

TGV Lyria

Comparaison écologique des modes de transport sur certaines routes entre la France et la Suisse

Projet de rapport final
Zurich, 4 juin 2024

Ursina Walther, Alexandra Zwankhuizen, Anne Greinus

Impressum

Comparaison écologique des modes de transport sur certaines routes entre la France et la Suisse

Projet de rapport final

Zurich, 4 juin 2024

Comparaison_écologique_modes_transport_TGVLyria_2023_FR.docx

Mandant

TGV Lyria

Direction du projet

Cécile Morel, Gert Fässler, TGV Lyria

Auteurs

Ursina Walther, Alexandra Zwankhuizen, Anne Greinus

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Contenu

Résumé	4
1. Contexte et objectif	7
2. Approche méthodologique	8
2.1. Concept	8
2.2. Approche méthodologique	8
3. Résultats	18
3.1. Empreinte climatique	18
3.2. Bilan énergétique	28
3.3. Coûts environnementaux et coûts liés aux accidents	34
3.4. Temps de trajet et temps exploitable	41
4. Conclusions	46
Annexe	49
Bibliographie	58

Résumé

L'étude comprend une comparaison écologique des modes de transport sur cinq routes transnationales entre la Suisse et la France. Mandatée par TGV Lyria, INFRAS a réalisé cette comparaison sur la base de données scientifiques actuelles et compatibles avec la norme européenne SN EN 16258 relative au calcul de l'impact climatique des services de transport. Les cinq trajets sont desservis par TGV Lyria. Le train, plus particulièrement le TGV, est comparé aux autres modes de transport que sont les bus longue distance, les voitures et les avions. Pour les voitures, une distinction est faite entre les modes de propulsion électrique et conventionnelle/thermique (essence, diesel). L'étude compare les différents modes de transport en termes de bilan climatique, de bilan énergétique final, de coûts environnementaux et d'accidents ainsi que de temps de trajet, y compris le temps de travail utilisable. Dans un deuxième temps, le trajet en amont et en aval du trajet principal, c'est-à-dire le trajet vers et depuis la gare ou l'aéroport, est pris en compte. Les résultats montrent que le trajet principal domine nettement l'impact climatique et environnemental et que l'impact des trajets en amont et en aval du trajet principal n'a qu'une importance secondaire dans le résultat global. Pour les trajets en voiture, deux taux d'occupation sont considérés : un taux d'occupation correspondant à la moyenne selon les statistiques (1,53 personne par véhicule) ainsi qu'un taux d'occupation réduit pour les voyages professionnels (1,09 personne par véhicule).

Tableau 1 donne un aperçu de l'empreinte climatique des modes de transport pour tous les itinéraires examinés.

Tableau 1 : Vue d'ensemble de l'empreinte climatique par itinéraire

Trajet	Bilan climatique (Kg d'eq CO ₂ / Personne)							
	Train	Avion	Bus	Voiture therm. Ø	Voiture therm. travail	Voiture électr. Ø	Voiture électr. travail	
Genève-Paris		2.6	114.8	15.1	98.8	138.7	56.5	79.4
Lausanne-Paris		2.4	114.8	15.1	98.4	138.2	51.2	71.9
Bâle-Paris		2.7	112.8	16.1	97.0	136.1	50.4	70.8
Zurich-Paris		3.1	131.9	18.3	108.7	152.6	56.5	79.4
Lausanne-Marseille		2.9	93.0	16.0	108.0	151.6	56.2	78.8

Tableau INFRAS

La comparaison de l'empreinte climatique des différents modes de transport montre que le rail (TGV Lyria) est clairement celui qui produit le moins d'émissions CO₂-éq par personne et par trajet. Les émissions de gaz à effet de serre émises par personne pour un voyage en TGV Lyria sont environ 6 fois inférieures à celles des bus, environ 20 fois inférieures à celles de la voiture

électrique moyenne, environ 36 fois inférieures à celles de la voiture conventionnelle moyenne et environ 41 fois inférieures à celles de l'avion. Du point de vue de la protection du climat, c'est le trajet en TGV Lyria qui se présente comme le plus avantageux sur les trajets examinés. Il reste à noter que le TGV Lyria ainsi que les voitures électriques ne produisent pas d'émissions directes lors de leur fonctionnement et ne présentent que de très faibles émissions lors de la production d'énergie nécessaire pour l'électricité utilisée. L'essentiel des émissions de ces deux modes de transport provient de la production des infrastructures et des véhicules¹.

Les effets sur l'environnement, comme les émissions de gaz à effet de serre, entraînent des coûts qui ne sont pas portés par le responsable des émissions, mais par la collectivité. Ces coûts dits externes ou **les coûts environnementaux et les coûts liés aux accidents** sont calculés et comparés pour les trajets utilisant les différents modes de transport. Le Tableau 2 donne un aperçu des résultats pour tous les trajets.

Tableau 2 : Aperçu des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents

Trajet	Coûts environnementaux et coûts liés aux accidents (CHF/personne)						
	Train	Avion	Bus	Voiture Ø	Voiture travail	Voiture électr. Ø	Voiture électr. travail
Genève-Paris	2.6	29.0	5.1	31.0	40.3	22.9	28.8
Lausanne-Paris	3.1	30.9	5.7	30.9	40.1	22.8	28.7
Bâle-Paris	2.9	29.3	5.6	30.4	39.5	22.4	28.3
Zurich-Paris	3.4	33.5	6.4	34.1	44.3	25.1	31.7
Lausanne-Marseille	4.4	26.2	6.8	33.9	44.0	25.0	31.5

Tableau INFRAS

Les résultats montrent clairement que les coûts environnementaux et les coûts liés aux accidents générés par les déplacements en train (TGV Lyria) sont les plus faibles par rapport aux autres modes de transport. Les principales raisons en sont les coûts directs très faibles en termes de climat, de polluants atmosphériques et d'accidents pour l'exploitation des TGV, qui figurent parmi les catégories de coûts les plus importantes pour les autres modes de transport. Les coûts environnementaux et liés aux accidents pour les bus sont environ 2 fois plus élevés que ceux du TGV Lyria, ceux de la voiture électrique sont presque 9 fois plus élevés, ceux des vols également environ 10 fois plus élevés et ceux de la voiture thermique sont presque 12 fois plus élevés en comparaison au TGV Lyria.

¹ Dans les comparaisons écologiques des modes de transport, on ne tient souvent compte que des paramètres obligatoirement requis par la norme SN EN 16258 (exploitation directe et production d'énergie), ce qui explique qu'un voyage en train émette environ 70 à 100 fois moins d'émissions CO₂-ég qu'un vol sur le même trajet.

Lors du choix d'un mode de transport, le temps de trajet potentiellement utilisable («trajets exploitables»), par exemple pour travailler, présente un autre facteur important. Lorsque l'on voyage en bus, le temps disponible pour le travail est le plus élevé, mais cela est principalement dû au fait que la durée totale du voyage est élevée. Le transport en TGV Lyria offre une part très élevée de temps de trajet exploitable.

Tableau 3 : Vue d'ensemble temps du temps de trajet exploitable

Trajet	Temps de trajet exploitable (h)			
	Train	Avion	Bus	Voiture prof.
Genève-Paris	3.0	0.8	7.3	0.0
Lausanne-Paris	3.5	0.8	7.1	0.0
Bâle-Paris	2.9	0.9	7.7	0.0
Zurich-Paris	3.8	0.9	8.9	0.0
Lausanne-Marseille	4.2	1.9	6.8	0.0

Tableau INFRAS

Dans la **comparaison globale** des itinéraires longue distance considérés, le train est le mode de transport le plus performant dans tous les domaines et sur tous les trajets. Le TGV Lyria est clairement en tête de classement en termes d'empreinte climatique et de coûts environnementaux et liés aux accidents. Additionnellement, il offre un avantage supplémentaire avec un temps de trajet réduit. En termes d'environnement, le transport en bus se rapproche le plus du rail, même si ses émissions de gaz à effet de serre et ses coûts environnementaux sont nettement plus élevés. Les transports en voiture ou en avion ont un bilan climatique et environnemental nettement moins bon que les trains (TGV Lyria). Bien que les voitures électriques présentent un meilleur bilan climatique et des moindres coûts environnementaux comparées aux voitures thermiques, l'empreinte climatique et les coûts environnementaux des voitures électriques restent plus conséquents en comparaison au TGV Lyria sur les itinéraires examinés. Cela signifie que le rail conservera un net avantage environnemental sur la voiture dans le transport international à longue distance, même si l'électrification des voitures progresse. L'avantage environnemental du rail par rapport à l'avion est clairement visible dans les tableaux présentés plus haut.

1. Contexte et objectif

Dans le contexte du débat sur le climat, la comparaison écologique des différents modes de transport pour les déplacements à longue distance gagne en importance. En effet, cette comparaison, basée sur des données actuelles, fournit une base de décision non-négligeable. La présente étude révèle les résultats de la mise à jour de la comparaison écologique des modes de transport pour les trajets entre la Suisse et la France, réalisée par INFRAS en 2019 pour le compte de TGV Lyria. La comparaison porte en particulier sur l'empreinte climatique des modes de transport. Cependant, les transports n'ont pas seulement un impact sur le climat, mais également divers autres effets négatifs sur l'environnement (émissions de polluants atmosphériques, bruit, accidents, etc.). Dans le cadre de la présente étude, une comparaison entre différents modes de transport est effectuée pour des relations concrètes desservies par TGV Lyria. La comparaison porte sur les quatre paramètres suivants :

- Empreinte climatique (« bilan CO₂ »)
- Bilan énergétique
- Coûts environnementaux et liés aux accidents
- Temps exploitable (temps de déplacement productif)

L'objectif de cette mise à jour est notamment d'inclure des données réelles pour la nouvelle flotte TGV Lyria, mise en service fin 2019, mais pour laquelle aucune donnée n'était disponible lors de la première étude. La mise à jour prend également en compte la nouvelle ligne Lausanne-Marseille, qui est désormais desservie par TGV Lyria. En outre, toutes les bases de données ont été mises à jour, y compris les facteurs d'émission, les taux d'utilisation des capacités et les données de consommation d'énergie. L'étude actualisée se base donc sur les connaissances scientifiques les plus récentes concernant par exemple les émissions climatiques, les coûts environnementaux, etc. Les résultats de l'étude fournissent une base importante pour une communication informée sur la comparaison des différents modes de transport pour les itinéraires spécifiques du TGV Lyria.

2. Approche méthodologique

2.1. Concept

Le concept est basé sur une comparaison d'itinéraires pour différents modes de transport. Cela signifie que l'empreinte écologique de certains modes de transport sur les cinq mêmes itinéraires est comparée. Sont considérés d'une part les principaux moyens de transport sur les itinéraires ainsi que, d'autre part, les trajets de porte-à-porte, incluant les trajets en amont et en aval du trajet principal. Cette comparaison est effectuée sous la forme d'une empreinte climatique («bilan CO₂»), d'un bilan énergétique et de coûts environnementaux et liés aux accidents. Outre les impacts environnementaux, l'utilisation temps de voyage (basée sur le temps de déplacement exploitable) des différents modes de transport est évaluée. Tous les calculs se rapportent à une personne et à un trajet (aller uniquement).

