to door by car
Geneva–Marseille	Nyon	Marseille city centre	Railway	Geneva Cornavin–Marseille-Saint-Charles
Geneva–Marseille	Nyon	Marseille city centre	Aircraft	Geneva Airport (GVA)–Marseille Provence (MRS)
Geneva–Marseille	Nyon	Marseille city centre	Coach	Geneva ZOB–Marseille-Saint-Charles
Geneva–Marseille	Nyon	Marseille city centre	Car	From door to door by car

Tableau INFRAS.

Moyens de transport étudiés

Les véhicules principaux figurant dans le tableau 2 ont été ceux étudiés et comparés les uns aux autres lors de la comparaison des trajets.

Tableau 2: Moyens de transport étudiés

Moyens de transport	Remarques
	<p>Tous les trajets sont exploités par TGV Lyria. Le train est par conséquent représenté par le TGV pour le trajet principal. Du nouveau matériel roulant offrant davantage de places a été mis en circulation en décembre 2019. Le nombre de passagers par train a été fixé pour les trains de la nouvelle flotte en accord avec les attentes économiques, et présenté dans certaines analyses et certains graphiques comme point de comparaison entre la situation actuelle et la situation future (dans le corps principal du rapport pour le trajet Genève–Paris, voir l’annexe pour les autres trajets). Les calculs s’appuient toutefois sur la génération de trains précédente dont les taux d’occupation sont connus.</p>
	<p>Les modèles d’avions déployés sur les trajets au cœur de l’étude étaient très variés; les chiffres clés l’étaient donc tout autant. Il en va de même pour le taux d’occupation des avions, qui correspond par conséquent à une moyenne des vols réalisés sur les trajets (Atmosfair 2019). Les modèles d’avions les plus fréquents étaient les Airbus 318, 319 et 320.</p>
	<p>Les cars étaient représentés par des cars de tourisme lambda. L’un des problèmes concernant les cars réside dans le fait que les trajets sont souvent effectués de nuit, ce qui rend le temps de trajet nettement plus long qu’en voiture. Les capacités de remplissage correspondent à la moyenne européenne (DG MOVE 2019).</p>
	<p>Pour la voiture, deux types de moteur différents ont été comparés: d’une part les moteurs à combustion, représentés en établissant la moyenne du parc suisse, et d’autre part les véhicules à batterie électrique. Les chiffres de l’occupation des véhicules ont été tirés du micro-recensement mobilité et transports de 2015 (ARE 2018). L’utilisation des capacités des véhicules en France est similaire à celle en Suisse, ce qui rend possible l’inclusion de la France dans la comparaison. Il en va de même pour les véhicules à batterie électrique (mix énergétique). Le mix énergétique utilisé pour recharger la batterie influe bien évidemment sur le volume d’émissions, et donc sur l’empreinte climatique. Concernant les gaz à effet de serre, le mix énergétique consommé en Suisse est relativement similaire à celui utilisé en France. En Suisse, l’électricité provient majoritairement de centrales hydroélectriques et nucléaires; en France, l’électricité provient principalement de centrales nucléaires. Ces deux sources d’énergie affichent un facteur d’émissions de CO₂ relativement faible (par rapport aux sources d’énergies fossiles). En outre, pour la construction des véhicules comme des batteries, une moyenne au niveau des pays européens est supposée pour le mix énergétique, et non des valeurs spécifiques à chaque pays.</p>

Tableau INFRAS.

Distances et temps de trajet des itinéraires pour chaque moyen de transport

Le nombre de voyageurs-kilomètres parcourus par les différents moyens de transport est une base essentielle pour les calculs relatifs à l'énergie, au climat et aux coûts. Les résultats sont présentés par personne et par trajet: le nombre de voyageurs-kilomètres est obtenu en multipliant les distances par le taux d'occupation des moyens de transport. La distance des différents trajets a été obtenue via plusieurs sources. L'estimation des trains-kilomètres est tirée de la plateforme en ligne TGV Lyria, celle des distances aériennes du site www.greatcirclemapper.net, et celle des distances routières du site www.googlemaps.com. Google Maps a été utilisé pour le calcul des distances du parcours qui précède et qui suit le trajet principal. Les distances pour le parcours qui précède et qui suit sont identiques pour le train et le car, puisque les gares routières se trouvent à proximité immédiate des gares ferroviaires. Pour les aéroports, le parcours qui précède et qui suit est un peu plus long car les aéroports se situent toujours un peu à l'écart des villes. Si le point d'arrivée ou de départ est un centre-ville, la longueur du parcours qui précède ou qui suit a été arrondi à 2 km pour les calculs.

Pour tous les moyens de transport, une analyse supplémentaire a été menée afin de comparer la part du temps de trajet total qui peut être utilisée comme temps de travail. Seuls les moyens de transport adaptés aux voyages d'affaires ont été comparés entre eux. Les résultats de cette analyse sont présentés au chapitre 3.4. Les temps de trajet pris en compte sont ceux indiqués par les horaires officiels, ou par Google Maps dans le cas de la voiture. De multiples études ont porté sur différents jours de la semaine ainsi que sur différents moments de la journée, ceci afin d'établir une moyenne. Les temps de vol varient selon la direction du vol. Pour ces analyses, il a toujours été observé le trajet depuis la Suisse vers la France.

Les retards, grèves, encombrements du trafic et autres impacts négatifs n'ont pas été pris en compte.

Tableau 3: Distances des trajets étudiés

Route	Main mode of transport	Main journey	Pre journey	Post journey	Entire route	Travel time
			Kilometres			Minutes
Geneva–Paris	Railway	503	2	2	507	245
	Aircraft	457	5	28	507	169
	Coach	538	2	2	542	545
	Car	547	0	0	490	315
Zurich–Paris	Railway	617	2	12	631	293
	Aircraft	525	8	38	571	163
	Coach	650	2	12	664	650
	Car	602	0	0	602	385
Basel–Paris	Railway	526	8	2	536	214
	Aircraft	449	42	28	519	148
	Coach	573	8	2	583	546
	Car	537	0	0	583	351
Lausanne–Paris	Railway	480	30	2	512	252
	Aircraft	457	93	28	512	170
	Coach	535	30	2	567	507
	Car	545	0	0	545	357
Geneva–Marseille	Railway	476	23	2	501	242
	Aircraft	370	26	24	459	221
	Coach	461	23	2	486	480
	Car	459	0	0	459	269

Tableau INFRAS.

Calculs des émissions et de l'énergie

Pour l'empreinte climatique sont considérés aussi bien le fonctionnement direct que les processus en amont et aval. La consommation d'énergie finale est calculée pour déterminer le bilan énergétique. Cela signifie que seule l'efficacité énergétique du véhicule est prise en compte; les systèmes énergétiques à l'origine de cette efficacité ne sont pas inclus dans le bilan énergétique.

Pour l'empreinte climatique, la totalité des émissions de gaz à effet de serre liées au fonctionnement direct et aux processus préalables a été transformée en équivalent CO₂. Cela signifie que pour le fonctionnement direct, seuls les moteurs à combustion utilisant des combustibles fossiles émettent des gaz à effet de serre. La combustion de l'essence ou du gazole par les voitures, ou du kérosène par les avions a donc été intégrée. Les gaz à effet de serre des processus en amont et en aval dérivent d'une part de la production d'électricité ou de carburants (électricité, essence, gazole ou kérosène), et d'autre part de la production,

l'entretien et l'élimination des véhicules et des infrastructures. Les mix énergétiques français et suisse ont été pondérés pour le TGV. Le mix énergétique suisse, appliqué pour la voiture électrique, peut être également appliqué à la France puisqu'en termes d'empreinte climatique, le mix énergétique français est sensiblement le même qu'en Suisse. Il faut ajouter qu'une large part des émissions de gaz à effet de serre apparaissant dans l'empreinte climatique des voitures électriques doit être attribuée à la production des véhicules (et des batteries). Une valeur européenne moyenne est appliquée à tous les pays concernant le mix énergétique utilisé pour la phase de production. Le mix énergétique consommé en Suisse et en France n'a par conséquent qu'une influence relativement faible.

Des facteurs d'émissions pondérés ont été calculés selon le moyen de transport pour le parcours qui précède et qui suit le trajet principal. Une étude menée auprès des utilisateurs du TGV Lyria a permis d'identifier le moyen de transport leur permettant de se rendre jusqu'à la gare: transports publics (tramways, bus locaux, trains régionaux ou métro), trajet à pied, à vélo ou en voiture. Ces résultats ont ensuite servi de base pour la pondération. Étant donné l'absence d'étude disponible concernant les gares routières et les aéroports, le facteur d'émissions pondéré a également été appliqué aux parcours vers et depuis les aéroports et les gares routières. Le fait que l'étude soit menée en France et en Suisse a permis d'appliquer un facteur d'émissions pondéré aux parcours qui précèdent en Suisse et aux parcours qui suivent en France.

Un point important est à noter concernant le trafic aérien. Un IFR² a été pris en compte pour la conversion en équivalent CO₂. Cet indice décrit l'accroissement de l'effet de serre généré par les émissions des avions à haute altitude (Atmosfair 2019).

Le bilan énergétique indique, pour chaque moyen de transport, la quantité d'énergie finale consommée pour effectuer les trajets. Aucune différence n'est faite ici entre les sources d'énergie renouvelable et non renouvelable, et toutes ces sources sont présentées en kilogrammes d'équivalent essence. Le tableau 4 indique les sources des facteurs d'émissions qui ont été utilisées pour le calcul de l'empreinte climatique et du bilan énergétique. Les facteurs d'émission de polluants atmosphériques figurant dans le tableau 4 sont nécessaires au calcul des coûts environnementaux. Ils sont par conséquent également listés ici, d'autant qu'ils proviennent généralement des mêmes sources que celles des facteurs d'émission de gaz à effet de serre.

² IFR = indice de forçage radiatif. Il décrit l'accroissement de l'effet de serre généré par les émissions des avions (en particulier le CO₂, l'eau (sous forme gazeuse) et les oxydes d'azote) à haute altitude. L'effet thermique de l'ensemble des gaz émis lors du vol est environ deux fois supérieur que si le CO₂ seul est pris en compte. Cet effet entre en jeu pour les vols à une altitude de 9000 mètres et il a été intégré aux calculs à partir de cette altitude.

Tableau 4: Bases de données pour les facteurs d'émission appliqués

Moyen de transport principal	Sources des facteurs d'émission	
	Fonctionnement direct	Processus en amont et en aval
Train	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PM 10 hors échappement: Ecoinvent 3.5 ▪ Conso. énergétique: données de fonctionnement de TGV Lyria 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: données de fonctionnement de TGV Lyria ▪ Polluants atmosphériques: EcoTransIT World et Mobitool 2.2 ▪ Conso. énergétique: Mobitool v2.2
Avion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: Atmosfair GmbH 2019 ▪ Polluants atmosphériques: Ecoinvent 3.5 ▪ Conso. énergétique: Atmosfair GmbH 2019 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: Atmosfair GmbH 2019 ▪ Polluants atmosphériques: Ecoinvent 3.5 ▪ Conso. énergétique: Mobitool v2.2
Car	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: HBEFA 4.1 ▪ Polluants atmosphériques: HBEFA 4.1 ▪ Conso. énergétique: HBEFA 4.1 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: Ecoinvent 3.5 ▪ Polluants atmosphériques: Ecoinvent 3.5 ▪ Conso. énergétique: Mobitool v2.2
Voiture traditionnelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: HBEFA 4.1 ▪ Polluants atmosphériques: HBEFA 4.1 ▪ Conso. énergétique: HBEFA 4.1 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: Ecoinvent 3.5 ▪ Polluants atmosphériques: Ecoinvent 3.5 ▪ Conso. énergétique: Mobitool v2.2
Voiture à batterie électrique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: INFRAS, Quantis 2020 ▪ Polluants atmosphériques: INFRAS, Quantis 2020 ▪ Conso. énergétique: INFRAS, Quantis 2020 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Équiv. CO₂: INFRAS, Quantis 2020 ▪ Polluants atmosphériques: INFRAS, Quantis 2020 ▪ Conso. énergétique: INFRAS, Quantis 2020

Tableau INFRAS.

Bases pour les coûts environnementaux et des accidents

L'ensemble des coûts environnementaux est composé de cinq catégories différentes. Le tableau 5 indique quelles sont ces catégories de coûts et décrit ce qu'elles englobent.

Tableau 5: Catégories de coûts prises en compte

Catégories de coûts	Description
Coûts climatiques	Coûts liés aux émissions de gaz à effet de serre et aux changements climatiques qui en résultent (estimation des coûts liés aux dommages)
Coûts de la pollution atmosphérique	Les coûts environnementaux engendrés par la pollution atmosphérique incluent les quatre sous-catégories suivantes: dépenses de santé, mauvaises récoltes, dommages causés aux bâtiments et aux matériaux, perte de biodiversité
Coûts des processus en amont et en aval	Coûts liés aux émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques consécutifs à la production, l'entretien et l'élimination des: <ul style="list-style-type: none"> ▪ sources d'énergie (carburants et électricité) ▪ véhicules ▪ infrastructures pour le trafic Monétarisation liée à la pollution atmosphérique et aux coûts climatiques (voir ci-dessus)
Coûts des accidents	Accidents de trafic (coût des dommages)
Coûts des nuisances sonores	Dépenses de santé liées aux nuisances sonores et coûts de la pollution sonore (coût des dommages)

Tableau INFRAS.

Les coûts environnementaux ont été calculés à l'aide de taux spécifiques sur la base de l'empreinte climatique et des émissions de polluants atmosphériques. La même méthode a été appliquée pour les processus en amont et en aval, qui prennent également en compte les gaz à effet de serre et les polluants atmosphériques. Le taux climatique utilisé est tiré du rapport publié par l'Office fédéral du développement territorial «Coûts et bénéfices des transports en Suisse, 2016» (ARE 2019). Ce rapport est actualisé chaque année. Le taux a été mis à jour pour l'année 2019 et s'élève à CHF 137 par tonne de CO₂. Les taux pour les polluants atmosphériques sont tirés du «Manuel des coûts externes du transport» publié par la Commission européenne (DG MOVE 2019). Ce manuel comprend les taux de coût pour les polluants atmosphériques majeurs de tous les pays européens. Ces taux ont également été mis à jour en 2019.