2.2. Approche méthodologique

Limites du système

L'année de référence pour les calculs de cette comparaison des modes de transport écologiques est 2023. Cela n'a pas d'effet significatif sur les principes de base tels que la durée des trajets et les distances. Cependant, les facteurs d'émissions et les taux de coûts appliqués dépendent de l'année de référence choisie. Les facteurs d'émission sont soumis à une trajectoire technologique (par exemple, les émissions d'oxyde d'azote des voitures) et les taux de coûts ont dû être actualisés pour l'année en question (ajustés en fonction de l'inflation). La délimitation spatiale est claire sur la base des itinéraires prescrits. En termes de contenu, les coûts directs et les émissions provenant de l'exploitation ainsi que les coûts indirects et les émissions provenant de la production, de l'entretien et de l'élimination de l'énergie, des véhicules et de l'infrastructure sont toujours pris en compte.

Itinéraires

Au total, cinq lignes exploitées par TGV Lyria entre la France et la Suisse ont été sélectionnées. Dans chaque cas, les itinéraires se composent d'un trajet principal et d'un trajet en amont et en aval de celui-ci. Le trajet principal est défini par l'itinéraire emprunté par le véhicule en question pour chaque mode de transport, c'est-à-dire de gare à gare pour le train ou d'aéroport à aéroport pour l'avion. Dans un premier temps, seuls ces trajets principaux sont comparés les uns aux autres en termes d'empreinte climatique et énergétique. Dans un deuxième temps, une définition des autres véhicules que les principaux modes de transport (avion, train, voiture et bus) est prise en compte pour la comparaison porte-à-porte. En effet, les passagers

ont le choix entre différents modes de transport (par exemple, le tramway ou le taxi) pour le premier et le dernier kilomètre (jusqu'à la « porte », c'est-à-dire jusqu'au lieu de réunion pour les voyageurs d'affaires ou jusqu'au lieu d'hébergement pour les voyageurs de loisirs). Dans cette étude, les termes de «transport en amont et en aval» seront utilisés pour dénommer ces parties du trajet. Le Tableau 4 montre les cinq itinéraires différents (trajets principaux) ainsi que les trajets en amont et en aval de ceux-ci.

Par rapport à l'étude de 2019, une route a été mise à jour. En effet, alors qu'en 2019, la ligne entre Genève et Marseille a été analysée, cette ligne a été mise à jour pour inclure la liaison étendue entre Lausanne et Marseille. Cela s'explique par le fait que le TGV Lyria propose désormais cette liaison en été.

L'itinéraire Genève-Paris est un exemple de liaison de centre-ville à centre-ville, qui contient des trajets en amont et en aval du trajet principal. Pour le chemin de fer, le trajet principal est défini comme étant de gare à gare, pour l'avion, d'aéroport à aéroport, et pour le bus, de gare routière à gare routière. Les transports en amont et en aval comprennent les taxis, les voitures, les bus locaux, les tramways et les services ferroviaires locaux ou de métro. Les trajets en voiture vont directement de porte-à-orte et ne comportent donc pas d'autres trajets que le trajet principal.

Tableau 4 : Itinéraires considérés dans l'étude, comprenant les trajets principaux ainsi que les trajets en amont et en aval de ceux-ci

Trajet	De	A	Mode de transport	Détails sur le trajet principal
Genève-Paris	Geneva centre-ville	Paris centre-ville	Train	Genève Cornavin - Paris Gare de Lyon
Genève -Paris	Geneva centre-ville	Paris centre-ville	Avion	Genève l'aéroport (GVA) - Paris Charles de Gaulle (CDG)
Genève -Paris	Geneva centre-ville	Paris centre-ville	Bus	Genève ZOB - Paris Bercy Seine
Genève -Paris	Geneva centre-ville	Paris centre-ville	Voiture particulière	De porte à porte en voiture
Zurich-Paris	Zurich centre-ville	Boulogne-Billancourt	Train	Gare centrale de Zurich - Paris Gare de Lyon
Zurich-Paris	Zurich centre-ville	Boulogne-Billancourt	Avion	Aéroport de Zurich (ZRH) - Paris Charles de Gaulle (CDG)
Zurich-Paris	Zurich centre-ville	Boulogne-Billancourt	Bus	Parking Sihlquai- Paris Bercy Seine
Zurich-Paris	Zurich centre-ville	Boulogne-Billancourt	Voiture particulière	De porte à porte en voiture
Bâle-Paris	Reinach	Paris centre-ville	Train	Basel SBB - Paris Gare de Lyon
Bâle-Paris	Reinach	Paris centre-ville	Avion	EuroAirport (BSL) - Paris Charles de Gaulle (CDG)
Bâle-Paris	Reinach	Paris centre-ville	Bus	Basel SBB - Paris Bercy Seine
Bâle-Paris	Reinach	Paris centre-ville	Voiture particulière	De porte à porte en voiture
Lausanne-Paris	Montreux	Paris centre-ville	Train	Lausanne CFF - Paris Gare de Lyon
Lausanne-Paris	Montreux	Paris centre-ville	Avion	Genève l'aéroport (GVA) - Paris Charles de Gaulle (CDG)
Lausanne-Paris	Montreux	Paris centre-ville	Bus	Lausanne P+R Vélodrome - Paris Bercy Seine
Lausanne-Paris	Montreux	Paris centre-ville	Voiture particulière	From door-to-door by car
Lausanne-Marseille	Fribourg	Marseille centre-ville	Train	Lausanne CFF - Marseille-Saint-Charles
Lausanne-Marseille	Fribourg	Marseille centre-ville	Avion	Genève l'aéroport (GVA) - Marseille Provence (MRS)*
Lausanne-Marseille	Fribourg	Marseille centre-ville	Bus	Lausanne P+R Vélodrome - Marseille-Saint-Charles
Lausanne-Marseille	Fribourg	Marseille centre-ville	Voiture particulière	De porte à porte en voiture

* Il n'y a pas de vols directs pour la liaison Genève-Marseille à l'heure actuelle. Afin de maintenir la comparabilité entre les liaisons, un vol direct hypothétique a été pris en compte.

Tableau INFRAS

Modes de transport pris en compte

Lors de la comparaison des déplacements, les principaux moyens de transport présentés dans le tableau 5 sont examinés et comparés entre eux.

Tableau 5 : Modes de transport envisagés





Moyen de transport	Description
	Les cinq itinéraires analysés correspondent tous à des lignes exploitées directement par TGV Lyria. Pour cette raison, un train de TGV Lyria sera pris comme représentant pour le transport ferroviaire sur ces lignes. En décembre 2019, la nouvelle flotte TGV Lyria a été introduite, offrant plus de sièges. Les chiffres utilisés pour l'analyse se réfèrent aux trains en marche en 2023.
	Pour le transport aérien, un grand nombre de données pour divers types d'avions est disponible (Atmosfair 2021). Ces données ont été appliquées sur les itinéraires analysés, faisant référence aux valeurs moyennes européennes pour l'année 2023 concernant l'utilisation de la capacité des avions (IATA 2023).
	Les bus de longue distance sont représentés par des bus de voyage ordinaires. L'un des problèmes des bus est que de nombreux trajets sont effectués de nuit, prolongeant ainsi la durée du voyage par rapport aux voitures. Pour la capacité en termes de voyageurs, les dernières données disponibles sur les trajets en bus longue distance depuis l'Allemagne ont été utilisées (DESTATIS 2023).
	Pour les voitures, deux types de propulsion ont été pris en compte. D'une part, les voitures conventionnelles / thermiques avec un moteur à combustion et d'autre part les voitures électriques. Les données pour les voitures conventionnelles se réfèrent à la moyenne des véhicules en utilisation en Suisse. Les taux d'utilisation des véhicules sont tirés du <i>Swiss Transport and Mobility Microcensus 2021</i> (ARE 2023). Les taux d'utilisation en France sont similaires à ceux de la Suisse, c'est pourquoi les données peuvent également être appliquées à la France. Il en va de même pour les véhicules électriques à batterie (mix électrique), où des valeurs suisses ont été appliquées pour la France également. En termes d'empreinte carbone, le mix électrique utilisé pour charger la batterie de la voiture a un impact sur les émissions. En termes de gaz à effet de serre, le mix électrique des consommateurs en Suisse et en France est relativement similaire. La Suisse a une forte proportion d'énergie hydroélectrique et nucléaire, tandis qu'en France, l'énergie nucléaire domine. Ces deux sources d'énergie ont un facteur d'émission de CO ₂ relativement faible par rapport aux sources d'énergie fossiles. En outre, pour la construction des véhicules et des batteries, une moyenne européenne plutôt qu'un mix électrique spécifique à chaque pays est utilisée.

Tableau INFRAS

Distances et temps de parcours des itinéraires par mode de transport

Les passagers-kilomètres parcourus par les différents modes de transport constituent une base importante pour les calculs relatifs à l'énergie, au climat et aux coûts. Comme les résultats sont présentés par personne et par trajet, les distances multipliées par l'utilisation de la capacité des différents modes de transport fournissent déjà les passagers-kilomètres. Les distances des itinéraires proviennent de différentes sources. Les kilomètres ferroviaires proviennent de TGV

Lyria, les distances aériennes de www.greatcirclemapper.net et les distances parcourues en voiture de www.maps.google.com. Googlemaps a également été utilisé pour calculer les distances des trajets en amont et en aval du trajet principal. Si le point de départ ou d'arrivée est le centre-ville, les trajets antérieurs et postérieurs ont été comptabilisés avec 2 km, indépendamment du point de départ/d'arrivée exact. Etant donné que pour les cinq itinéraires, les gares routières sont situées à proximité immédiate des gares ferroviaires, les trajets en amont et en aval du trajet principal sont égaux, indépendamment du mode de transport (bus ou train). Les distances parcourues avant et après le voyage en avion sont légèrement plus longues, car les aéroports sont toujours un peu plus éloignés du centre-ville.

Une analyse supplémentaire a été effectuée pour comparer la partie du temps de trajet qui peut être utilisée pour travailler, le «temps exploitable». À cette fin, seuls les modes de transport pertinents pour les déplacements professionnels ont été comparés. Les résultats de cette analyse sont présentés au chapitre 3.4. Les temps de trajet pour les trains et les bus ainsi que pour les vols sont tirés des horaires officiels, ceux pour les voitures de Googlemaps. Plusieurs requêtes ont été effectuées à différents moments de la semaine et de la journée et une moyenne a été calculée. Dans le cas des vols, les durées de voyage diffèrent en fonction de la direction dans laquelle le vol est effectué. De manière générale, les analyses se concentrent sur les trajets de la Suisse en direction de la France. Les retards, grèves, embouteillages et autres perturbations n'ont pas été pris en compte.

Pour l'estimation du temps de trajet exploitable, la part du trajet qui peut être utilisée pour travailler a été estimée par des experts indépendants. Par conséquent, pour chaque mode de transport, les experts ont fixé ce qu'ils considèrent comme un pourcentage réaliste qui s'applique à tous les itinéraires. Pour les trains, ce pourcentage correspond à 95% de la durée du trajet dans le mode de transport principal, à 70% pour les avions et à 90% pour les bus. Pour les déplacements en voiture (thermique et électrique), on suppose que la personne qui voyage conduit, et donc que le temps exploitable est égal à 0%. Les temps de déplacement avant et après le voyage n'ont pas été considérés comme du temps de travail potentiel, mais ils sont tout de même pris en compte pour le temps de déplacement total. Pour les trajets en amont et en aval du trajet principal, les voyageurs utilisent généralement une combinaison de modes de transport : transport public, taxi, voiture, vélo ou à pied. Une moyenne pondérée des temps de trajet nécessaires aux différents modes de transport est calculée pour le trajet vers et depuis la gare/l'aéroport/le terminal de bus.

Tableau 6 : Distances des itinéraires étudiés

Route	Mode de transport	Trajet principal	Trajet			Durée du trajet
			en amont	en aval	total	
			kilomètre			minutes
Genève-Paris	Train	503	2	2	507	245
	Avion	457	5	28	507	169
	Avion	538	2	2	542	545
	Voiture particulière	547	0	0	490	315
Zurich-Paris	Train	617	2	12	631	293
	Avion	525	8	38	571	163
	Avion	650	2	12	664	650
	Voiture particulière	602	0	0	602	385
Bâle -Paris	Train	526	8	2	536	214
	Avion	449	42	28	519	148
	Avion	573	8	2	583	546
	Voiture particulière	537	0	0	583	351
Lausanne-Paris	Train	480	30	2	512	252
	Avion	457	93	28	512	170
	Avion	535	30	2	567	507
	Voiture particulière	545	0	0	545	357
Lausanne-Marseille	Train	580	67	2	649	322
	Avion	370	132	24	598	284
	Avion	568	67	2	637	512
	Voiture particulière	598	0	0	598	354

Tableau INFRAS

Calculs des émissions et de l'énergie

L'empreinte climatique tient compte à la fois des émissions liées aux opérations directes et des processus en amont et en aval. Les processus en amont et en aval comprennent les émissions provenant de la production et de l'élimination des véhicules et des infrastructures, ainsi que de la chaîne d'approvisionnement en énergie. En termes de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, ces émissions sont souvent tout aussi importantes que les émissions liées à l'exploitation directe. Le **bilan énergétique** tient compte de l'énergie utilisée pour le transport. Cela signifie que seule l'efficacité énergétique du véhicule est prise en compte, sans compter les systèmes énergétiques sous-jacents qui fournissent l'énergie-même.

Pour l'empreinte climatique, tous les gaz à effet de serre des opérations directes et des processus en amont et en aval ont été pris en compte sous la forme d'émissions CO₂-éq. Cela signifie qu'en termes d'émissions directes, seuls les moteurs à combustion fonctionnant avec des combustibles fossiles produisent des gaz à effet de serre. Plus concrètement, il s'agit de la combustion d'essence et de diesel dans le cas des voitures thermiques et des bus, et de kérosène dans le cas des avions. Les gaz à effet de serre issus des processus en amont et en aval proviennent d'une part de la fourniture d'électricité et de carburants (électricité, essence, diesel et kérosène) et d'autre part de la production, de l'entretien et de l'élimination des véhicules et des infrastructures. Pour le TGV Lyria, les mix électriques français et suisse ont été pondérés. Pour les voitures électriques, le mix électrique suisse a été utilisé. Celui-ci est transposable à la France, car les mix électriques diffèrent peu entre les deux pays en termes d'empreinte carbone. En outre, une grande partie des émissions de gaz à effet de serre dans l'empreinte climatique des voitures électriques est imputable à la production des véhicules et des batteries. Une moyenne européenne est utilisée pour le mix électrique dans la production pour tous les pays. Par conséquent, l'influence du mix électrique des consommateurs est relativement faible pour la Suisse et la France.

Pour les trajets en amont et en aval du trajet principal, des facteurs d'émission pondérés par mode de transport ont été calculés. La base de la pondération est une enquête auprès des clients de TGV Lyria, qui a permis de déterminer les modes de transport utilisés pour se rendre dans les gares. Ceux-ci se composent des transports publics (tramways, bus, etc.), du vélo, de la voiture ou de la mobilité piétonne. Comme il n'existe pas d'enquêtes distinctes pour les gares routières et les aéroports, le facteur d'émission pondéré a également été utilisé pour les trajets menant aux aéroports et aux gares routières ainsi que pour les trajets repartant de ceux-ci. L'enquête ayant été menée en France et en Suisse, il a été possible de calculer un facteur d'émission pondéré pour le trajet en amont en Suisse ainsi que le trajet en aval en France.

Un point important concerne le trafic aérien. Pour la conversion des CO₂-éq, l'indice RFI² a été utilisé, afin de tenir compte de l'effet de serre accru des émissions aériennes émises en haute altitude (Atmosfair 2019).

Le bilan énergétique indique l'énergie totale utilisée pour chaque trajet en fonction du mode de transport choisi. Les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables ne sont pas différenciées, et tout est indiqué en kilogrammes d'équivalent essence. Le Tableau 7 indique les

² RFI = L'indice de forçage radiatif décrit l'augmentation de l'effet de serre des émissions des avions (en particulier du CO₂, H₂O (gazeux) et les oxydes d'azote) à haute altitude. L'effet de réchauffement de toutes les émissions des vols est environ trois fois plus élevé que si l'on ne tient compte que du CO₂. Cet effet intervient à partir de 9,000 mètres d'altitude et est pris en compte dans les calculs à partir de cette altitude.

sources des facteurs d'émission utilisés pour les calculs de l'empreinte climatique et du bilan énergétique.

Les facteurs d'émission pour les polluants atmosphériques mentionnés dans le tableau 7 sont nécessaires au calcul des coûts environnementaux et sont donc également répertoriés ici, car ils proviennent pour la plupart des mêmes sources que les facteurs d'émission de gaz à effet de serre. Tableau 7

Tableau 7 : Bases d'information pour les facteurs d'émission appliqués

Mode de transport	Sources	
	Émissions directes liées à l'opération	Émissions indirectes (procédés en amont / aval)
Train	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PM10 non-exhaust: Ecoinvent 3.10 ▪ Consommation d'énergie : Données d'exploitation TGV Lyria 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Données d'exploitation TGV Lyria ▪ Polluants atmosphériques : EcotransitWorld et Mobitool 3.0 ▪ Approvisionnement en énergie: Mobitool 3.0
Avion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Atmosfair 2024a ▪ Polluants atmosphériques: Mobitool 3.0 ▪ Consommation d'énergie : Mobitool 3.0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Atmosfair 2024a et Ecoinvent 3.10 ▪ Polluants atmosphériques: Mobitool 3.0 ▪ Approvisionnement en énergie: Mobitool 3.0
Bus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: HBEFA 4.2 ▪ Polluants atmosphériques: HBEFA 4.2 ▪ Consommation d'énergie : HBEFA 4.2 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Mobitool 3.0 ▪ Polluants atmosphériques Mobitool 3.0 ▪ Approvisionnement en énergie: Mobitool 3.0
Voiture particulière	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: HBEFA 4.2 ▪ Polluants atmosphériques: HBEFA 4.2 ▪ Consommation d'énergie : HBEFA 4.2 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Mobitool 3.0 ▪ Polluants atmosphériques: Mobitool 3.0 ▪ Approvisionnement en énergie: Mobitool 3.0
Voiture particulière électrique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: HBEFA 4.2 ▪ Polluants atmosphériques: HBEFA 4.2 ▪ Consommation d'énergie : HBEFA 4.2 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-éq: Mobitool 3.0 ▪ A Polluants atmosphériques: Mobitool 3.0 ▪ Approvisionnement en énergie: Mobitool 3.0

Tableau INFRAS

Bases pour les coûts environnementaux et les coûts liés aux accidents

Les coûts environnementaux se composent de cinq types de coûts différents. Le Tableau 8 présente ces types de coûts et décrit ce qu'elles comprennent.

Tableau 8 : Catégories de coûts pour les coûts environnementaux et liés aux accidents

Catégories de coûts	Description
Coûts climatiques	Coûts résultant de l'émission de gaz à effet de serre et des changements climatiques qui en découlent (estimation des coûts des dommages).
Coûts de la pollution atmosphérique	Les coûts environnementaux résultant de la pollution atmosphérique comprennent les quatre sous-catégories suivantes : Coûts de santé, pertes de récoltes, dommages aux bâtiments et aux matériaux ainsi que pertes de biodiversité.
Coûts des processus en amont et en aval	Coûts consécutifs à l'émission de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques lors de la production, de l'entretien et de l'élimination : <ul style="list-style-type: none"> • Des sources d'énergie (combustibles et électricité) • Des véhicules • Des infrastructures de circulation Monétarisation liée à la pollution de l'air et aux coûts climatiques (voir ci-dessus)
Coûts des accidents	Accidents de la circulation (taux de coûts des dommages): inclut les coûts qui ne sont pas couverts par la personne responsable de l'accident ou la/les personne(s) impliquée(s).
Coûts du bruit	Coûts de santé liés au bruit et coûts dus aux nuisances sonores (coûts des dommages).

Tableau INFRAS

Sur la base de l'empreinte climatique et des émissions de polluants atmosphériques calculées, les coûts environnementaux ont été calculés à l'aide de taux de coûts spécifiques. La même procédure a été utilisée pour les processus en amont et en aval du trajet principal. Ces processus prennent également en compte les gaz à effet de serre et les polluants atmosphériques. Le taux de coûts climatiques est tiré du rapport de l'Office fédéral du développement territorial « Coûts et utilité des transports en Suisse 2016 » (ARE 2019), mis à jour annuellement. Le taux de coûts a été extrapolé jusqu'en 2023 et s'élève à 154 CHF par tonne de CO₂. Les taux de coûts pour les polluants atmosphériques sont tirés de la publication de la Commission européenne « *Handbook of the external cost of transport* » (DG MOVE 2019). Ce manuel contient des taux de coûts distincts pour tous les principaux polluants atmosphériques et pour tous les pays européens. Ces taux ont également été mis à jour pour l'année 2023.

Une approche légèrement différente a été adoptée pour les coûts liés aux accidents et au bruit. Ceux-ci n'ont pas été calculés à l'aide d'une structure de quantité, qui a ensuite été monétisée à l'aide de taux de coûts. Ils ont été calculés directement en utilisant des taux de coûts d'accidents et de bruit typiques par passager-kilomètre. Ils ont également été tirés du «

Handbook of the external cost of transport » de la Commission européenne (DG MOVE 2019). La source fournit des taux de coûts spécifiques au pays, entre autres pour la France. L'étude de la Commission Européenne a dérivé des valeurs spécifiques pour les trains à grande vitesse pour les taux de coûts ferroviaires. Bien qu'il n'y ait pas eu d'accidents sur les routes ferroviaires et aériennes considérées au cours des dix dernières années, les valeurs moyennes correspondantes sont utilisées par souci de cohérence. Toutefois, les coûts des accidents pour les transports ferroviaires et aériens sont négligeables. Dans le cas du transport routier, on ne dispose pas de chiffres exacts sur les accidents pour les itinéraires considérés, c'est pourquoi des valeurs moyennes ont également été utilisées pour le transport routier.