Une approche assez différente a été adoptée pour les coûts des accidents et des nuisances sonores. Ils n'ont pas été calculés au moyen d'une structure de quantités puis monétarisés à l'aide de taux de coûts, mais établis directement depuis les taux des accidents et des nuisances sonores habituels par voyageur-kilomètre. Ils sont eux aussi tirés du «Manuel des coûts externes du transport» publié par la Commission européenne (DG MOVE 2019). Ce dernier comprend des taux spécifiques pour le territoire français. L'étude européenne a dégagé des valeurs spécifiques aux trains à grande vitesse, utilisées ensuite pour les taux appliqués au rail.

Malgré l'absence d'accident ferroviaire ou aérien sur les trajets étudiés au cours des dix dernières années, les valeurs moyennes pertinentes ont été retenues pour des raisons de cohérence. Les coûts des accidents restent toutefois négligeables pour les trafics ferroviaire et aérien. Aucun chiffre précis sur les accidents n'est disponible non plus pour les moyens de transport routiers concernant les trajets observés. C'est pourquoi des valeurs moyennes pour les autoroutes ont aussi été prises en compte.

3. Résultats

3.1. Empreinte climatique

Cette partie fait apparaître, pour les cinq trajets, les empreintes climatiques des moyens de transport étudiés. Les résultats présentent les émissions de gaz à effet de serre sous la forme d'équivalent CO₂ par personne et par trajet. Les émissions de gaz à effet de serre sont analysées dans les graphiques en fonction de l'approvisionnement énergétique, de la production des véhicules et des infrastructures et selon les émissions liées à l'exploitation directe. Selon la norme SN EN 16258³, seules les émissions liées à l'exploitation directe et celles liées à l'approvisionnement énergétique devraient être déclarées. La présente empreinte climatique tient également compte des émissions de la fabrication des véhicules et des infrastructures. Pour le premier trajet Genève–Paris, une analyse et un graphique d'une comparaison porte-à-porte sont également présentés. Cela signifie que les parcours précédant et suivant un voyage sur la ligne Genève–Paris sont également pris en compte.

Pour les trajets suivants, ces graphiques ont été placés dans l'Annexe pour des raisons de lisibilité.

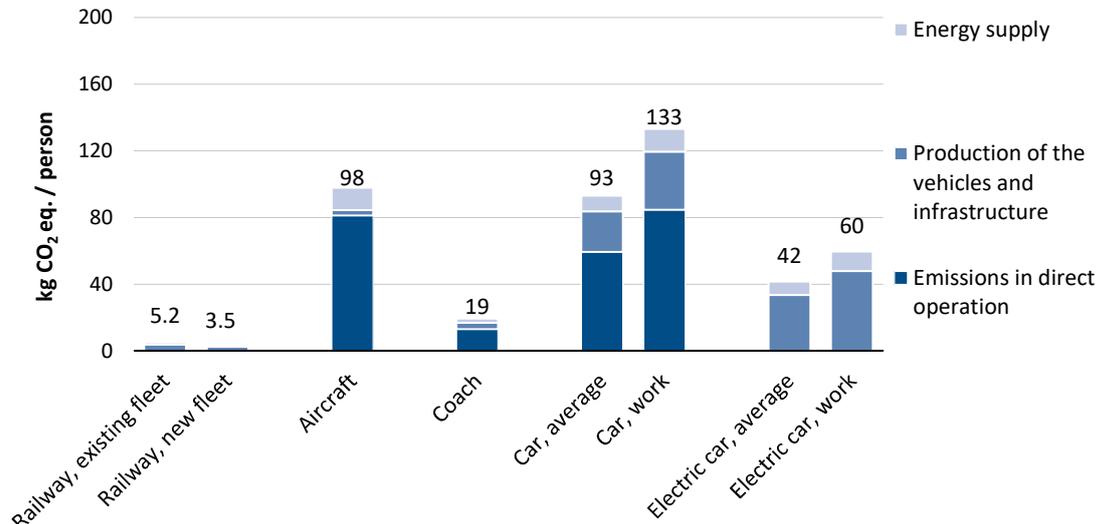
Genève–Paris

Le tableau 3 montre les résultats de l'empreinte climatique du trajet Genève–Paris pour les moyens de transport étudiés. Les équivalents CO₂ en kilogramme par personne et par trajet y figurent, indiqués en fonction de l'approvisionnement énergétique, de la production des véhicules et des infrastructures, et selon les émissions de l'exploitation directe. Dans le cas des voitures particulières, deux taux d'occupation différents sont également indiqués. «Travail» correspond à un taux d'occupation de 1,12 personne par véhicule (selon les statistiques des déplacements professionnels), au lieu de la valeur moyenne de 1,6 personne par véhicule (ARE 2018).

Pour le trajet de Genève à Paris (centre-ville à centre-ville), c'est l'ancienne flotte du TGV qui produit le moins d'émissions par personne et par trajet (5,2 kg d'équivalent CO₂). Si les attentes vis-à-vis de la nouvelle flotte se réalisent en matière d'occupation, cette valeur devrait baisser encore, jusqu'à atteindre environ 3,5 kg d'équivalent CO₂ par personne et par trajet. Le moyen de transport présentant le volume d'émissions le plus proche par personne et par trajet est le car avec environ 19 kg d'équivalent CO₂, suivi par la voiture électrique avec environ 42 kg d'équivalent CO₂. La voiture traditionnelle (93 kg d'équivalent CO₂) et l'avion (98 kg d'équivalent CO₂) sont les moyens de transport rejetant le plus de gaz à effet de serre par personne et par trajet.

³ La norme SN EN 16258 décrit une méthode de calcul et de déclaration de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre pour les services de transports. Il s'agit d'une norme standard édictée par le Comité européen de normalisation (CEN).

Figure 3: Empreinte climatique pour un trajet Genève–Paris: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport



Graphique INFRAS

Le tableau 6 indique les émissions selon leur origine. On constate que les modes de transport électriques, à savoir le rail et la voiture électrique, ne produisent pas d'émissions directes.

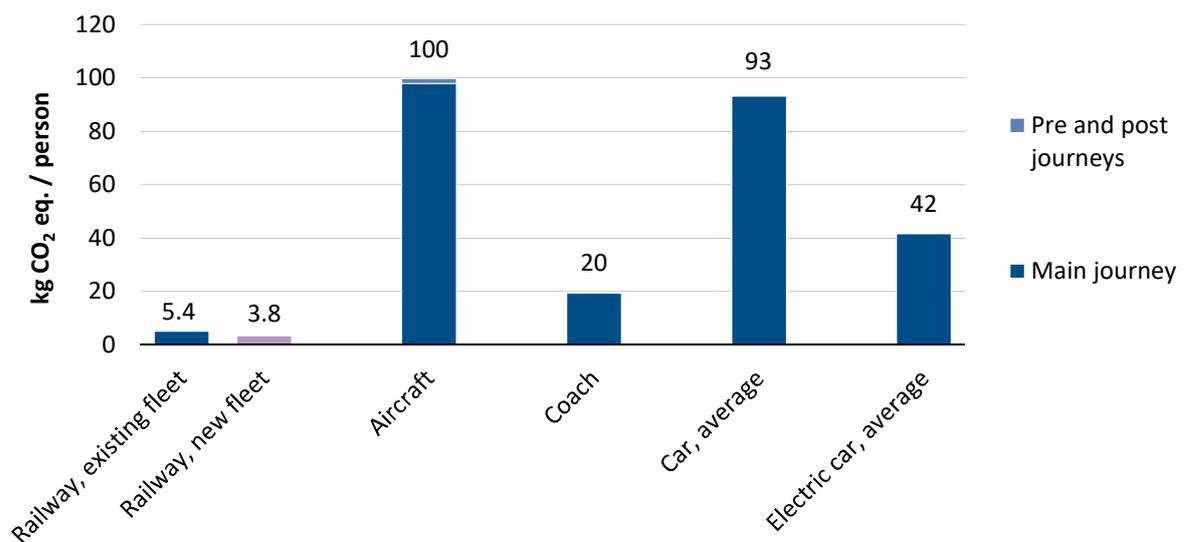
Selon la norme SN EN 16258, seules les émissions liées à l'exploitation directe et celles liées à l'approvisionnement énergétique devraient être déclarées. Dans le cas des chemins de fer, la traction représente 1,4 kg d'équivalent CO₂ par personne (ancienne flotte) et 0,9 kg d'équivalent CO₂ (nouvelle flotte), soit environ un quart des émissions totales. Le reste provient de la production de véhicules et d'infrastructures. Ce rapport est inversé pour les avions, par exemple. Dans ce cas, les émissions directes et l'approvisionnement énergétique représentent ensemble environ 97% des émissions totales, avec environ 95 kg d'équivalent CO₂ par personne. Souvent, seuls les paramètres exigés par la norme sont pris en compte dans les comparaisons écologiques des modes de transports, ce qui explique qu'un voyage en train émet alors environ 70 à 100 fois moins d'éq. CO₂ qu'un vol sur le même trajet. La situation est similaire mais cependant moins marquée dans le cas des voitures particulières pour lesquelles l'approvisionnement énergétique et les émissions directes additionnés des véhicules à combustion représentent une proportion nettement plus élevée des émissions totales que pour les voitures électriques.

Tableau 6: Émissions de gaz à effet de serre sur le trajet Genève–Paris selon les sources d'émissions

kg équiv. CO ₂ / personne	Rail, flotte existante	Rail, nouvelle flotte	Avion	Car	Voiture, moyenne	Voiture, travail	Voiture électrique, moyenne	Voiture électrique, travail
Émissions de l'exploitation directe	0	0	81	13	59	85	0	0
Approvisionnement énergétique	1.4	0.9	14	2.5	9.6	14	8	12
Production véhicules et infrastructures	3.8	2.6	3.1	4.0	24	35	33	48
Total	5.2	3.5	98	19	93	133	42	60
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.4</i>	<i>0.9</i>	<i>95</i>	<i>15</i>	<i>69</i>	<i>98</i>	<i>8</i>	<i>12</i>

La figure 4 montre la même comparaison que précédemment, mais avec un parcours avant et après le voyage. Cela signifie qu'une comparaison dite de porte à porte a été effectuée et que les trajets vers et depuis la gare, l'aéroport ou la gare routière ont également été pris en compte (pour plus de détails, voir le tableau 3).

Le point frappant est le fait que la proportion des parcours qui précèdent et qui suivent est véritablement infime par rapport au volume total d'émissions. En proportion, les émissions de gaz à effet de serre durant les parcours vers et depuis les gares sont les plus élevées pour le train, à hauteur d'environ 15% (cela est à peine visible sur le graphique car les valeurs totales pour le train sont extrêmement faibles). Pour l'avion, ces émissions se situent aux alentours des 2%, et pour le car à environ 3,5%.

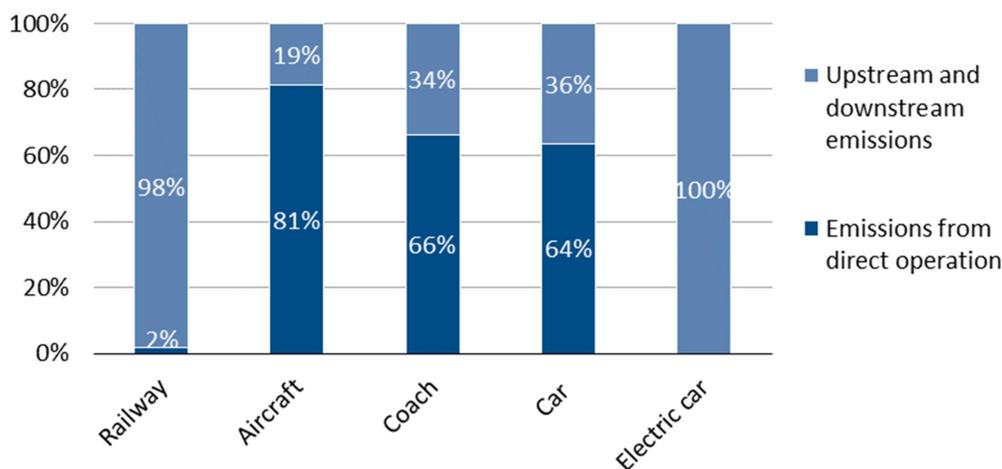
Figure 4: Empreinte climatique pour un trajet Genève–Paris: équivalent CO₂ par personne et par trajet pour différents moyens de transport

Graphique INFRAS

La figure 5 affiche la proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport aux émissions de gaz à effet de serre totales pour un trajet de Genève à Paris (parcours avant et après le voyage inclus). Les processus en amont et en aval comprennent la production, l'entretien et l'élimination des véhicules, des infrastructures et de l'énergie.

La voiture électrique n'émettant aucun gaz à effet de serre au cours de son trajet, cela signifie que les émissions de gaz à effet de serre sont générées en totalité par les processus en amont et en aval. La production, l'entretien et l'élimination des véhicules, des infrastructures et de l'énergie sont, sans exception, des processus en amont et en aval. En ce qui concerne le train, 98% environ des émissions de gaz à effet de serre sont dus aux processus en amont et en aval, et 2% au fonctionnement direct. Les émissions liées au fonctionnement direct proviennent dans leur totalité des parcours qui précèdent et qui suivent (parcours en bus jusqu'à la gare, par exemple). En effet, le trajet principal en train ne génère lui non plus aucun gaz à effet de serre. Pour la voiture traditionnelle, 36% environ des émissions de gaz à effet de serre proviennent des processus en amont et en aval. Pour le car, ce chiffre est d'environ 19%, contre approximativement 19% pour le trajet en avion.