3. Résultats

3.1. Empreinte climatique

Dans cette section, l'empreinte climatique des modes de transport considérés est présentée pour les cinq itinéraires analysés. Les résultats sont présentés sous forme d'émissions de gaz à effet de serre en CO₂-éq par personne et par trajet. Le Tableau 9 présente une vue d'ensemble des résultats. Le tableau montre clairement que le voyage en TGV Lyria est celui qui génère le moins d'émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 9 : Empreinte climatique pour les itinéraires étudiés (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)

Bilan climatique (Kg d'eq CO ₂ / Personne)								
Trajet	Train	Avion	Bus	Voiture therm. Ø	Voiture therm. travail	Voiture électr. Ø	Voiture électr. travail	
Genève-Paris	2.6	114.8	15.1	98.8	138.7	56.5	79.4	
Lausanne-Paris	2.4	114.8	15.1	98.4	138.2	51.2	71.9	
Bâle-Paris	2.7	112.8	16.1	97.0	136.1	50.4	70.8	
Zurich-Paris	3.1	131.9	18.3	108.7	152.6	56.5	79.4	
Lausanne-Marseille	2.9	93.0	16.0	108.0	151.6	56.2	78.8	

Tableau INFRAS

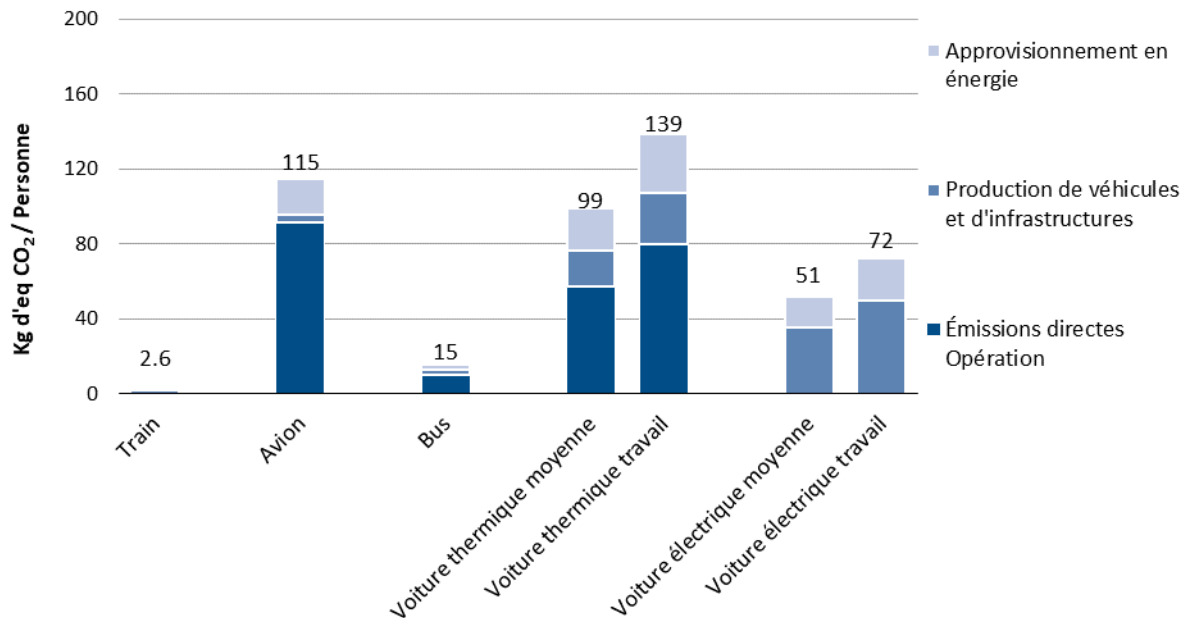
Dans les pages à suivre, chaque trajet est analysé séparément. Pour chaque itinéraire, les émissions de gaz à effet de serre sont décomposées et attribuées à l'approvisionnement en énergie, à la production des véhicules et de l'infrastructure, ainsi que à l'exploitation directe (opération). Selon la norme SN EN 162583³, seules les émissions liées à l'exploitation directe et à l'approvisionnement en énergie doivent être indiquées. Pour l'empreinte climatique calculée au sein de ce mandat, les émissions provenant de la production des véhicules et de l'infrastructure sont également prises en compte. Le premier trajet, Genève-Paris, est analysé de manière particulièrement détaillée et contient des informations et un graphique supplémentaires concernant le voyage de porte-à-porte. Ainsi, les déplacements en amont et en aval du trajet principal sont pris en compte. Pour les quatre autres itinéraires, ces analyses et graphiques supplémentaires sont inclus dans l'annexe pour des raisons de clarté.

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 transport. Cette norme émane du Comité européen de normalisation.

Genève – Paris par personne et par trajet. Dans le classement, le TGV Lyria est suivi par le bus , émettant environ 15 kg CO₂-éq par personne par trajet, suivi de la voiture électrique moyenne avec environ 51 kg CO₂-éq. Les émissions de gaz à effet de serre les plus élevées par personne et par trajet sont émises par l'avion (115 kg de CO₂-éq) ainsi la voiture thermique (99 kg et 139 kg CO₂-éq, respectivement).

Figure 1 présente les résultats de l'empreinte carbone de l'itinéraire Genève - Paris pour les modes de transport considérés. Les émissions en kilogrammes de CO₂-éq par personne et par trajet sont indiqués, répartis entre l'approvisionnement en énergie, la production des véhicules et des infrastructures et les émissions liées à l'exploitation directe. Pour les voitures particulières, deux facteurs de charge différents sont indiqués. La mention « travail » signifie qu'un taux d'utilisation plus faible de 1.09 personne par véhicule (selon la statistique des déplacements professionnels) a été calculé au lieu de la valeur moyenne de 1.53 personne par véhicule (ARE 2023). Pour le trajet de Genève à Paris (de centre-ville à centre-ville), le TGV Lyria est celui qui émet le moins de gaz à effet de serre avec 2.6 kg CO₂-éq par personne et par trajet. Dans le classement, le TGV Lyria est suivi par le bus , émettant environ 15 kg CO₂-éq par personne par trajet, suivi de la voiture électrique moyenne avec environ 51 kg CO₂-éq. Les émissions de gaz à effet de serre les plus élevées par personne et par trajet sont émises par l'avion (115 kg de CO₂-éq) ainsi la voiture thermique (99 kg et 139 kg CO₂-éq, respectivement).

Figure 1: Empreinte climatique pour le trajet Genève-Paris (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)



Graphe INFRAS

Le Tableau 10 montre les émissions réparties en fonction de leur origine. Il apparaît que les modes de transport ferroviaire et automobile électriques ne génèrent pas d'émissions directes. Selon la norme SN EN 16258, seules les émissions directe opération et de l'approvisionnement en énergie devraient être déclarées. Dans le cas du TGV Lyria, la traction représente environ 40% des émissions totales, soit 1.1 kg CO₂-éq par personne. Le reste provient de la production des véhicules et de l'infrastructure. Ce rapport est inversé pour les avions, par exemple. Dans ce cas, les émissions directes et la fourniture d'énergie représentent ensemble environ 95% des émissions totales, soit environ 110 kg CO₂-éq par personne. Ainsi, si les comparaisons écologiques entre modes de transport ne prennent en compte que les paramètres exigés par la norme, le trajet en train émet environ 70 à 100 fois moins de CO₂-éq qu'un vol sur le même trajet. La situation est similaire, mais moins prononcée, pour les voitures particulières, où la fourniture d'énergie et les émissions directes représentent ensemble une part nettement plus élevée des émissions totales pour les moteurs à combustion que pour les voitures électriques.

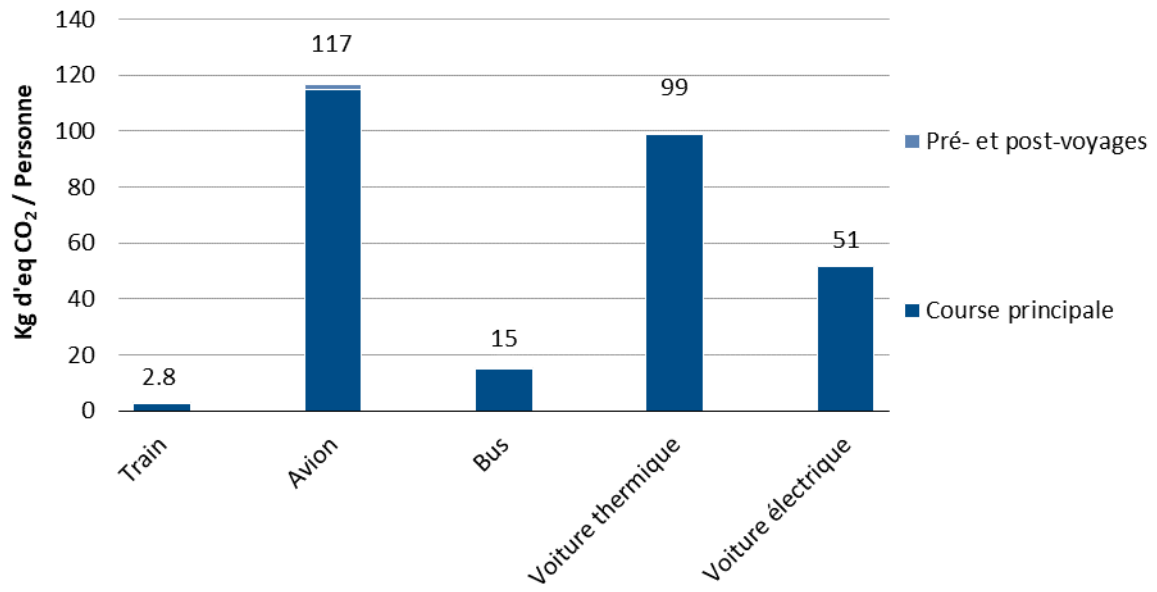
Tableau 10 : Emissions de gaz à effet de serre, Genève-Paris, selon la source d'émission

Kg CO ₂ -eq / Personne							
	Train	Avion	Bus	Voiture thermique moyenne	Voiture thermique travail	Voiture électrique moyenne	Voiture électrique moyenne
Émissions directes Opération	0	91	10	57	80	0	0
Approvisionnement en énergie	1.1	19	2.6	22.4	31	16	23
Production de véhicules et d'infrastructures	1.4	4.0	2.7	20	27	35	49
Total	2.6	115	15	99	139	51	72
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.1</i>	<i>111</i>	<i>12</i>	<i>79</i>	<i>111</i>	<i>16</i>	<i>23</i>

Tableau INFRAS

La Figure 2 montre la même comparaison que ci-dessus, mais en distinguant les trajets avant et après le voyage. En d'autres termes, une comparaison porte-à-porte a été effectuée ici et les trajets vers et depuis la gare ferroviaire, l'aéroport ou la gare routière ont également été pris en compte (voir le Tableau 4 pour les détails). Il est frappant de constater que la part des déplacements avant et après le voyage dans les émissions totales est très faible. En termes de part, les émissions de gaz à effet de serre provenant des trajets en amont et en aval du trajet principal sont les plus élevées pour le rail, environ 8% (presque invisibles dans le graphique en raison des faibles valeurs absolues pour le train). Le chiffre pour les voyages en avion est légèrement inférieur à 2% et celui pour les bus longue distance est d'environ 1%.

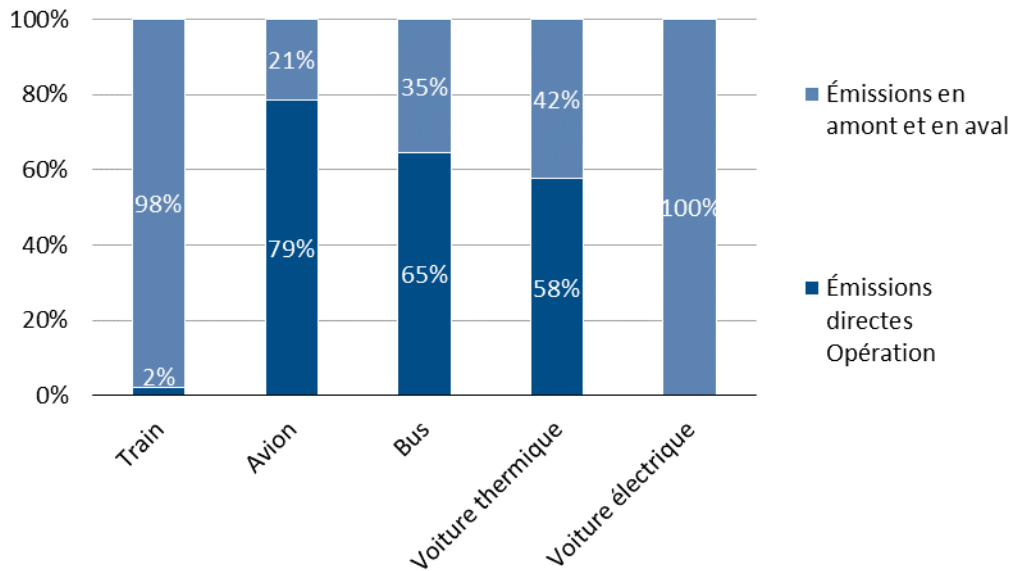
Figure 2 : Empreinte climatique pour Genève-Paris, selon le type de trajet (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)



Graphe INFRAS

La figure 3 indique la répartition des émissions entre les émissions directes liées à l'opération et les émissions générées avant ou après l'exploitation (production, l'entretien et l'élimination des véhicules, des infrastructures et de l'énergie). Aucune émission de gaz à effet de serre n'est causée par les voitures électriques pendant le trajet. Cela signifie que 100% des émissions proviennent des processus en amont et en aval. Dans le cas des trains, environ 98% des émissions proviennent des processus en amont et en aval et que 2% de l'exploitation directe. Les émissions liées aux opérations ferroviaires directes proviennent toutes de processus en amont et en aval (par exemple, le trajet en bus jusqu'à la gare). Le trajet principal en train ne génère pas non plus d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas des voitures thermiques, environ 42% des émissions de gaz à effet de serre proviennent des processus en amont et en aval. Ce chiffre est d'environ 35% pour les bus longue distance et d'environ 21% pour les voyages en avion.

Figure 3 : Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport à l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre

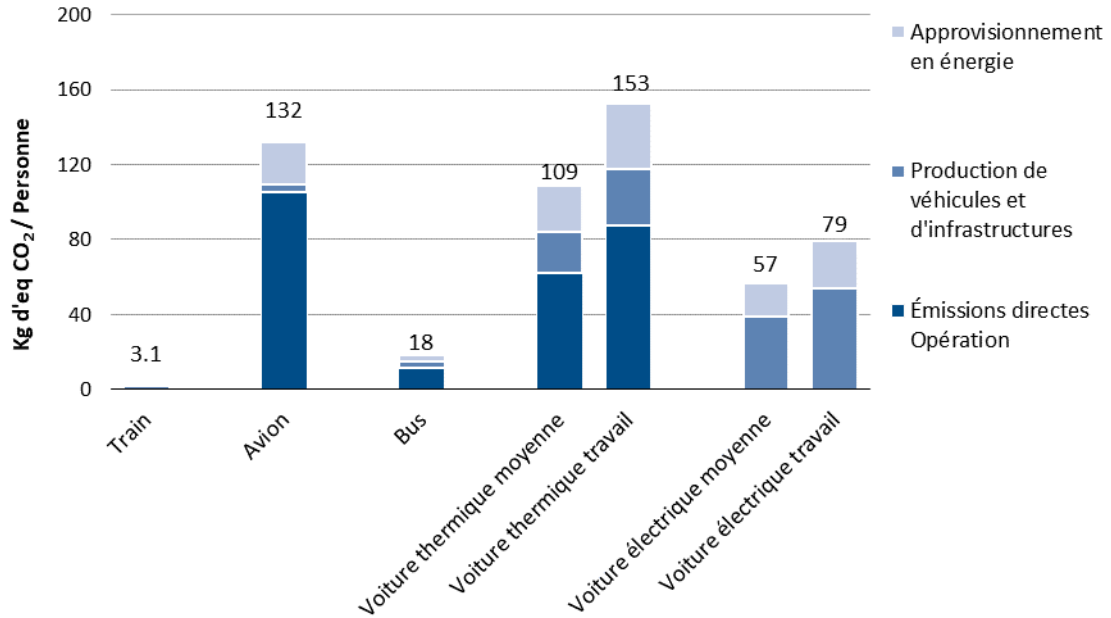


Graphe INFRAS

Zurich – Paris

Le voyage en TGV Lyria de Zurich à Paris génère environ 3.1 kg d'émissions CO₂-éq par personne et par trajet. Avec environ 18 kg d'émissions CO₂-éq par personne, un voyage en bus longue distance de Zurich à Paris génère des émissions légèrement plus élevées. Sur cette trajectoire, la conduite d'une voiture électrique entraîne des émissions d'environ 57 kg d'émissions CO₂-éq, tandis que la conduite d'une voiture à moteur à combustion classique entraîne des émissions d'environ 109 kg d'émissions. En cas d'utilisation moindre des capacités (par exemple pour les voyages d'affaires), les émissions par personne augmentent en moyenne pour atteindre 79 kg pour les voitures électriques et 153 kg d'émissions CO₂-éq pour les voitures thermiques. Le voyage en avion sur cette distance émet 132 kg d'émissions CO₂-éq par personne par voyage.

Figure 4 : Empreinte climatique pour Zurich-Paris (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)

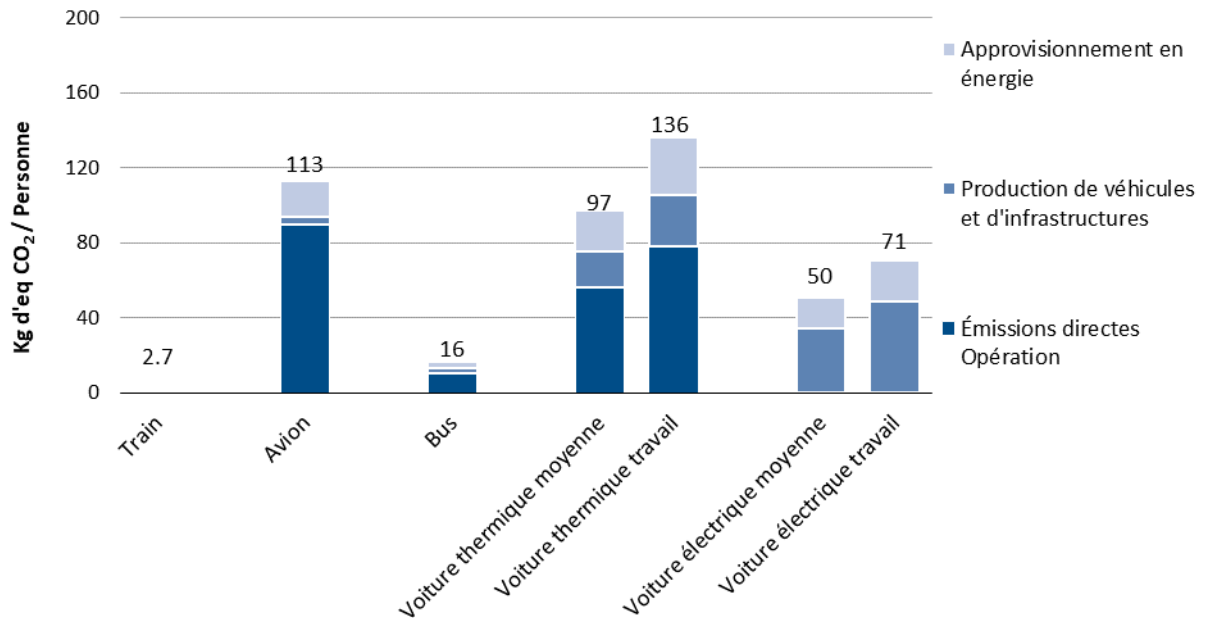


Graphe INFRAS

Bâle – Paris

Une comparaison des émissions de gaz à effet de serre des différents modes de transport pour le trajet Bâle-Paris montre que le TGV Lyria produit les émissions les plus faibles par personne et par trajet (2.7 kg d'émissions CO₂-éq). En comparaison, un voyage en bus longue distance produit 16 kg d'émissions CO₂-éq par personne. En ce qui concerne les voitures, un trajet en voiture thermique génère environ 97 kg d'émissions par personne et un trajet en voiture électrique environ 50 kg d'émissions CO₂-éq par personne. Lorsque la voiture est utilisée pour un voyage d'affaires, les émissions de GES passent à 136 kg de CO₂-éq (voitures à carburant fossile) et à 71 kg de CO₂-éq (voitures électriques). Le transport aérien est à l'origine de 113 kg d'émissions CO₂-éq par personne et par trajet.

Figure 5 : Empreinte climatique, Bâle-Paris (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)

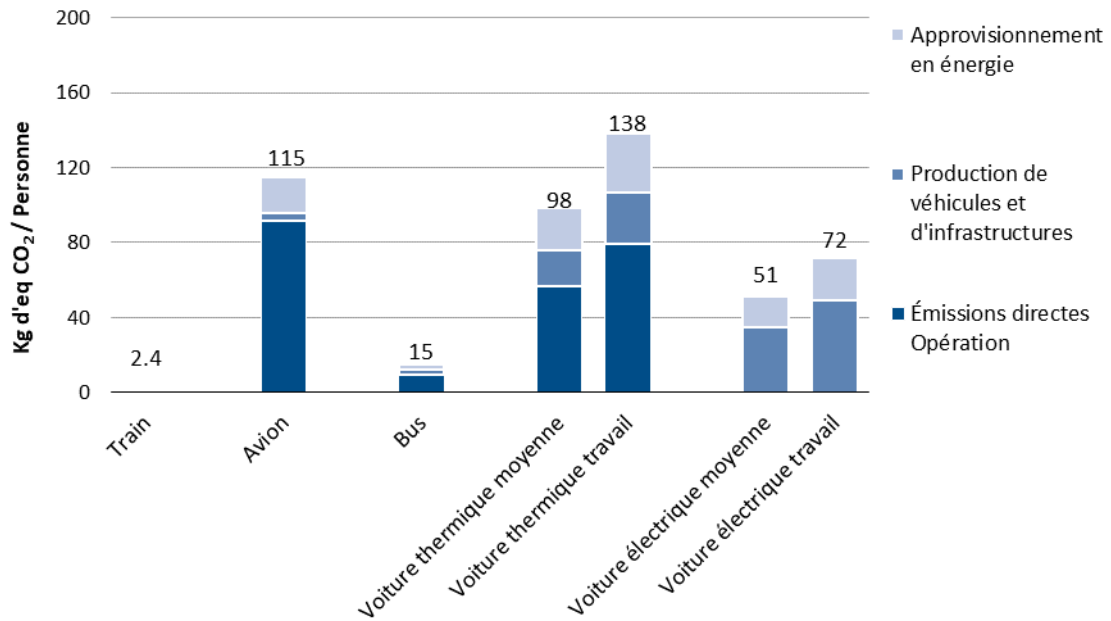


Graphe INFRAS.

Lausanne – Paris

Pour le trajet Lausanne-Paris, le TGV Lyria produit également le moins d'émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet avec 2.4 kg d'émissions CO₂-éq. Comme comparaison, un voyage en bus en génère. Un trajet en voiture thermique génère environ 98 kg d'émissions CO₂-éq par personne, le même trajet en voiture électrique génère environ 51 kg d'émissions – environ la moitié des émissions en comparaison à la voiture thermique. Pour un voyage d'affaires, les émissions de gaz à effet de serre passent à 138 kg d'émissions CO₂-éq (voitures à carburant fossile) et à 72 kg de CO₂-éq (voitures électriques). Un voyage en avion entraîne des émissions d'environ 115 kg d'émissions CO₂-éq par personne par voyage.