Figure 5: Proportion des émissions de GES en amont et en aval par rapport aux émissions de GES totales

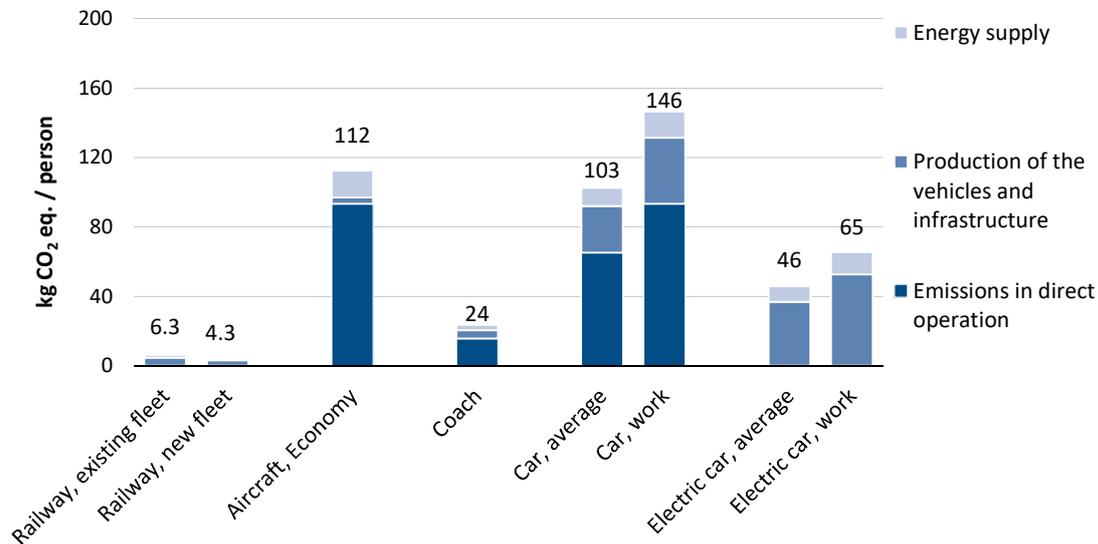


Graphique INFRAS

Zurich–Paris

Un trajet en TGV de Zurich à Paris générerait environ 6,3 kg d'équivalent CO₂ par personne. Aujourd'hui, pour un voyage à bord de la nouvelle flotte, les émissions de gaz à effet de serre s'élèvent à 4,3 kg d'équivalent CO₂. Un trajet en car de Zurich à Paris génère un volume d'émissions plus élevé par personne, avec environ 24 kg d'équivalent CO₂. Le même trajet en voiture électrique produit environ 46 kg d'équivalent CO₂, alors qu'avec une voiture à combustion traditionnelle, ce chiffre est d'environ 103 kg d'équivalent CO₂. Pour un taux d'occupation plus faible (voyages d'affaires, par exemple), les émissions par tête augmentent en moyenne à 65 kg d'équivalent CO₂ pour les voitures électriques et à 146 kg d'équivalent CO₂ pour les voitures traditionnelles. L'avion est le moyen de transport qui génère le plus d'émissions par personne et par trajet avec 112 kg d'équivalent CO₂.

Figure 6: Empreinte climatique pour un trajet Zurich–Paris: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport

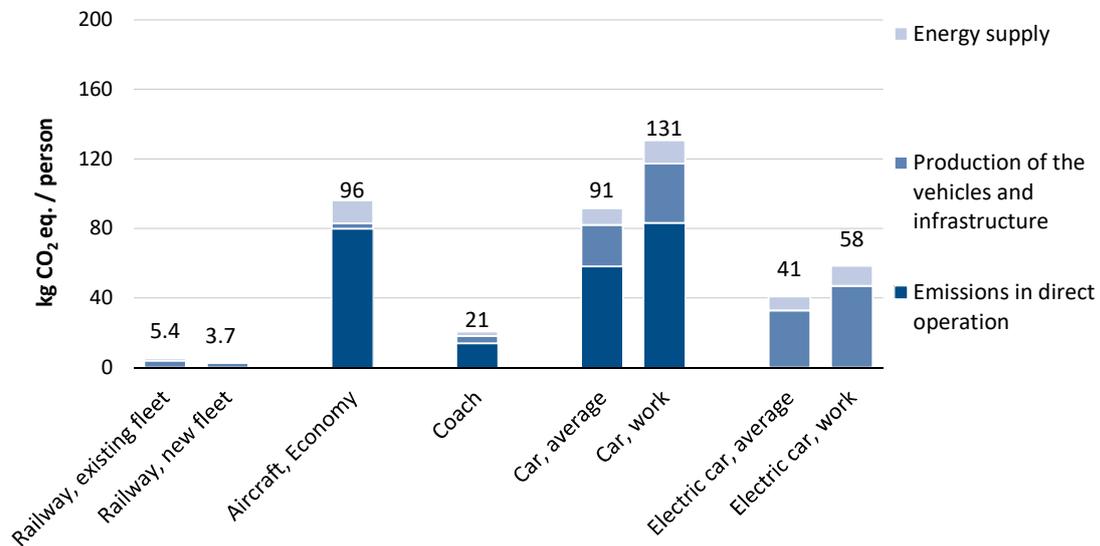


Graphique INFRAS

Bâle–Paris

Une comparaison entre les volumes des émissions de gaz à effet de serre produits par les différents moyens de transport pour un trajet de Bâle jusqu'à Paris montre que le TGV génère le plus faible volume de GES par personne et par trajet avec 5,4 kg d'équivalent CO₂. Avec la nouvelle flotte de TGV, les émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet baissent à 3,7 kg d'équivalent CO₂. Un trajet en car produit 21 kg d'équivalent CO₂ par personne. Un trajet en voiture traditionnelle génère environ 91 kg d'équivalent CO₂ par personne, contre un peu moins de la moitié pour un trajet en voiture électrique (41 kg). Lorsque la voiture est occupée par des personnes en voyage d'affaires, le volume d'émissions de gaz à effet de serre augmente jusqu'à 131 kg d'équivalent CO₂ (voiture avec moteur à énergie fossile), et 58 kg d'équivalent CO₂ (voiture électrique). L'avion est le moyen de transport qui génère le plus d'émissions de gaz à effet de serre par personne, avec 96 kg d'équivalent CO₂.

Figure 7: Empreinte climatique, Bâle–Paris: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport

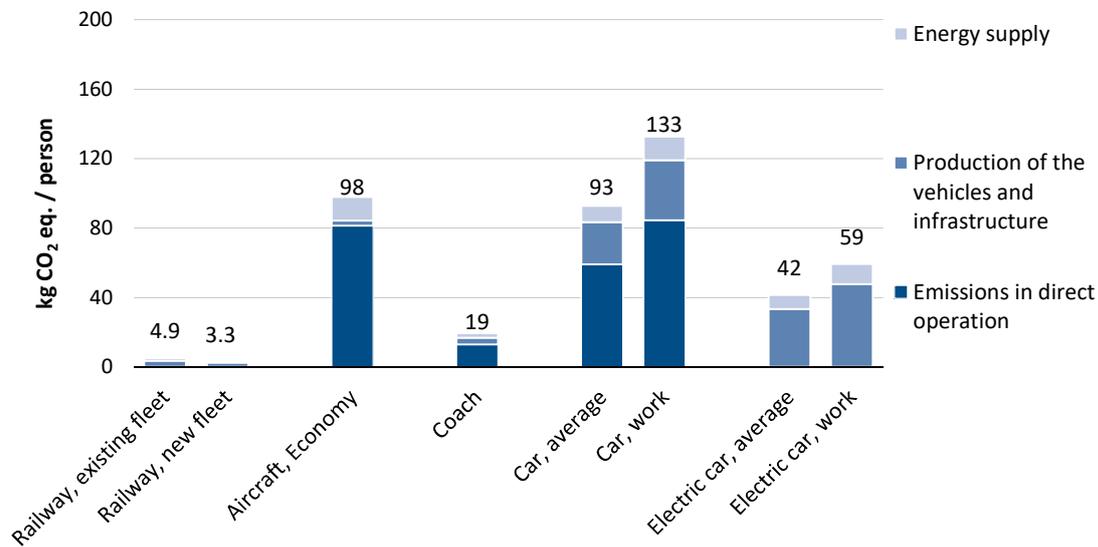


Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

Pour le trajet de Lausanne à Paris, le TGV produit le moins d'émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet (4,9 kg d'équivalent CO₂). Avec la nouvelle flotte de TGV, les émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet baissent à 3,3 kg d'équivalent CO₂. Un trajet en car produit 19 kg d'équivalent CO₂ par personne. Un trajet en voiture traditionnelle génère environ 93 kg d'équivalent CO₂ par personne, contre un peu moins de la moitié pour un trajet en voiture électrique (42 kg). Lorsque la voiture est occupée par des personnes en voyage d'affaires, le volume d'émissions de GES augmente jusqu'à 133 kg d'équivalent CO₂ (voiture avec moteur à énergie fossile), et 59 kg d'équivalent CO₂ (voiture électrique). L'avion est le moyen de transport qui génère le plus d'émissions de gaz à effet de serre par personne, avec 98 kg d'équivalent CO₂.

Figure 8: Empreinte climatique, Lausanne–Paris: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport

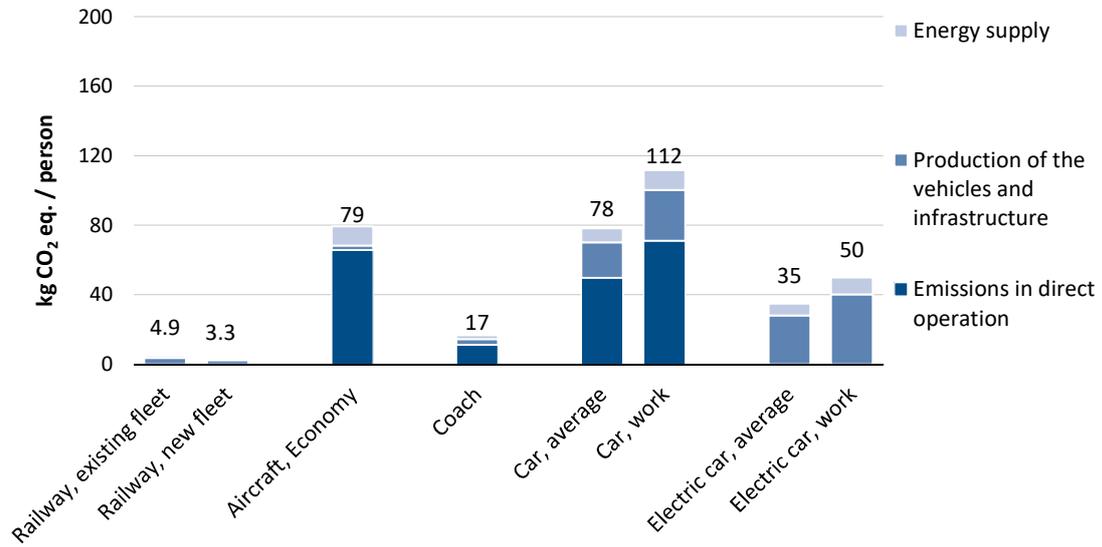


Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Pour le trajet de Genève à Marseille, le TGV produit le moins d'émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet (4,9 kg d'équivalent CO₂). Avec la nouvelle flotte de TGV, les émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet baissent à 3,3 kg d'équivalent CO₂. Un trajet en car produit 17 kg d'équivalent CO₂ par personne. Un trajet en voiture traditionnelle génère environ 78 kg d'équivalent CO₂ par personne, contre un peu moins de la moitié pour un trajet en voiture électrique (35 kg). Lorsque la voiture est occupée par des personnes en voyage d'affaires, le volume d'émissions de GES augmente jusqu'à 112 kg d'équivalent CO₂ (voiture avec moteur à énergie fossile), et 50 kg d'équivalent CO₂ (voiture électrique). L'avion est le moyen de transport qui génère le plus d'émissions de gaz à effet de serre par personne, avec 79 kg d'équivalent CO₂.

Figure 9: Empreinte climatique, Genève–Marseille: équivalent CO₂ par personne et trajet pour différents moyens de transport



Graphique INFRAS

3.2. Bilan énergétique final

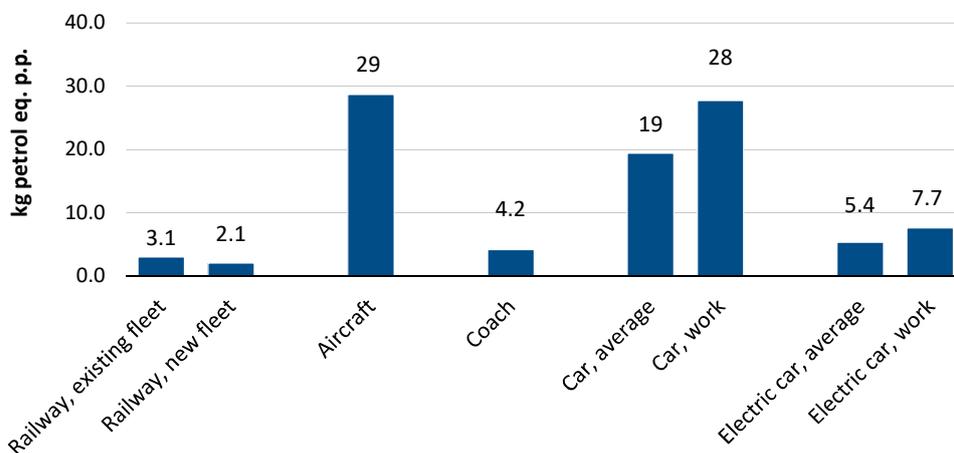
Le bilan énergétique final fait état de l'énergie utilisée par personne et par trajet. L'énergie finale est habituellement convertie en kilogrammes d'équivalent essence, ce qui permet de comparer l'efficacité énergétique des différents moyens de transport. L'énergie utilisée en amont et en aval n'est pas prise en compte. Cette démarche est intentionnelle car, s'il en était autrement, ce ne serait pas l'efficacité énergétique des moyens de transport qui ferait l'objet de la comparaison mais l'efficacité énergétique des systèmes énergétiques en arrière-plan. Cela signifie que sont comparées entre elles l'efficacité d'un moteur électrique et celle d'un moteur à combustion, par exemple, et non la dépense énergétique visant à produire de l'énergie nucléaire ou hydroélectrique par rapport à celle visant à produire du gazole.

Genève–Paris

La flotte TGV Lyria précédente est le moyen de transport parmi ceux étudiés qui affiche la consommation d'énergie finale la plus faible pour le trajet Genève–Paris, avec environ 3,1 kg d'équivalent essence par personne et par trajet. La nouvelle flotte, en fonctionnement depuis fin 2019, laisse espérer une consommation d'énergie finale encore plus basse (2,1 kg d'équivalent essence environ). Le car consomme environ 4,2 kg d'équivalent essence par personne et par trajet, et la voiture électrique environ 5,4 kg.

Pour les voitures, la consommation d'énergie passe à 7,7 (voitures électriques) et 28 kg d'équivalent essence (voitures à carburant fossile) pour les déplacements professionnels, c'est-à-dire lorsque le taux d'occupation du véhicule est plus bas. En termes de consommation d'énergie finale par personne et par voyage, les avions consomment encore le plus d'énergie avec 29 kg d'équivalent essence.

Figure 10: Consommation d'énergie finale par personne et par trajet par les différents moyens de transport pour le trajet Genève–Paris

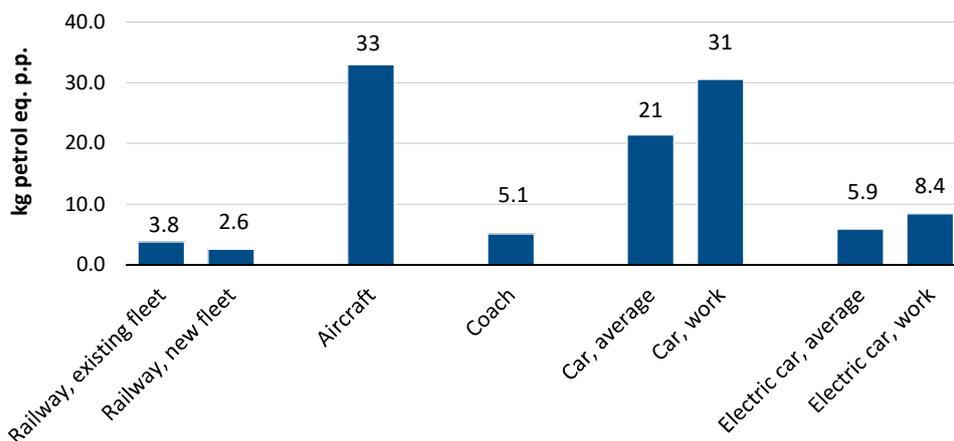


Graphique INFRAS

Zurich–Paris

La figure 11 indique la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Zurich jusqu'à Paris. Le trajet en TGV (nouvelle flotte) affiche la consommation d'énergie par personne la plus faible avec environ 2,6 kg d'équivalent essence (flotte précédente: 3,8 kg d'équivalent essence). La consommation d'énergie en car est à peu près deux fois supérieure avec 5,1 kg d'équivalent essence; il en va de même pour la voiture électrique avec un taux d'occupation moyen (quelque 6 kg d'équivalent essence). La voiture traditionnelle consomme quelque 21 kg d'équivalent essence et l'avion environ 33 kg d'équivalent essence. Concernant la voiture, la consommation d'énergie augmente jusqu'à 8,4 kg d'équivalent essence pour un taux d'occupation faible dans le cadre d'un voyage d'affaires (voiture électrique) et 31 kg (voiture avec moteur à énergie fossile).

Figure 11: Consommation d'énergie finale par personne et par trajet par les différents moyens de transport pour le trajet Zurich–Paris

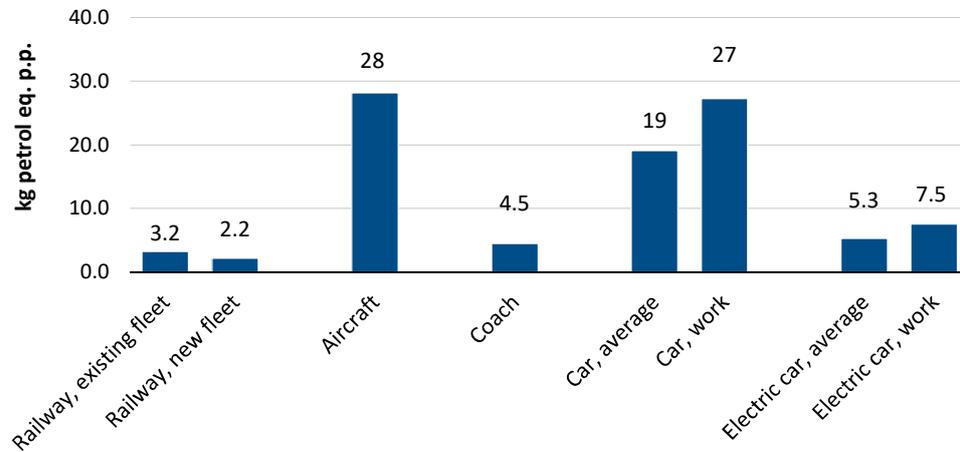


Graphique INFRAS

Bâle–Paris

La figure 12 indique la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Bâle jusqu'à Paris. Le trajet en train (nouvelle flotte) affiche la consommation d'énergie par personne la plus faible avec environ 2,2 kg d'équivalent essence (flotte précédente: 3,2 kg d'équivalent essence env.). La consommation d'énergie en car est à peu près deux fois supérieure avec 4,5 kg d'équivalent essence; il en va de même pour la voiture électrique avec un taux d'occupation moyen (près de 5,3 kg d'équivalent essence). La voiture traditionnelle consomme quelque 19 kg d'équivalent essence et l'avion environ 27 kg d'équivalent essence. Concernant la voiture, la consommation d'énergie augmente: jusqu'à 7,5 kg d'équivalent essence pour un taux d'occupation faible dans le cadre d'un voyage d'affaires (voiture électrique) et 27 kg (voiture avec moteur à énergie fossile).

Figure 12: Consommation d'énergie finale par personne et par trajet par les différents moyens de transport pour le trajet Bâle–Paris

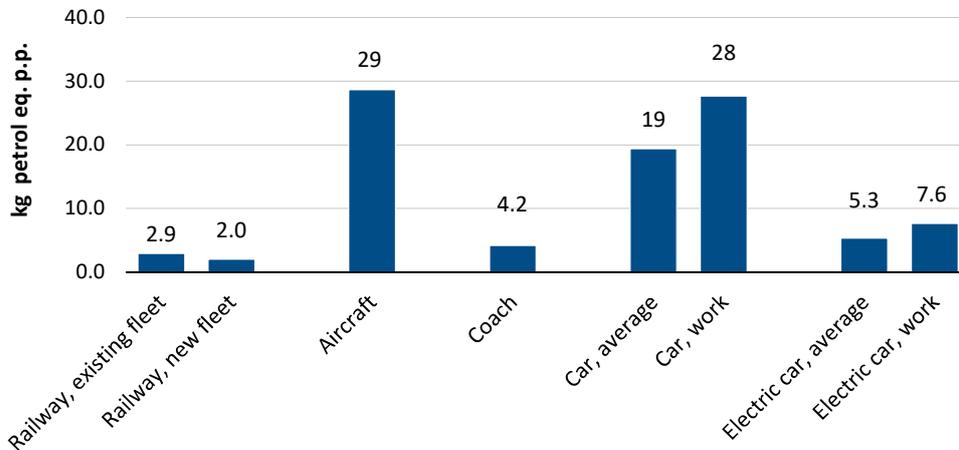


Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

La figure 13 indique la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Lausanne jusqu'à Paris. Le trajet en train (nouvelle flotte) affiche la consommation d'énergie par personne la plus faible avec environ 2 kg d'équivalent essence (flotte précédente: 2,9 kg d'équivalent essence env.). La consommation d'énergie en car est à peu près deux fois supérieure avec 4,2 kg d'équivalent essence; il en va de même pour la voiture électrique avec un taux d'occupation moyen (près de 5,3 kg d'équivalent essence). La voiture traditionnelle consomme quelque 19 kg d'équivalent essence et l'avion environ 29 kg d'équivalent essence. Concernant la voiture, la consommation d'énergie augmente: jusqu'à 7,6 kg d'équivalent essence pour un taux d'occupation faible dans le cadre d'un voyage d'affaires (voiture électrique) et 28 kg (voiture avec moteur à énergie fossile).

Figure 13: Consommation d'énergie finale par personne et par trajet par les différents moyens de transport pour le trajet Lausanne–Paris

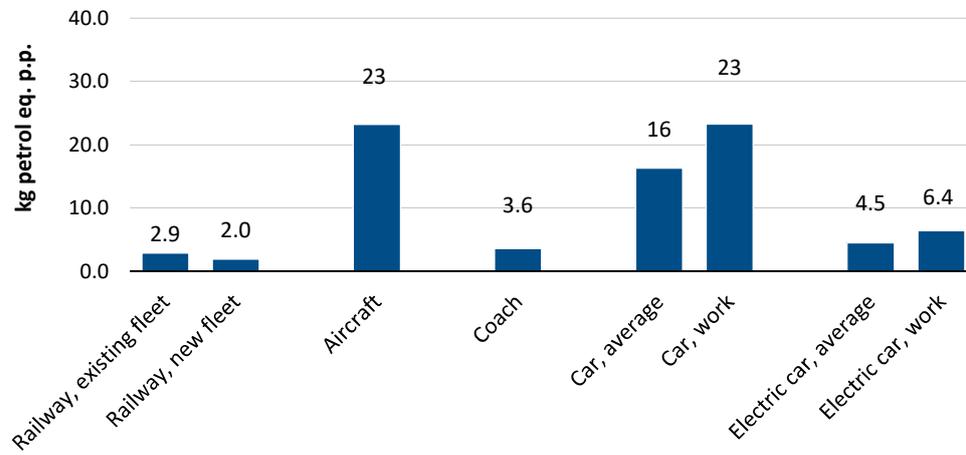


Graphique INFRAS

Genève–Marseille

La figure 14 indique la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Genève à Marseille. Le trajet en train (nouvelle flotte) affiche la consommation d'énergie par personne la plus faible avec environ 2 kg d'équivalent essence (flotte précédente: 2,9 kg d'équivalent essence env.). La consommation d'énergie en car est à peu près deux fois supérieure avec 3,6 kg d'équivalent essence; il en va de même pour la voiture électrique avec un taux d'occupation moyen (près de 4,5 kg d'équivalent essence). La voiture traditionnelle consomme quelque 16 kg d'équivalent essence et l'avion environ 23 kg d'équivalent essence. Concernant la voiture, la consommation d'énergie augmente: jusqu'à 6,4 kg d'équivalent essence pour un taux d'occupation faible dans le cadre d'un voyage d'affaires (voiture électrique) et 23 kg (voiture avec moteur à énergie fossile).

Figure 14: Consommation d'énergie finale par personne et par trajet par les différents moyens de transport pour le trajet Genève–Marseille



Graphique INFRAS

3.3. Coûts environnementaux et des accidents

Cette partie fait apparaître, pour les cinq trajets, les coûts environnementaux et des accidents des moyens de transport étudiés. Les résultats sont présentés en CHF par personne et par trajet. Pour le premier trajet, Genève–Paris, une analyse et un graphique supplémentaires indiquent la proportion de chaque catégorie de coût par rapport aux coûts environnementaux et des accidents totaux. Pour les autres trajets, les graphiques ont été placés dans l'Annexe pour des raisons de lisibilité.

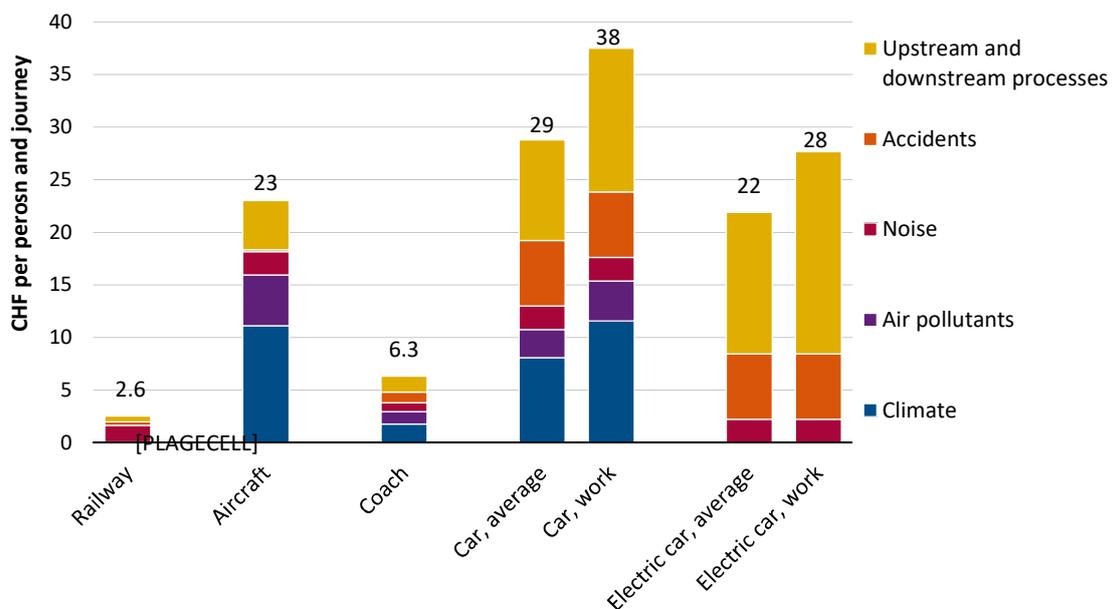
Genève–Paris

La figure 15 indique les coûts environnementaux et des accidents (effets externes) moyens pour un trajet depuis Genève jusqu'à Paris. Le train est le moyen de transport qui génère les coûts environnementaux et des accidents les plus faibles avec environ CHF 2.60 par personne et par trajet, suivi par le car avec CHF 6.30 par personne et par trajet.

Graphique INFRAS

Si le trajet est effectué en voiture électrique, les coûts environnementaux et des accidents s'élèvent en moyenne à CHF 22 par personne (taux d'occupation de 1,6 personne par voiture). Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 28. Concernant une voiture traditionnelle avec moteur à combustion, et pour une occupation moyenne, les coûts sont d'environ CHF 29 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 38. Un trajet par les airs depuis Zurich jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents de quelque CHF 23 par personne.