Figure 6 : Empreinte climatique, Lausanne-Paris (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)

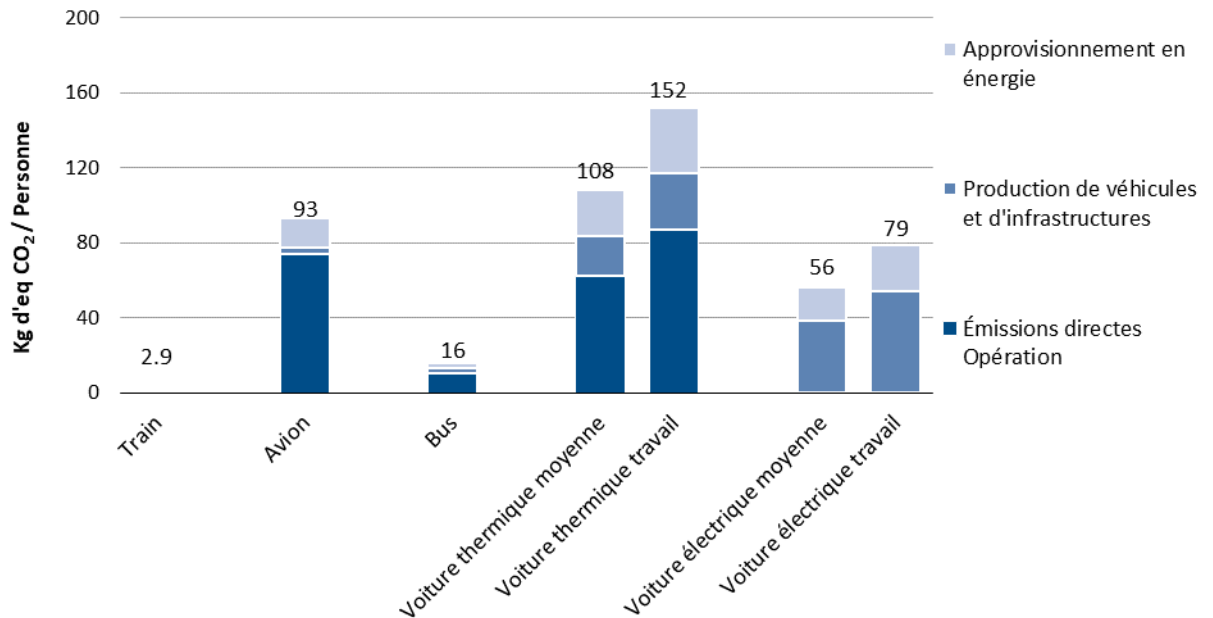


Graphe INFRAS

Lausanne – Marseille

Pour le trajet Lausanne-Marseille, c'est le TGV Lyria qui produit le moins d'émissions de gaz à effet de serre par personne et par trajet avec 2.9 kg d'émissions CO₂-éq. Un trajet en bus longue distance génère 16 kg de CO₂-éq par personne. En ce qui concerne les voitures, un trajet en voiture thermique provoque environ 108 kg d'émissions CO₂-éq par personne, un trajet en voiture électrique environ la moitié comparée à la voiture conventionnelle (56 kg). Les émissions de gaz à effet de serre passent à 152 kg de CO₂-eq (voitures à carburant fossile) et à 79 kg de CO₂-eq (voitures électriques) lorsque les voyageurs d'affaires utilisent leur voiture. Un voyage en avion entraîne des émissions d'environ 93 kg d'émissions CO₂-éq par personne.

Figure 7 : Empreinte climatique, Lausanne-Marseille (équivalents CO₂ par personne et par trajet pour les différents modes de transport)



Graphe INFRAS.

Changements depuis 2019

La mise à jour des données de 2019 comporte trois changements principaux : une réduction de la consommation d'énergie par train-kilomètre (1), une réduction des émissions CO₂-éq par kilowattheure (2) ainsi qu'un nombre légèrement réduit du taux d'utilisation. L'ensemble se traduit par une réduction globale de l'empreinte carbone des voyages en TGV Lyria. Pour les autres moyens de transport, la mise à jour a entraîné une légère réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les voyages en avion, alors que les émissions des voitures ont augmenté. Ceci est principalement dû à une mise à jour du taux d'utilisation : pour les voitures, le taux d'utilisation a baissé d'une moyenne de 1.6 à 1.53 (ARE 2023) tandis que le taux d'utilisation du transport aérien a augmenté de 2.1% entre 2019 et 2023 selon l'IATA (IATA 2023). La mise à jour des facteurs d'émission pour les processus en amont et en aval (production, élimination, etc.) a entraîné une augmentation des émissions, en particulier pour les voitures électriques. Cela s'explique par le fait que les facteurs d'émission de Mobitool 3.0 utilisés ici sont plus élevés que les facteurs d'émission utilisés à l'origine.

3.2. Bilan énergétique

L'énergie utilisée par personne et par trajet est évaluée dans le bilan énergétique. L'énergie totale est généralement convertie en équivalents kilogrammes d'essence (kg d'éq essence). L'efficacité énergétique des différents modes de transport en service est ainsi comparée. L'énergie utilisée pour les processus en amont et en aval (production, élimination, etc.) n'est pas prise en compte. Cette façon de procéder est intentionnelle car, dans le cas contraire, ce n'est pas l'efficacité énergétique des modes de transport qui serait comparée, mais celle des systèmes énergétiques qui les sous-tendent. Cela signifie que l'efficacité d'un moteur électrique est comparée à celle d'un moteur à combustion, par exemple, et non la dépense énergétique de la production d'énergie nucléaire ou hydroélectrique par rapport au diesel. Le Tableau 11 donne une vue d'ensemble des résultats pour tous les trajets, les détails sont examinés dans les pages qui suivent.

Tableau 11 : Bilan énergétique (kg d'équivalents essence par personne et par trajet)

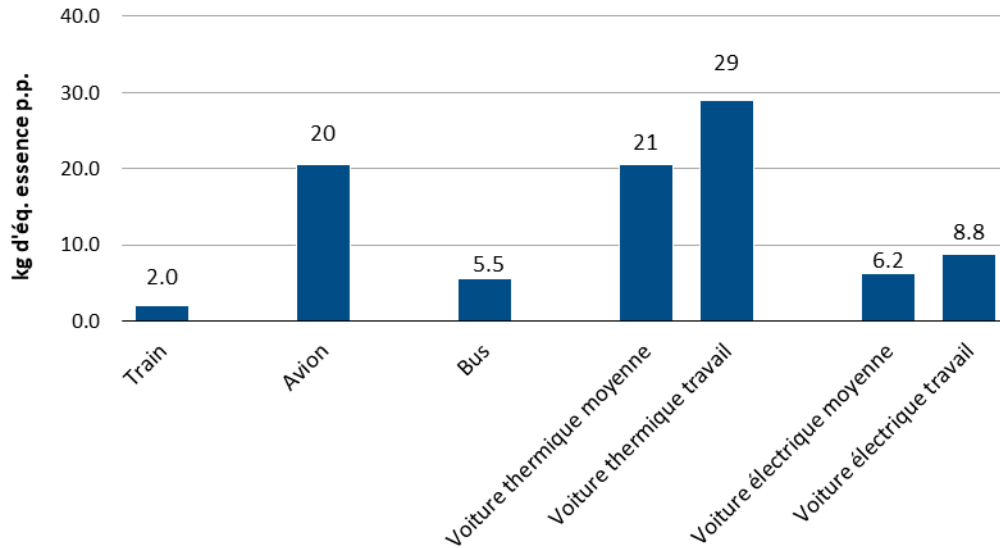
Trajet	Bilan énergétique final (kg d'éq. essence/personne)						
	Train	Avion	Bus	Voiture therm. Ø	Voiture therm. travail	Voiture électr. Ø	Voiture électr. travail
Genève-Paris	2.0	20.5	5.5	20.6	28.9	6.2	8.8
Lausanne-Paris	2.4	21.8	5.9	20.5	28.8	6.2	8.7
Bâle-Paris	2.2	20.7	5.9	20.2	28.4	6.1	8.6
Zurich-Paris	2.6	23.7	6.7	22.6	31.8	6.9	9.6
Lausanne-Marseille	3.3	18.6	6.8	22.5	31.6	6.8	9.6

Tableau INFRAS

Genève–Paris

En comparaison avec les modes de transport étudiés, la flotte de TGV Lyria affiche la plus faible consommation d'énergie finale sur la liaison Genève-Paris, avec environ 2.0 kg d'équivalent essence par personne et par trajet. Le bus en consomme environ 5.5 kg et la voiture électrique environ 6.2. Si le taux d'occupation est plus faible – par exemple dans le cas de voyages d'affaires – l'énergie consommée augmente et atteint 8.8 kg d'équivalent essence. L'avion consomme 20 kg d'équivalent essence. La voiture thermique, lorsqu'elle est utilisée pour le travail avec un taux d'occupation plus faible, consomme la plus grande quantité d'énergie avec 29 kg d'équivalent pétrole.

Figure 8 : Consommation d'énergie finale par personne et par trajet pour les différents modes de transport sur la liaison Genève-Paris

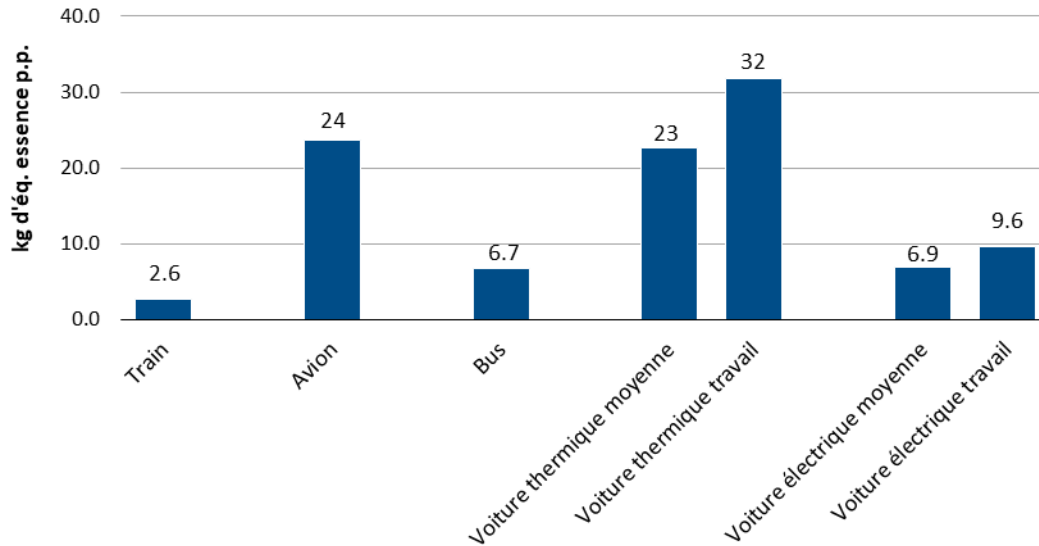


Graphe INFRAS

Zurich–Paris

La Figure 9 montre le bilan énergétique par personne et par trajet de Zurich à Paris. Le trajet en TGV Lyria a la plus faible consommation d'énergie par personne, avec environ 2.6 kg d'équivalent essence. La consommation d'énergie de bus est environ trois fois plus élevée, avec 6.7 kg d'équivalent essence, et il en va de même pour une voiture électrique avec près de 6.9 kg d'équivalent essence. La voiture thermique consomme environ 23 kg et l'avion environ 24 kg d'équivalent essence. En cas d'occupation plus faible des voitures (voyage d'affaires par exemple), la consommation d'énergie augmente par trajet et par personne pour atteindre 9.6 kg (voiture électrique) et 32 kg d'équivalent essence (voiture à carburant fossile).