Figure 15: Moyenne des coûts environnementaux et des accidents par personne et par trajet pour le trajet Genève-Paris

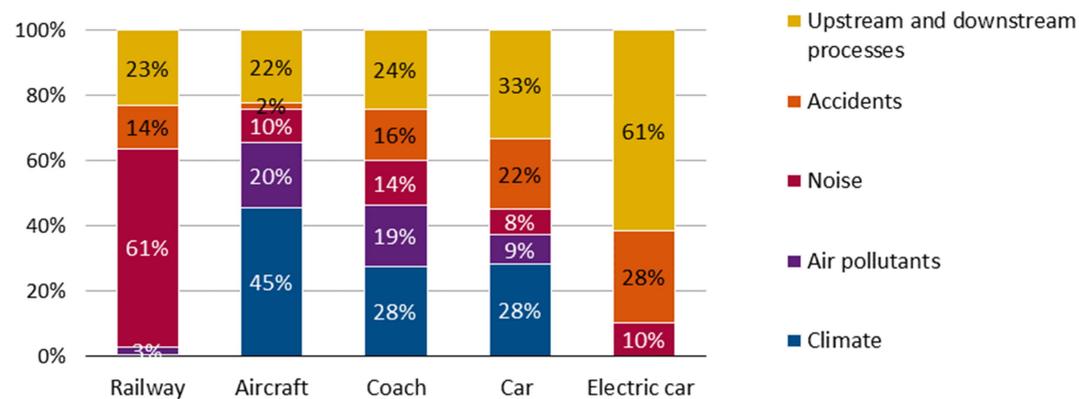


Graphique INFRAS

La figure 16 indique, pour chaque moyen de transport, la part des différentes catégories de coût dans les coûts environnementaux et des accidents totaux. Pour le train, les nuisances sonores représentent environ 61% des coûts, suivis par les processus en amont et en aval avec environ 23% (pour la production d'énergie, le matériel roulant et les infrastructures), puis par les accidents avec 14%. Les coûts directement liés à la pollution atmosphérique et ceux liés au climat viennent s'ajouter à ces valeurs. En matière de trafic aérien, les coûts climatiques constituent la plus large part des coûts environnementaux et des accidents, avec approximativement 45%. Les coûts liés aux polluants atmosphériques s'élèvent à 20% des coûts totaux, contre 22% pour les processus en amont et en aval, et 2% pour les accidents. Pour le car, les proportions sont les suivantes: les coûts climatiques représentent la part la plus importante des coûts totaux avec 28%, contre 24% pour les processus en amont et en aval, 19% pour la pollution atmosphérique, 16% pour les accidents, et 14% environ pour les nuisances sonores. Les chiffres sont

sensiblement les mêmes pour la voiture traditionnelle avec moteur à énergie fossile. Les coûts climatiques représentent 28% des coûts totaux, les processus en amont et en aval 33%, les accidents environ 22%, la pollution atmosphérique quelque 9%, et les nuisances sonores 8%. La voiture électrique ne génère pas de coûts climatiques ou en matière de pollution atmosphérique lors de son fonctionnement direct. 61% des coûts proviennent des processus en amont et en aval et 28% des accidents, tandis que 10% proviennent des coûts liés aux nuisances sonores.

Figure 16: Part des différentes catégories de coûts dans les coûts environnementaux et des accidents totaux (Genève–Paris)

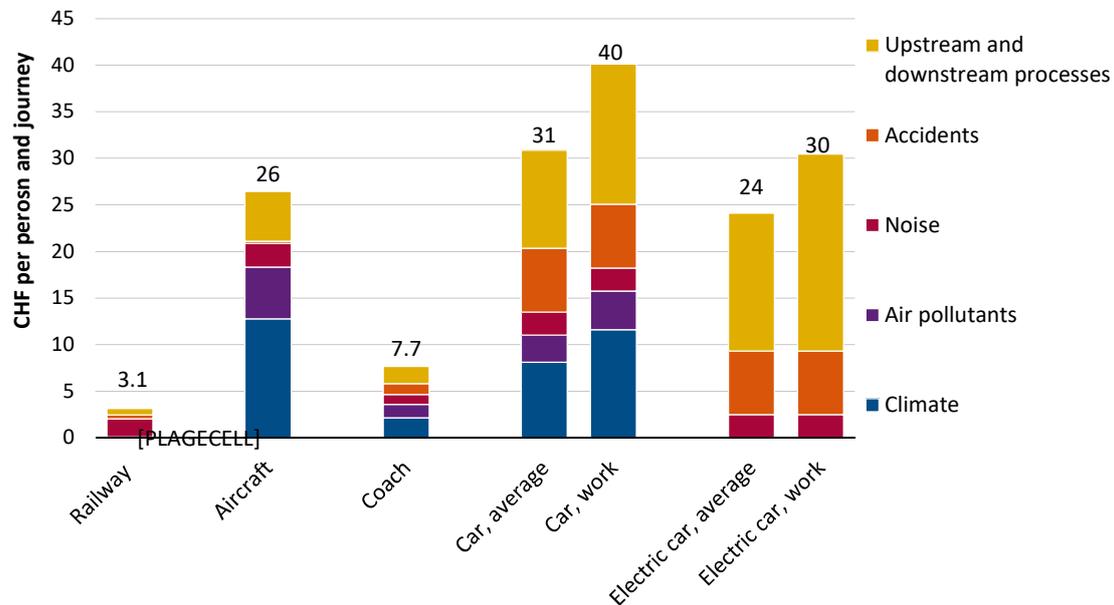


Graphique INFRAS

Zurich–Paris

La figure 17 présente les coûts environnementaux et des accidents totaux pour chaque moyen de transport, avec prise en compte des différentes catégories de coûts. Un trajet à bord du TGV de Zurich jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents d'environ CHF 3.10 par personne. Un trajet en car génère des coûts d'environ CHF 7.70 par personne. Opter pour un trajet en voiture électrique entraîne une moyenne de coûts environnementaux et des accidents (taux d'occupation de 1,6 personne par voiture) de CHF 24 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 30. Concernant une voiture traditionnelle avec moteur à combustion, et pour une occupation moyenne, les coûts sont d'environ CHF 31 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts environnementaux et des accidents augmentent jusqu'à CHF 40. Il convient de mentionner le fait que, quel que soit le type de voiture, les coûts sont réduits de manière considérable si le taux d'occupation augmente (2 à 5 personnes par véhicule). Un trajet par les airs depuis Zurich jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents de quelque CHF 26 par personne.

Figure 17: Coûts environnementaux et des accidents par personne et par trajet en fonction du moyen de transport pour le trajet Zurich–Paris

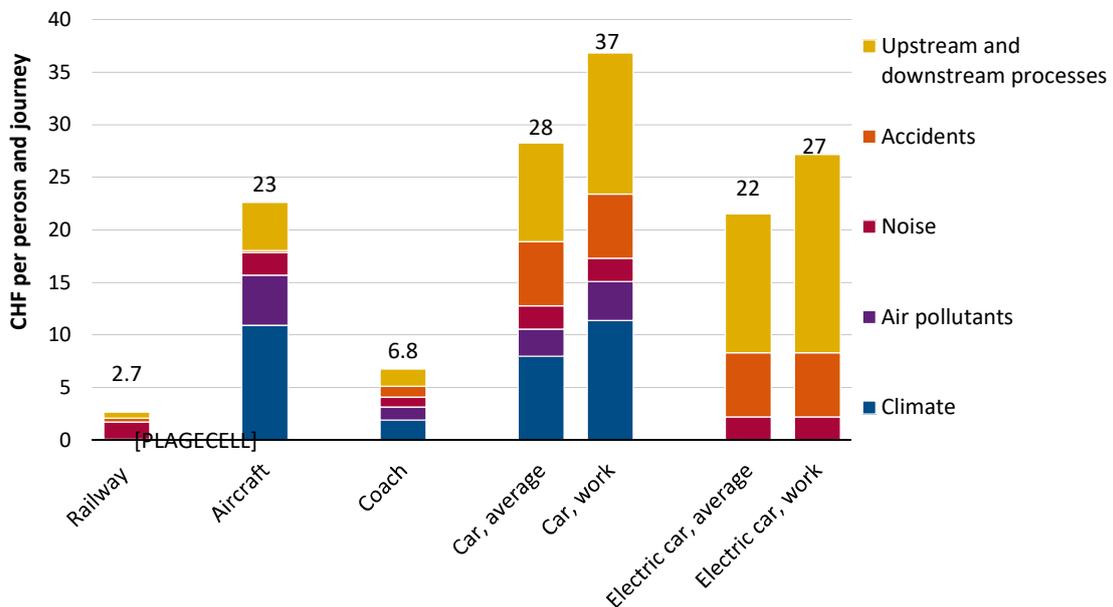


Graphique INFRAS

Bâle–Paris

Un trajet à bord du TGV depuis Bâle jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents d'environ CHF 2.70 par personne.. Un trajet en car génère des coûts d'environ CHF 6.80 par personne. Choisir de se déplacer en voiture électrique (taux d'occupation de 1,6 personne par véhicule) entraîne des coûts environnementaux et des accidents moyens de CHF 22 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 27. Concernant une voiture traditionnelle avec moteur à combustion, et pour une occupation moyenne, les coûts sont d'environ CHF 28 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 37 par personne. Un trajet par les airs depuis Bâle jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents de quelque CHF 23 par personne.

Figure 18: Coûts environnementaux et des accidents par personne et par trajet en fonction du moyen de transport pour le trajet Bâle–Paris

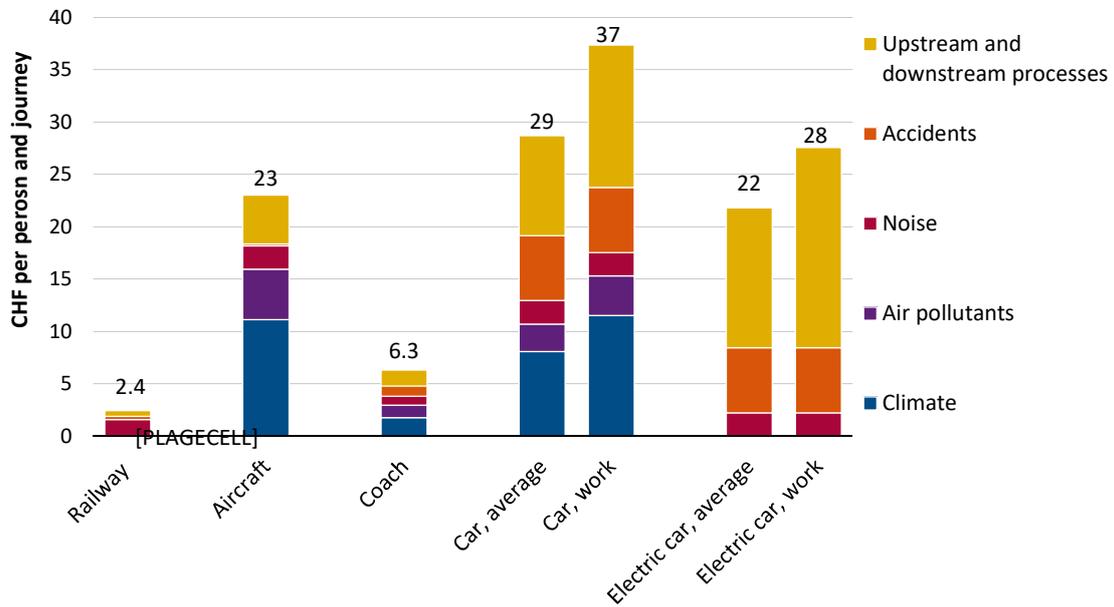


Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

Un trajet à bord du TGV depuis Lausanne jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents d'environ CHF 2.40 par personne. Un trajet en car génère des coûts d'environ CHF 6.30 par personne. Pour une voiture électrique (taux d'occupation de 1,6 personne par véhicule), les coûts environnementaux et des accidents moyens sont de CHF 22 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 28. Concernant une voiture traditionnelle avec moteur à combustion, les coûts s'élèvent à environ CHF 29 par personne pour une occupation moyenne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 37. Un trajet par les airs depuis Lausanne jusqu'à Paris produit des coûts environnementaux et des accidents de quelque CHF 23 par personne.

Figure 19: Coûts environnementaux et des accidents par personne et par trajet en fonction des moyens de transport pour le trajet Lausanne–Paris

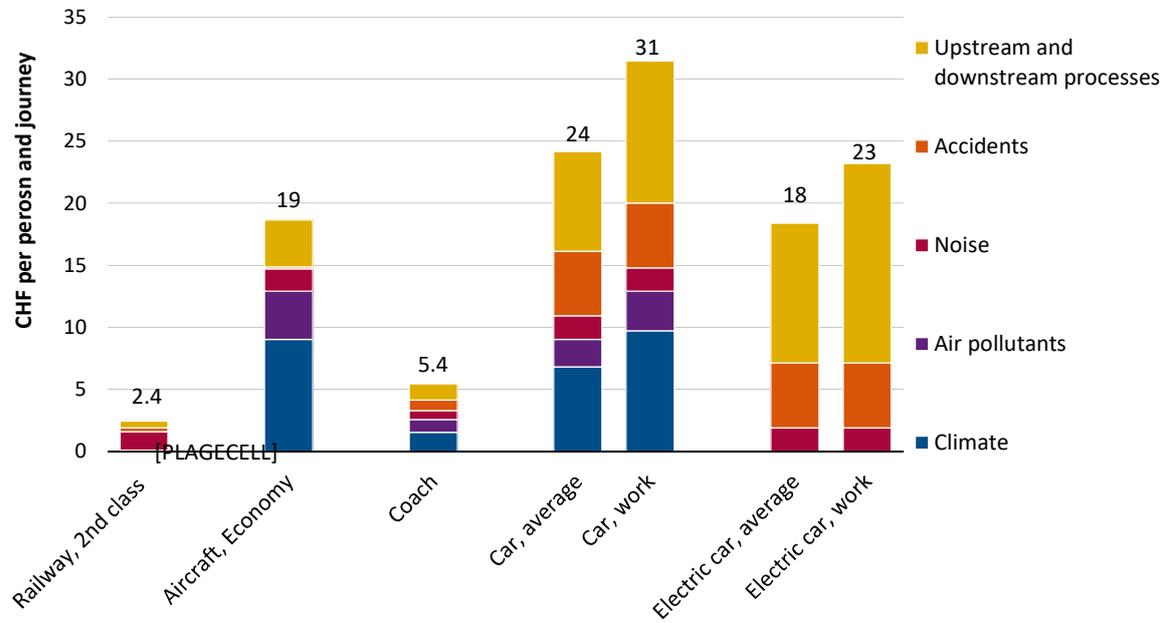


Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Un trajet à bord du TGV depuis Genève jusqu'à Marseille produit des coûts environnementaux et des accidents d'environ CHF 2.40 par personne. Un trajet en car génère des coûts d'environ CHF 5.40 par personne. Choisir de se déplacer en voiture électrique (taux d'occupation de 1,6 personne par véhicule) entraîne des coûts environnementaux et des accidents moyens de CHF 18 par personne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 23. Concernant une voiture traditionnelle avec moteur à combustion, les coûts sont d'environ CHF 24 par personne pour une occupation moyenne. Avec une occupation plus faible pour les voyages d'affaires, ces coûts augmentent jusqu'à CHF 31 par personne. Un trajet par les airs depuis Genève jusqu'à Marseille produit des coûts environnementaux et des accidents de quelque CHF 19 par personne.