Figure 9 : Consommation d'énergie finale par personne et par trajet pour les différents modes de transport sur la liaison Zurich-Paris

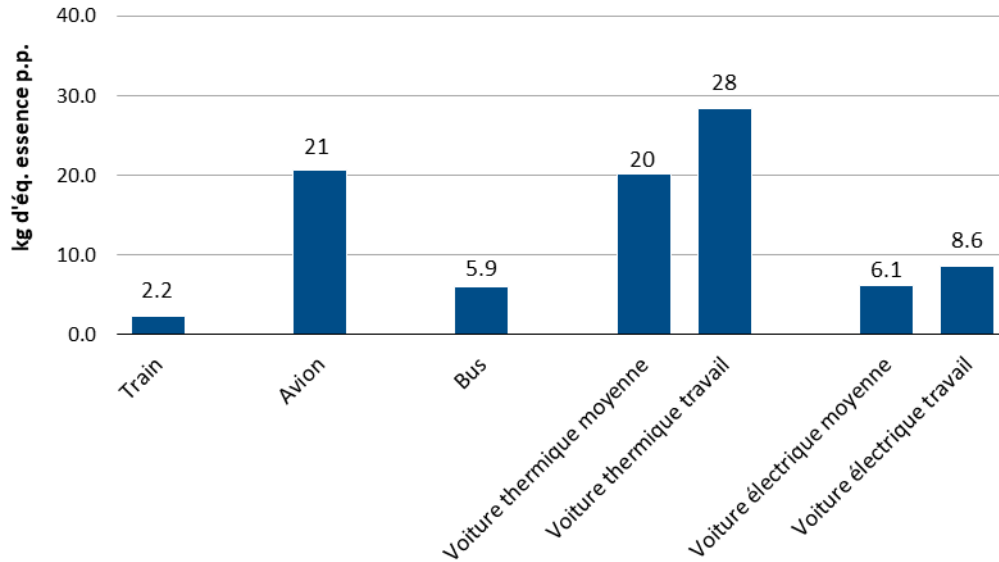


Graphe INFRAS

Bâle-Paris

La Figure 10 montre la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Bâle à Paris. Le trajet en TGV Lyria a la plus faible consommation d'énergie par personne, avec environ 2.2 kg d'équivalent essence. La consommation d'énergie du bus et de la voiture électrique est environ trois fois plus élevée, avec 5.9 kg et 6.1 kg d'équivalent essence. La voiture thermique consomme environ 20 kg et l'avion environ 21 kg d'équivalent essence. Ici également, les voitures avec un plus faible taux d'occupation consomment plus d'énergie. Sur le trajet Bâle-Paris, cela signifie 8.6 kg (voiture électrique) et 28 kg d'équivalent essence (voiture à carburant fossile).

Figure 10 : Consommation d'énergie finale par personne et par trajet des différents modes de transport sur la liaison Bâle-Paris

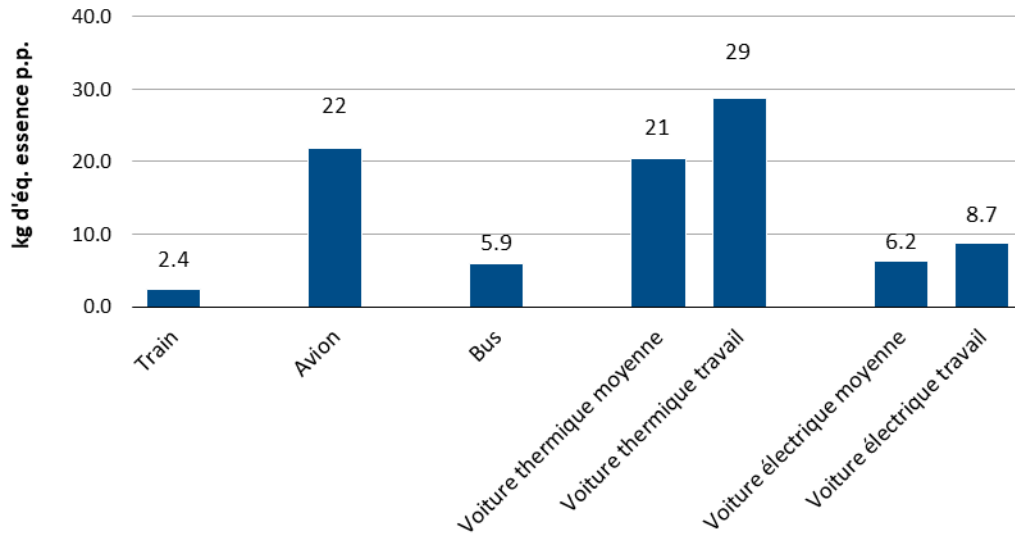


Graphe INFRAS

Lausanne–Paris

La Figure 11 montre la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Lausanne à Paris. Le trajet ferroviaire en TGV Lyria a la plus faible consommation d'énergie par personne, avec environ 2.4 kg d'équivalent essence. La consommation d'énergie d'un bus est plus de deux fois supérieure, avec 5.9 kg d'équivalent essence, et comparable à la voiture électrique, avec 6.2 kg d'équivalent essence. La voiture thermique consomme environ 21 kg et l'avion environ 22 kg d'équivalent essence. La consommation d'énergie augmente dans le cas d'un taux d'occupation plus faible pour les voyages d'affaires, passant à 8.7 kg (voiture électrique) et à 29 kg d'équivalent essence (voiture à carburant fossile).

Figure 11 : Consommation d'énergie finale par personne et par trajet des différents modes de transport sur l'axe Lausanne-Paris

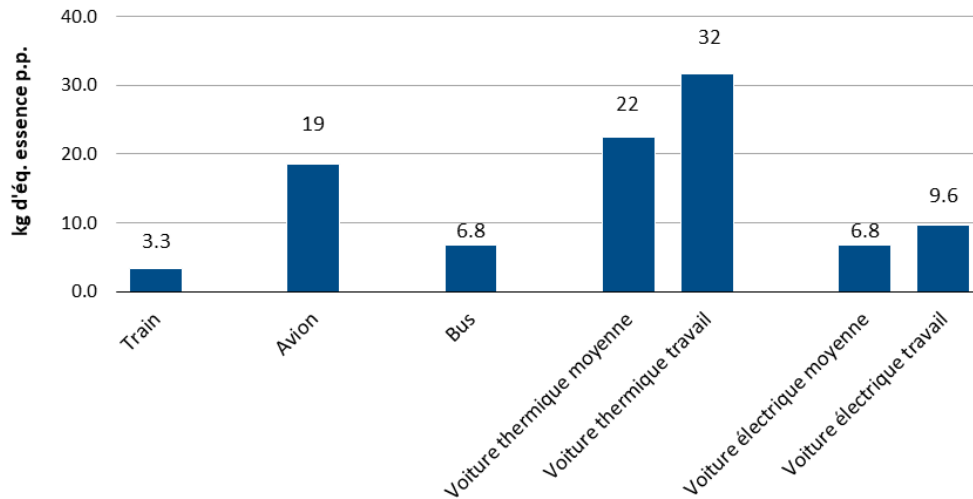


Graphe INFRAS

Lausanne–Marseille

La Figure 12 montre la consommation d'énergie finale par personne et par trajet de Lausanne à Marseille. Le trajet ferroviaire en TGV Lyria a la plus faible consommation d'énergie par personne, avec environ 3.3 kg d'équivalent essence. La consommation d'énergie d'un bus et d'un véhicule électrique est plus de deux fois supérieure, avec 6.8 kg d'équivalent essence chacun. L'avion consomme environ 19 kg et la voiture thermique environ 22 kg d'équivalent essence. En cas d'occupation plus faible des voitures (voyage d'affaires par exemple), la consommation d'énergie augmente par trajet et par personne pour atteindre 9.6 kg (voiture électrique) et 32 kg d'équivalent essence (voiture à carburant fossile).

Figure 12 : Consommation d'énergie finale par personne et par trajet des différents modes de transport sur l'axe Lausanne-Marseille



INFRAS graphe.

Changements depuis 2019

Depuis 2019, l'efficacité énergétique des modes de transport a évolué, ce qui a conduit à des changements dans leurs bilans énergétiques respectifs. La consommation d'énergie par personne et par trajet en train est restée constante depuis 2019. Une baisse de la consommation d'énergie peut être observée pour les voyages en avion, ce qui peut être attribué à une efficacité accrue ou à une adaptation des modèles d'avions les plus couramment utilisés. En revanche, la consommation d'énergie des voitures (en particulier des voitures électriques) et des bus a augmenté (légèrement). Cela pourrait être dû au fait que les voitures, en particulier, deviennent de plus en plus grandes et lourdes et sont donc moins efficaces sur le plan énergétique.

3.3. Coûts environnementaux et coûts liés aux accidents

Dans cette section, les coûts environnementaux et liés aux accidents attribués aux différents modes de transport sont indiqués pour les cinq itinéraires. Pour plus de détails sur les aspects pris en compte dans ce calcul, veuillez consulter le Tableau 8. Les résultats sont présentés en francs suisses par personne et par trajet. Une vue d'ensemble des résultats est donnée dans le Tableau 12, les détails sont abordés dans les pages suivantes.

Tableau 12 : Coûts environnementaux et coûts liés aux accidents (CHF par personne et par trajet)

Trajet	Coûts environnementaux et coûts liés aux accidents (CHF/personne)						
	Train	Avion	Bus	Voiture therm. Ø	Voiture therm. travail	Voiture électr. Ø	Voiture électr. travail
Genève-Paris	2.6	29.0	5.1	31.0	40.3	22.9	28.8
Lausanne-Paris	3.1	30.9	5.7	30.9	40.1	22.8	28.7
Bâle-Paris	2.9	29.3	5.6	30.4	39.5	22.4	28.3
Zurich-Paris	3.4	33.5	6.4	34.1	44.3	25.1	31.7
Lausanne-Marseille	4.4	26.2	6.8	33.9	44.0	25.0	31.5

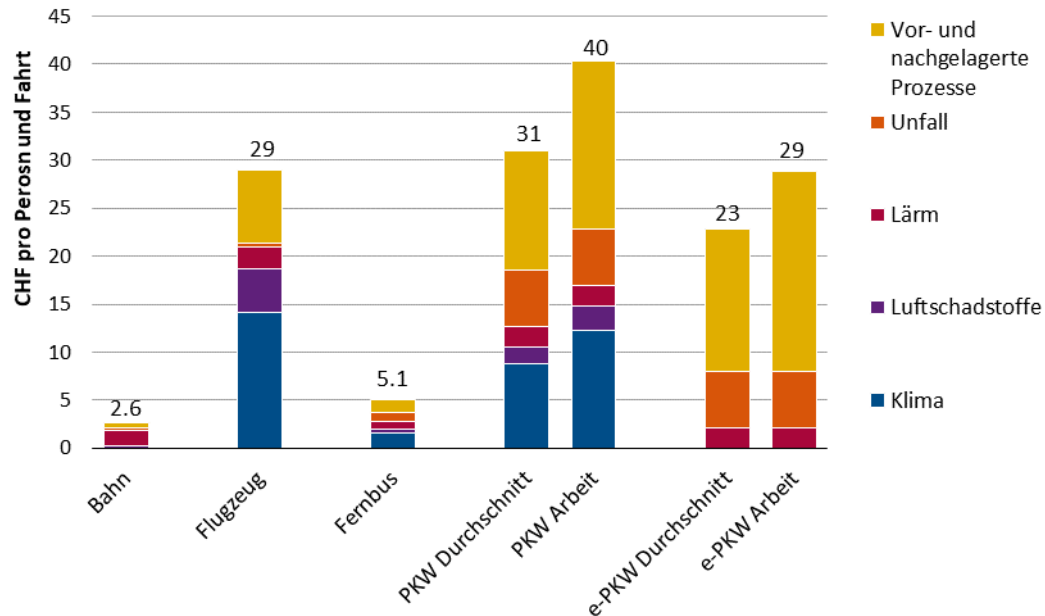
Tableau INFRAS

Pour le premier itinéraire (Genève-Paris), un graphique et une analyse supplémentaire sont présentés, qui donnent un aperçu des proportions des différentes catégories de coûts en termes de coûts environnementaux et d'accidents globaux. Pour les autres itinéraires, les graphiques supplémentaires se trouvent dans l'annexe.