Figure 20: Coûts environnementaux et des accidents par personne et par trajet en fonction des moyens de transport pour le trajet Genève–Marseille



Graphique INFRAS

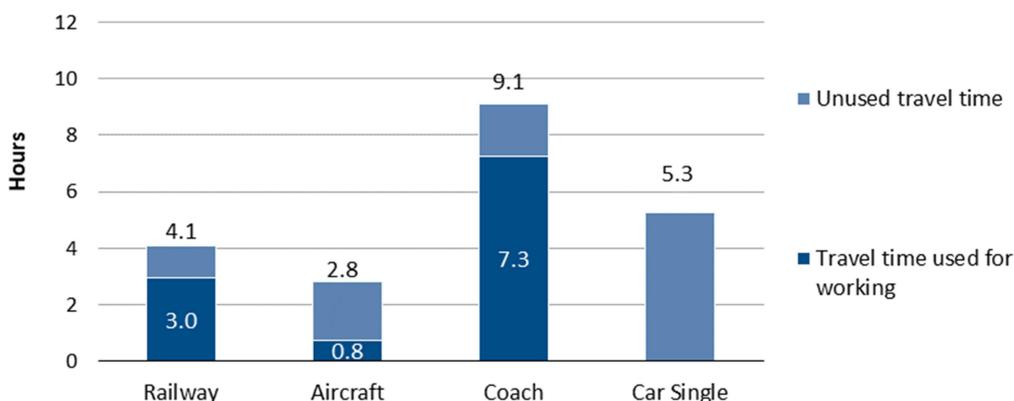
3.4. Temps de trajet et temps de travail

La part du temps de trajet total qui peut être utilisée pour travailler peut se révéler être un critère majeur dans le choix du moyen de transport pour les personnes en voyage d'affaires. Il faut aussi noter le fait que le temps de trajet utilisable présente un avantage certain d'un point de vue économique. C'est la raison pour laquelle ce chapitre présente, pour chaque moyen de transport, la part du temps de trajet pouvant être utilisée pour le travail. Les parcours qui précèdent et qui suivent le trajet principal sont également intégrés aux calculs mais, de manière réaliste, aucun temps de travail utilisable n'a été calculé pour ceux-ci. Travailler pendant un trajet se définit comme un travail réalisé sur un appareil technique (un ordinateur portable, par exemple) et va au-delà de la conversation téléphonique. Le cas du voyage en car est spécial. Nombreux sont en effet les cars à rouler pendant la nuit. En théorie, il est possible de travailler durant ce trajet mais dans les faits, il est peu probable que cet intervalle de temps soit utilisé dans ce but. Il y a aussi des correspondances au cours de la journée, qui obligent à changer de véhicule. Il n'est par conséquent pas simple de calculer une valeur moyenne pour les trajets en car. Les exemples ci-dessous prennent pour base le cas de figure idéal, c'est-à-dire un car qui roule durant la journée et une seule correspondance au maximum.

Genève–Paris

Sur les quelque 4 heures que dure au total le trajet entre Genève et Paris (d'Annemasse à Versailles), trois heures peuvent être utilisées par les passagers du TGV pour travailler. Pour le vol en avion, une heure à peine peut être rendue productive sur les 3 heures de temps de trajet. Pour le trajet en car, sept heures environ sur les 9 au total peuvent théoriquement servir à travailler, mais ce temps est en réalité plus faible. Ce trajet est parcouru en voiture en 5 heures, et il n'est possible de travailler à aucun moment.

Figure 21: Genève–Paris: part du temps de trajet pouvant être utilisée pour travailler

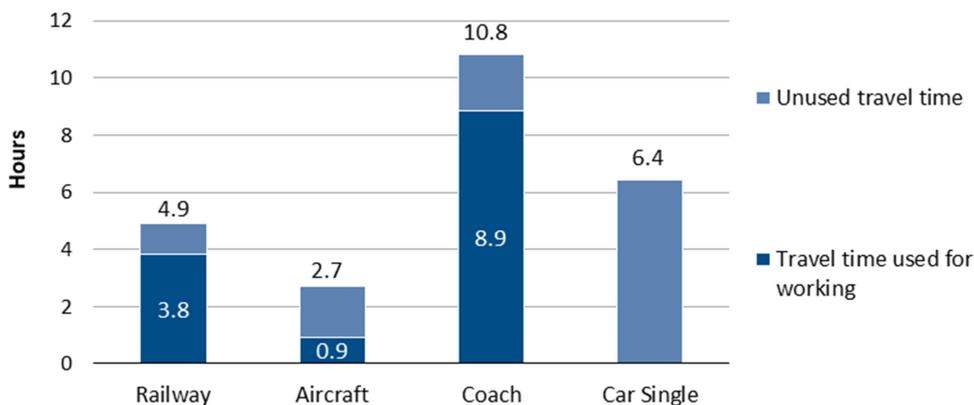


Graphique INFRAS

Zurich–Paris

Proportionnellement, le train est le moyen de transport qui offre au voyageur le temps de travail potentiel le plus important. Sur les 5 heures de trajet du centre-ville de Zurich à Boulogne-Billancourt, quatre heures sont utilisables pour travailler. Le temps de trajet en avion est celui qui est le plus court pour cet itinéraire; à peine une heure de celui-ci peut cependant être utilisée pour travailler. En car, il est théoriquement possible de travailler pendant neuf heures sur les 11 que dure le trajet. Dans les faits, cette durée est moindre. Ce trajet est parcouru en voiture en 6,4 heures, et il n'est possible de travailler à aucun moment.

Figure 22: Zurich–Paris: part du temps de trajet pouvant être utilisée pour travailler

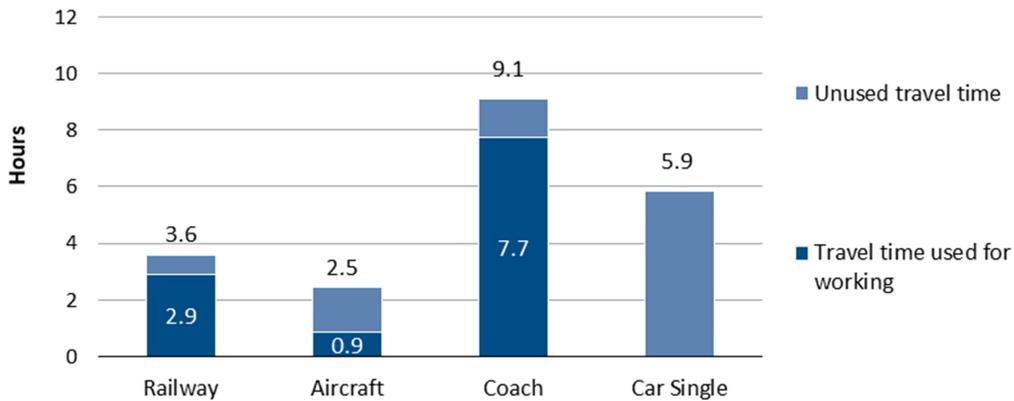


Graphique INFRAS

Bâle–Paris

Sur les 3,6 heures de trajet depuis Reinach BL jusqu'au centre-ville de Paris, trois heures sont utilisables par les passagers du TGV pour travailler. Pour le vol en avion, une heure à peine peut être rendue productive sur les 2,5 heures de temps de trajet. En car, près de huit heures sur les 9 que dure le trajet au total peuvent être théoriquement utilisées pour travailler; en pratique, ce volume est moins important. Ce trajet est parcouru en voiture en 6 heures, et il n'est possible de travailler à aucun moment.

Figure 23: Bâle–Paris: part du temps de trajet pouvant être utilisée pour travailler

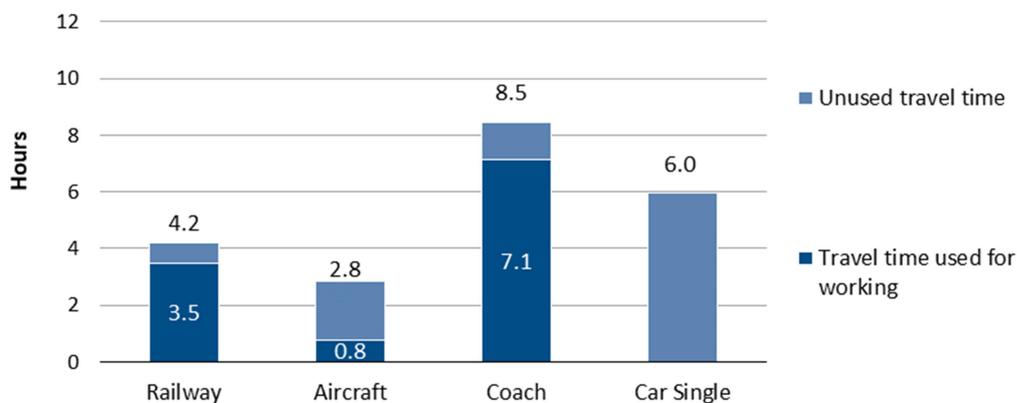


Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

Sur les plus de 4 heures de trajet depuis Lausanne jusqu'à Paris (de Montreux au centre-ville de Paris), trois heures et demie sont utilisables par les passagers du TGV pour travailler. Pour le vol en avion, une heure à peine peut être rendue productive sur les 3 heures de temps de trajet. Pour le trajet en car, sept heures environ sur les 8,5 au total peuvent théoriquement servir à travailler, mais ce temps est en réalité plus faible. Ce trajet est parcouru en voiture en 6 heures, et il n'est possible de travailler à aucun moment.

Figure 24: Lausanne–Paris: part du temps de trajet pouvant être utilisée pour travailler

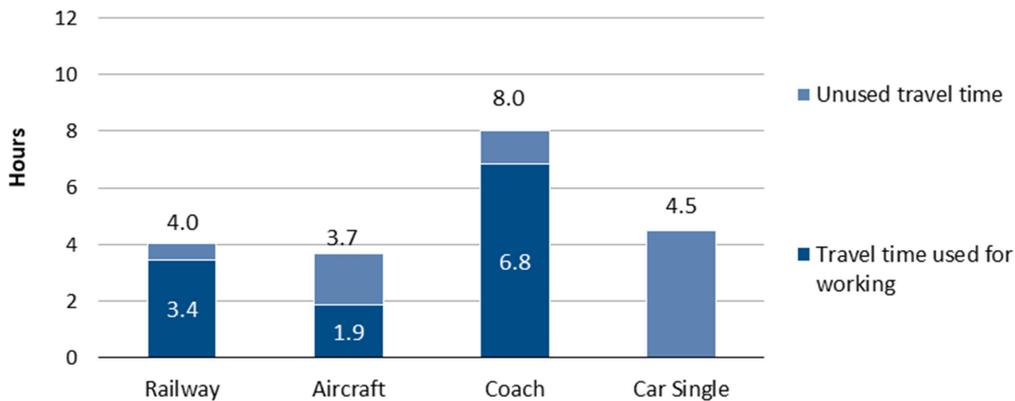


Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Sur les 4 heures de trajet depuis Genève jusqu'à Marseille (de Nyon au centre-ville de Marseille), trois heures et demie sont utilisables par les passagers du TGV pour travailler. Pour le vol en avion, deux heures environ peuvent être rendue productives sur les 4 heures de temps de trajet. Pour le trajet en car, 7 heures environ sur les 8 au total peuvent théoriquement servir à travailler, mais ce temps est en réalité plus faible. Ce trajet est parcouru en voiture en 4,5 heures, et il n'est possible de travailler à aucun moment.

Figure 25: Genève–Marseille: part du temps de trajet pouvant être utilisée pour travailler



Graphique INFRAS

4. Conclusions

Les analyses menées au cours de la comparaison écologique entre les moyens de transport, plus précisément entre le train (TGV Lyria), le car, la voiture et l'avion, pour cinq trajets différents entre la Suisse et la France permettent de dresser les constats suivants:

- Lors de la comparaison par personne et par trajet, le taux d'occupation des véhicules est une variable majeure. Les moyens de transport que sont le TGV, le car et l'avion ont en général un taux d'occupation élevé, tandis que l'occupation de la voiture est habituellement plus faible (1,6 personne par véhicule). Une augmentation significative de l'occupation du TGV, par exemple avec des rames à double étage, aura pour effet d'améliorer considérablement le bilan du train.
- Pour les taux d'occupation moyens actuels des moyens de transport comparés dans l'étude (ancienne et nouvelle flottes du TGV), le rail, c'est-à-dire le TGV, est de loin le plus bénéfique pour l'environnement en termes d'**empreinte climatique**. À quelques différences près selon le trajet, les émissions de gaz à effet de serre par personne (processus préliminaires inclus) lors d'un trajet (parcours principal) en TGV sont inférieures d'environ 4 à 6 fois à celles du car, entre 7 et 12 fois à celles de la voiture électrique, approximativement de 16 à 27 fois à celles de la voiture traditionnelle avec moteur à carburant fossile, et de 16 à 28 fois à celles de l'avion. Du point de vue de la protection du climat, un trajet en TGV est le plus avantageux pour les trajets au cœur de l'étude. Les parcours qui précèdent et qui suivent sont presque négligeables par rapport aux parcours principaux étudiés.
- En termes de **bilan énergétique**, l'énergie finale des différents moyens de transport est évaluée car l'étude visait à comparer l'efficacité énergétique des moyens de transport, et non l'efficacité des divers systèmes énergétique en arrière-plan. Cela signifie que l'on compare l'efficacité d'un moteur électrique avec celle d'un moteur à combustion, et non la production d'électricité avec la production de gazole. Sur cette base, la comparaison entre les consommations d'énergie finale fait apparaître que le train (TGV) affiche l'efficacité énergétique la plus élevée. Il est suivi par le car (+30% à 70%) et la voiture électrique (+40% à 90%). L'efficacité énergétique par personne et par trajet de la voiture traditionnelle à moteur à combustion est environ 4 à 5 fois inférieure, celle de l'avion entre 7 et 10 fois.
- Afin de pouvoir identifier les **coûts environnementaux et des accidents** par personne et par trajet, les cinq catégories de coûts suivantes ont été prises en compte: climat, polluants atmosphériques, nuisances sonores, accidents, et processus en amont et en aval. Les voyages en TGV génèrent également les coûts environnementaux et des accidents les plus faibles par personne et par trajet, pour tous les trajets étudiés. Cela s'explique en grande partie par le fait que le TGV ne génère presque aucun coût lié au climat, aux polluants atmosphériques et aux accidents du fait de son fonctionnement direct, alors que ces catégories comptent pour la majeure partie des coûts pour les autres moyens de transport.

Les coûts environnementaux et des accidents du car s'élèvent à un peu plus du double de ceux du TGV, alors qu'ils sont presque 7 fois supérieurs dans le cas de la voiture électrique, et environ 7 fois supérieurs dans le cas de l'avion. La voiture traditionnelle (essence / diesel) affiche des coûts environ 9 fois plus élevés que ceux du TGV.

- **L'utilisation productive du temps de trajet pour le travail** devrait être pour les entreprises un critère orientant le choix du moyen de transport privilégié pour les voyages d'affaires. L'étude a examiné le temps de trajet dans son ensemble, y compris les parcours qui précèdent et qui suivent le trajet principal. Lors d'un voyage en train, il est possible d'utiliser environ 80% du temps de trajet total pour travailler. Ce chiffre est sensiblement le même pour le car. Il convient toutefois de préciser que les cars roulent souvent de nuit pour les trajets étudiés et que le temps indiqué comme utilisable pour le travail n'est donc que purement théorique; dans les faits, le temps disponible pour travailler est bien moindre. Concernant l'avion, 35% environ seulement du temps de trajet total peuvent être utilisés pour travailler. On entend par la notion de «travail productif» le fait de travailler sur un appareil technique (ordinateur portable, etc.) et de réaliser des tâches qui vont au-delà d'une conversation téléphonique. Voyager en voiture ne présente donc pas de possibilité de temps de travail utilisable.
- Au niveau de la **comparaison globale** entre les trajets pour le trafic à grande distance étudiés, le rail, c'est-à-dire TGV Lyria, occupe la première place dans tous les domaines et pour tous les trajets. Le TGV est clairement le mieux classé en termes d'empreinte climatique mais aussi de coûts environnementaux et des accidents. En matière d'environnement, le moyen de transport le plus proche du train est le car, bien que ses émissions de gaz à effet de serre et ses coûts environnementaux soient 2 à 4 fois supérieurs. La voiture et l'avion affichent une empreinte climatique et environnementale largement inférieure à celle du train (TGV Lyria). La voiture électrique affiche une meilleure empreinte climatique et des coûts environnementaux plus bas que la voiture essence ou diesel. L'empreinte climatique et les coûts environnementaux de la voiture électrique restent toutefois invariablement 7 fois moins bons que ceux du TGV pour les trajets étudiés. Pour le trafic international à grande distance, le train est par conséquent actuellement bien plus avantageux que la voiture d'un point de vue environnemental, même avec l'avancée de l'électrification de la voiture. L'avantage que présente le train vis-à-vis de l'environnement est tout aussi significatif par rapport à l'avion.

Annexe

Empreintes climatiques pour chaque trajet selon la source des émissions

Zurich–Paris

Tableau 7: Émissions de gaz à effet de serre Zurich–Paris selon la source des émissions

kg équiv. CO ₂ / personne	Rail, flotte existante	Rail, nouvelle flotte	Avion	Car	Voiture, moyenne	Voiture, travail	Voiture électrique, moyenne	Voiture électrique, travail
Émissions de l'exploitation directe	0	0	93.4	15.7	65.3	93.2	0	0
Approvisionnement énergétique	1.7	1.2	16	3.0	10.5	15	9	13
Production véhicules et infrastructures	4.6	3.2	3.5	4.8	27	38	37	53
Total	6.3	4.3	112	24	103	146	46	65
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.7</i>	<i>1.2</i>	<i>109</i>	<i>19</i>	<i>76</i>	<i>108</i>	<i>9</i>	<i>13</i>

Bâle–Paris

Tableau 8: Émissions de gaz à effet de serre Bâle–Paris selon la source des émissions

kg équiv. CO ₂ / personne	Rail, nouvelle flotte	Rail, flotte existante	Avion	Car	Voiture, moyenne	Voiture, travail	Voiture électrique, moyenne	Voiture électrique, travail
Émissions de l'exploitation directe	0	0	80	14	58	83	0	0
Approvisionnement énergétique	1.4	1.0	13	2.7	9.4	13	8	11
Production véhicules et infrastructures	4.0	2.7	3.0	4.2	24	34	33	47
Total	5.4	3.7	96	21	91	131	41	58
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.4</i>	<i>1.0</i>	<i>93</i>	<i>16</i>	<i>68</i>	<i>97</i>	<i>8</i>	<i>11</i>

Lausanne–Paris

Tableau 9: Émissions de gaz à effet de serre Lausanne–Paris selon la source des émissions

kg équiv. CO ₂ /personne	Rail, ancienne flotte	Rail, nouvelle flotte	Avion	Car	Voiture, moyenne	Voiture, travail	Voiture électrique, moyenne	Voiture électrique, travail
Émissions de l'exploitation directe	0	0	81	13	59	84	0	0
Approvisionnement énergétique	1.3	0.9	14	2.5	9.5	14	8	12
Production véhicules et infrastructures	3.6	2.5	3.1	3.9	24	35	33	48
Total	4.9	3.3	98	19	93	133	42	59
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.3</i>	<i>0.9</i>	<i>95</i>	<i>15</i>	<i>69</i>	<i>98</i>	<i>8</i>	<i>12</i>

Genève–Marseille

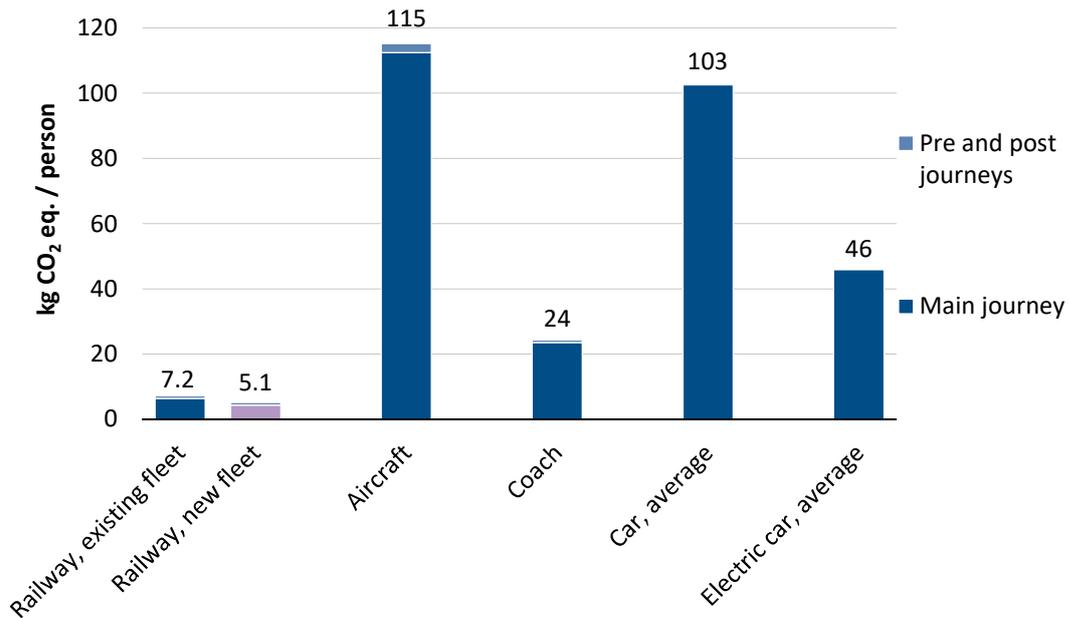
Tableau 10: Émissions de gaz à effet de serre Genève–Marseille selon la source des émissions

kg équiv. CO ₂ /personne	Rail, ancienne flotte	Rail, nouvelle flotte	Avion	Car	Voiture, moyenne	Voiture, travail	Voiture électrique, moyenne	Voiture électrique, moyenne
Émissions de l'exploitation directe	0	0	66	11	50	71	0	0
Approvisionnement énergétique	1.3	0.9	11	2.1	8.0	11	7	10
Production véhicules et infrastructures	3.6	2.4	2.5	3.4	20	29	28	40
Total	4.9	3.3	79	17	78	112	35	50
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.3</i>	<i>0.9</i>	<i>77</i>	<i>13</i>	<i>58</i>	<i>83</i>	<i>7</i>	<i>10</i>

Empreintes climatiques selon chaque trajet, en amont et en aval

Zurich–Paris

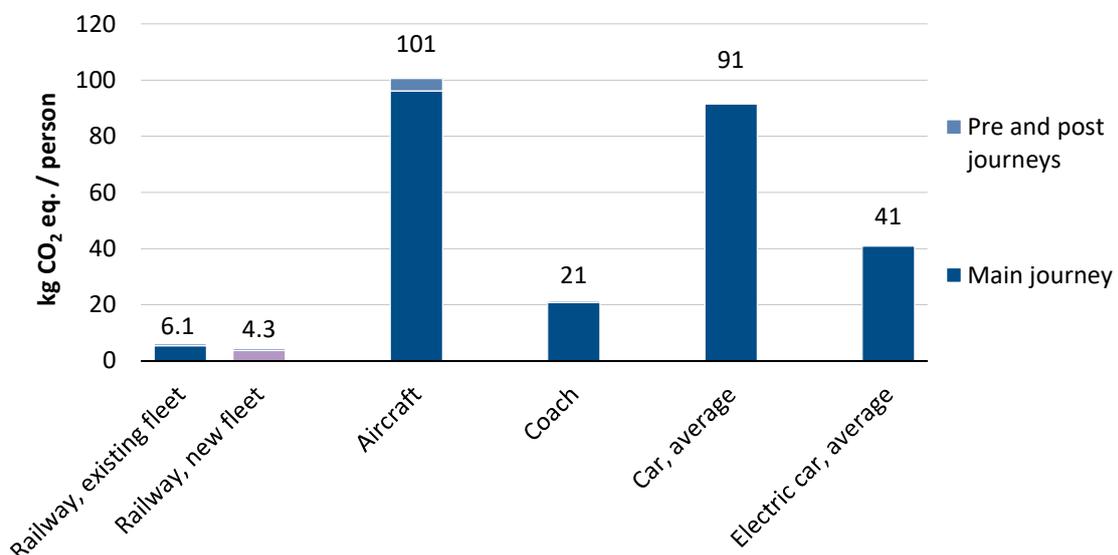
Figure 26: Zurich–Paris: Valeurs moyennes selon le moyen de transport (empreinte climatique en équiv. CO₂ par personne et trajet)



Graphique INFRAS

Bâle–Paris

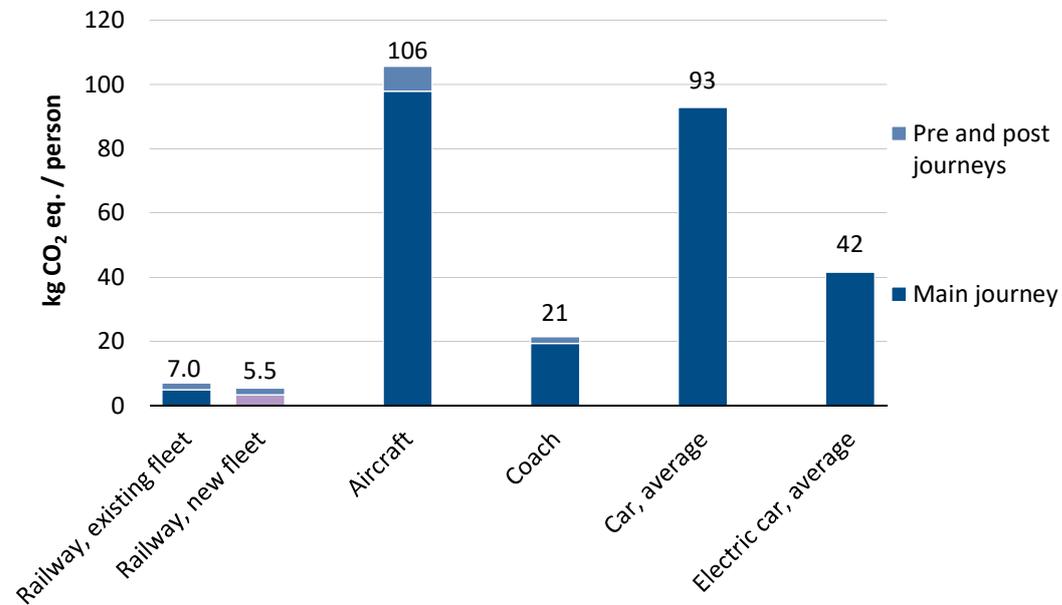
Figure 27: Bâle–Paris: Valeurs moyennes selon le moyen de transport (empreinte climatique en équiv. CO₂ par personne et trajet)



Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

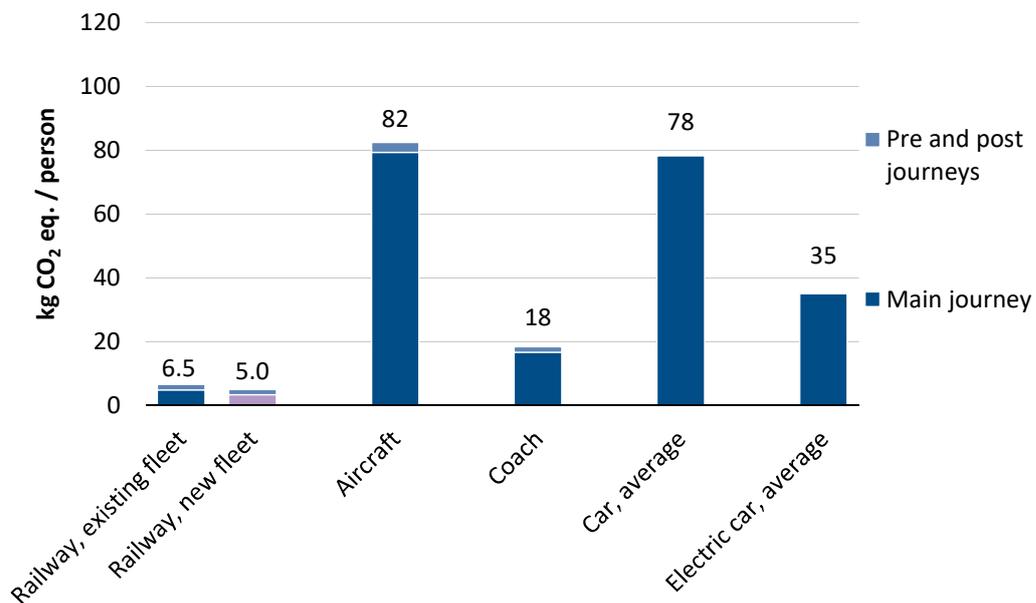
Figure 28: Lausanne–Paris: Valeurs moyennes selon le moyen de transport (empreinte climatique en équiv. CO₂ par personne et trajet)



Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Figure 29: Genève–Marseille: Valeurs moyennes selon le moyen de transport (empreinte climatique en équiv. CO₂ par personne et trajet)

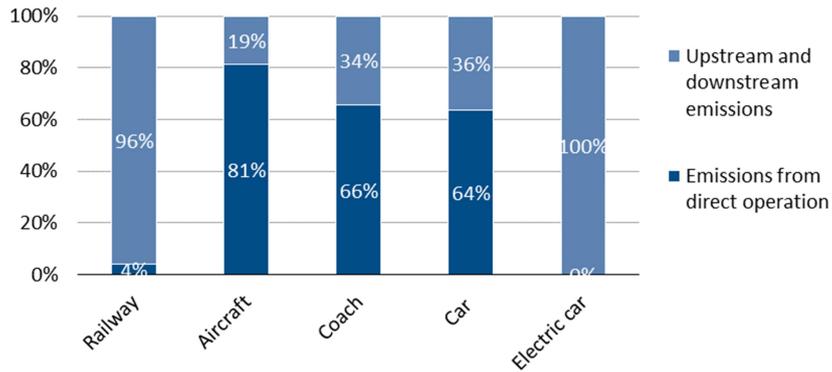


Graphique INFRAS

Part des émissions de GES en amont et en aval

Zurich–Paris

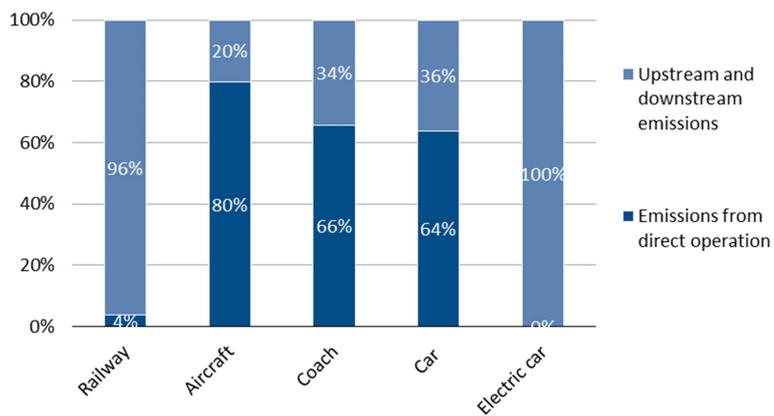
Figure 30: Zurich–Paris: Part des émissions de GES en amont et en aval sur le total des émissions de GES



Graphique INFRAS

Bâle–Paris

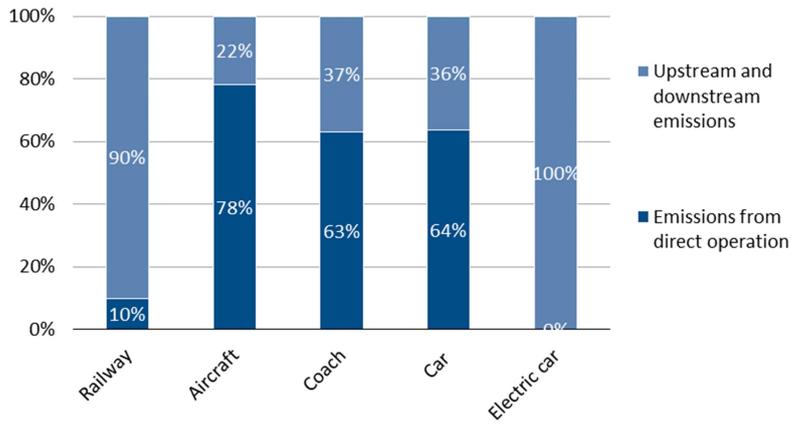
Figure 31: Bâle–Paris: Part des émissions de GES en amont et en aval sur le total des émissions de GES



Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

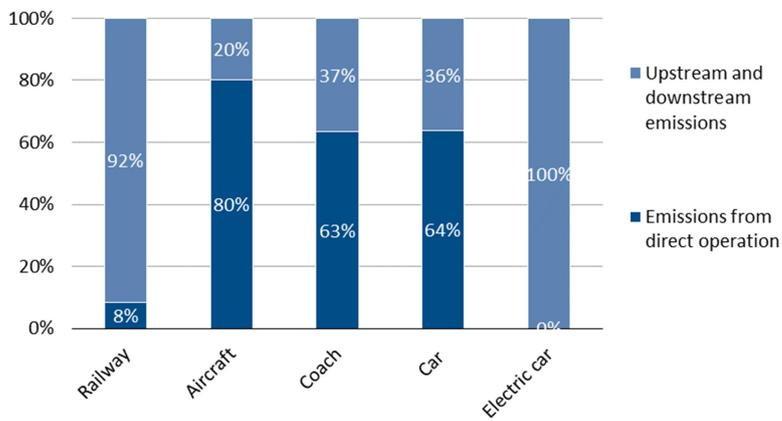
Figure 32: Lausanne–Paris: Part des émissions de GES en amont et en aval sur le total des émissions de GES



Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Figure 33: Genève–Marseille: Part des émissions de GES en amont et en aval sur le total des émissions de GES

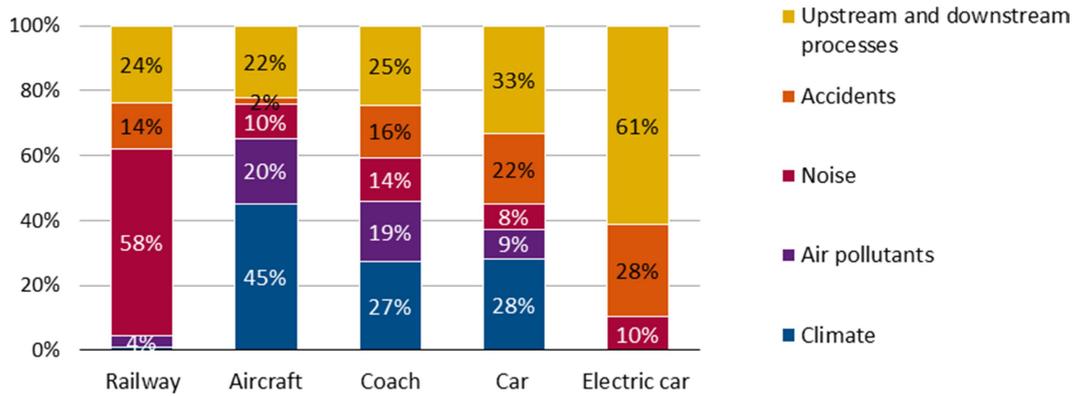


Graphique INFRAS

Proportions pour les différentes catégories de coûts

Zurich–Paris

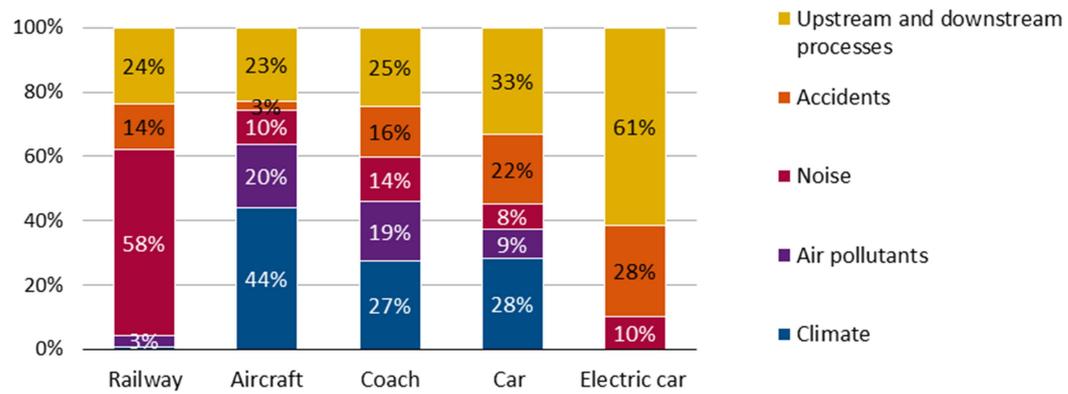
Figure 34: Zurich–Paris: proportion des différentes catégories de coûts dans les coûts environnementaux totaux



Graphique INFRAS

Bâle–Paris

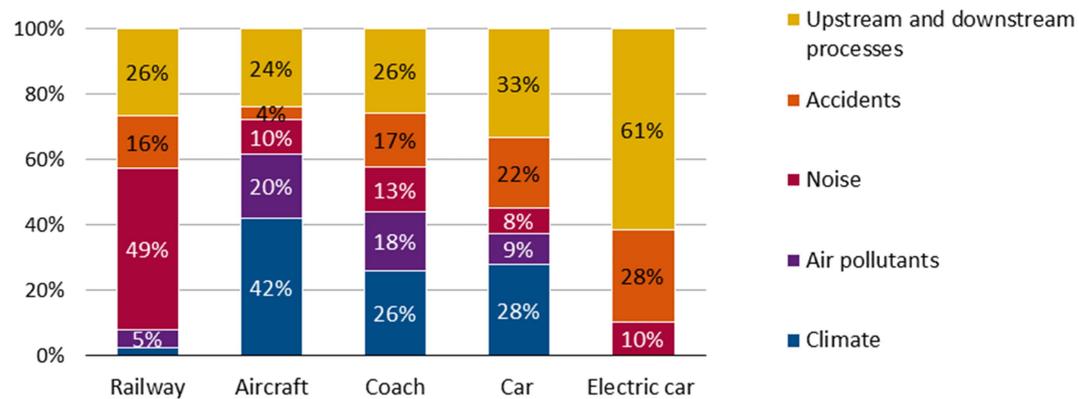
Figure 35: Bâle–Paris: proportion des différentes catégories de coûts dans les coûts environnementaux totaux



Graphique INFRAS

Lausanne–Paris

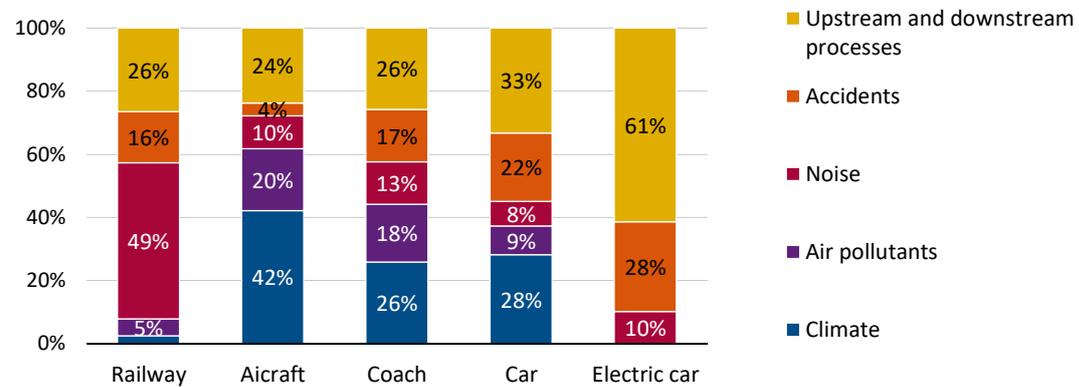
Figure 36: Lausanne–Paris: proportion des différentes catégories de coûts dans les coûts environnementaux totaux



Graphique INFRAS

Genève–Marseille

Figure 37: Genève–Marseille: proportion des différentes catégories de coûts dans les coûts environnementaux totaux



Graphique INFRAS

Bibliographie

- Atmosfair 2019:** Calculs relatifs aux voyages d'affaires en avion par l'EPF Zurich, non publié.
- ARE 2018:** Effets externes des transports 2015, monétarisation des effets sur l'environnement, les accidents et la santé, Ecoplan et INFRAS, pour le compte de l'Office fédéral du développement territorial (ARE), Berne.
- Bieler, C., Sutter, D. 2018:** Les coûts environnementaux des transports en Allemagne, documentation de consultation sur la Convention méthodologique 3.0, Agence fédérale pour l'environnement, septembre 2018.
- DG MOVE 2019:** Manuel des coûts externes du transport, version 2019, Commission européenne, Direction générale de la mobilité et des transports, Delft, janvier 2019.
- Kuik et al. 2009:** Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis. O. Kuik, L. Brander, R.S.J. Tol. Energy Policy, vol. 37, Iss. 4 (2009), pp. 1395–1403.
- mobitool:** plateforme suisse pour les outils de gestion de la mobilité et les données environnementales traitées; engagement commun des organes responsables des CFF, de Swisscom, d'EnergieSchweiz, de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et du Réseau pour une économie durable (öbu). En ligne: <https://www.mobitool.ch>
- INFRAS 2019a:** Coûts externes des transports en Allemagne, mise à jour pour 2018, pour le compte de Pro-Rail Alliance, Zurich, 2019.
- INFRAS 2019b:** HBEFA 4.1. Handbook of Emission Factors for Road Transport. Infrac, Bern. [www.hbefa.net].
- INFRAS, Quantis 2020:** Conséquences des véhicules sur l'environnement en milieu urbain, rapport final, projet de recherche, Berne, Villigen, Zurich, pas encore publié.
- UBA 2019:** Convention méthodologique 3.0 pour l'identification des coûts environnementaux – taux de coûts, version de février 2019, Agence fédérale de l'environnement, Dessau-Rosslau, février 2019.