Genève-Paris

La figure 13 montre les coûts environnementaux et liés aux accidents moyens (effets externes) pour un trajet de Genève à Paris. Les coûts environnementaux et liés aux accidents les plus bas sont générés par le chemin de fer, avec environ 2.6 CHF par personne et par trajet, suivi par le bus, avec 5.1 CHF par personne et par trajet. Si une voiture électrique est choisie pour le voyage, les coûts moyens s'élèvent à 23 CHF par personne (occupation moyenne). En cas d'occupation réduite (par exemple pour un voyage d'affaires), les coûts passent à 29 CHF. Un voyage en avion de Genève à Paris génère des coûts environnementaux et liés aux accidents d'environ 29 CHF par personne. Pour les voitures thermiques à moteur à combustion avec un taux d'occupation moyen, les coûts sont d'environ 31 CHF par personne. Si le taux d'occupation est plus faible pour les voyageurs d'affaires, les coûts passent à 40 CHF par personne.

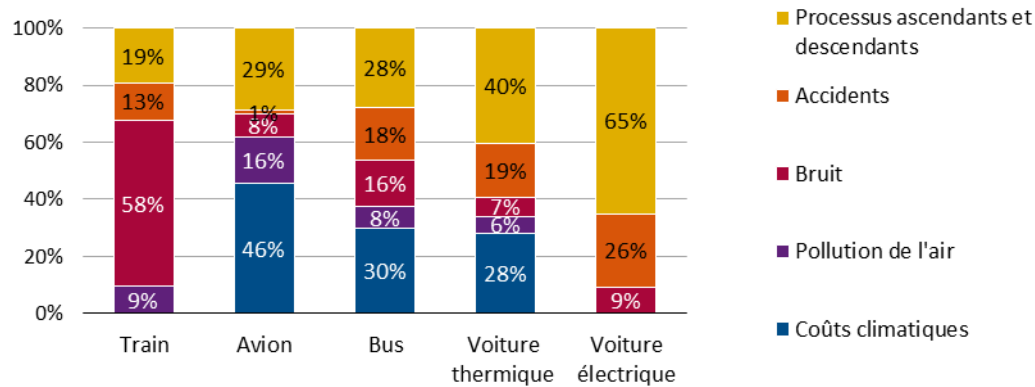
Figure 13 : Coûts environnementaux et d'accidents moyens par personne et par trajet sur la ligne Genève-Paris



Graphe INFRAS

La Figure 14 montre la proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents pour chaque mode de transport. Pour le train, les coûts liés au bruit représentent environ 58%, suivis par les processus en amont et en aval avec environ 19% (pour la production d'énergie, le matériel roulant et l'infrastructure) et les coûts liés aux accidents avec 13%. Les coûts directs de la pollution de l'air et les coûts climatiques représentent le reste (9%). Pour les avions, les coûts climatiques représentent le plus grand pourcentage des coûts environnementaux et des coûts d'accidents d'un vol, soit environ 46%. Les coûts des processus en amont et en aval représentent 29%, les coûts des polluants atmosphériques 16%, le bruit 8% et les coûts des accidents 1%. Pour le bus, les proportions sont les suivantes, classées par ordre de grandeur: les coûts climatiques représentent la plus grande part des coûts globaux (30%), suivis par les coûts des processus en amont et en aval (28%), puis des coûts liés aux accidents (18%), les coûts liés au bruit (environ 16%) et finalement la pollution de l'air (8%). Pour la voiture thermique, les processus en amont et en aval représentent la plus grande partie (40%), suivis des coûts climatiques 28%, les coûts des accidents environ 19%, les coûts du bruit 7% et les coûts de la pollution de l'air 6%. La voiture électrique n'engendre pas de coûts liés au climat et à la pollution de l'air dans son fonctionnement direct. 65% des coûts proviennent des processus en amont et en aval, 26% des accidents et 9% des coûts liés au bruit.

Figure 14 : Proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents (Genève-Paris)

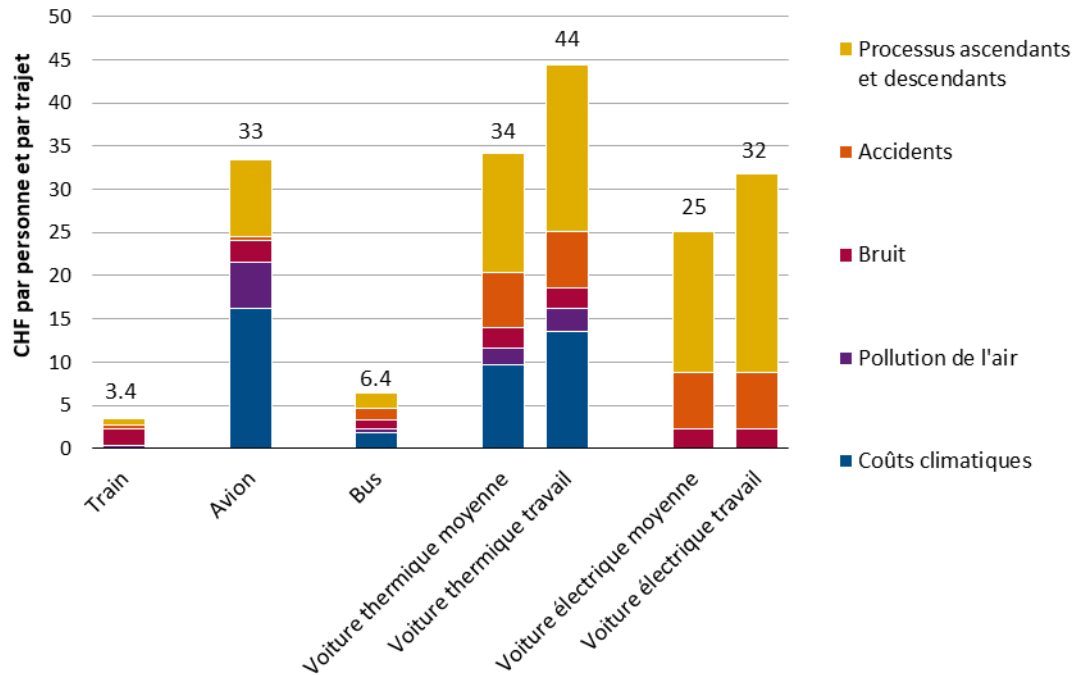


Grphe INFRAS

Zurich – Paris

La Figure 15 montre les coûts environnementaux et liés aux accidents des différents modes de transport, différenciés selon les catégories de coûts considérées. Un voyage en TGV Lyria de Zurich à Paris engendre des coûts environnementaux et liés aux accidents d'environ 3.4 CHF par personne. Un voyage en bus génère environ 6.4 CHF par personne. Si l'on choisit une voiture électrique pour le voyage, les coûts environnementaux et d'accident moyens par personne (occupation moyenne) s'élèvent à 25 CHF. Si l'occupation de la voiture est réduite, les coûts passent à 32 CHF par personne par voyage. Un voyage en avion de Zurich à Paris génère des coûts environnementaux et liés aux accidents d'environ 33 CHF par personne. Pour une voiture thermique (occupation moyenne), le coût est d'environ 34 CHF par personne ; il passe à 44 CHF si le taux d'occupation est réduit, par exemple lors d'un voyage d'affaires. Pour toutes les voitures particulières, il convient de noter que les coûts seraient considérablement réduits si les taux d'occupation étaient augmentés (2 à 5 personnes par véhicule).

Figure 15 : Coûts environnementaux et coûts des accidents par personne et par trajet, par mode de transport, sur la liaison Zurich-Paris

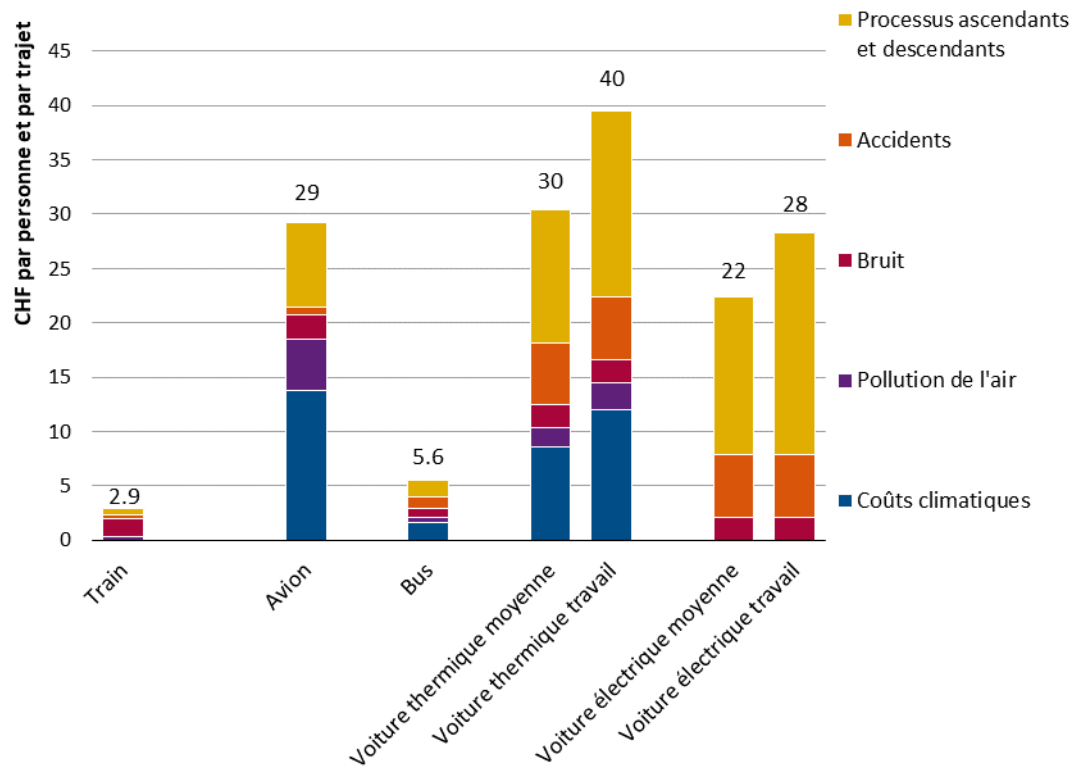


Graphe INFRAS

Bâle – Paris

Un voyage en TGV Lyria de Bâle à Paris génère des coûts environnementaux et d'accidents d'environ 2.9 CHF par personne. En comparaison, un voyage en bus génère environ 5.6 CHF de coûts par personne. Le choix de la voiture électrique avec une occupation moyenne (1.53 personne par voiture) entraîne des coûts environnementaux et liés aux accidents de 22 CHF par personne en moyenne. Les coûts passent à 28 CHF en cas d'occupation réduite (voyage d'affaires). Un voyage en avion de Bâle à Paris engendre des coûts environnementaux et d'accidents d'environ 29 CHF par personne. Pour une voiture thermique à moteur à combustion avec un taux d'occupation moyen, il s'agit d'environ 30 CHF par personne. Si le taux d'occupation est plus faible, les coûts augmentent de 33% et passent à 40 CHF par personne.

Figure 16 : Coûts environnementaux et coûts des accidents par personne et par trajet, par mode de transport, sur la liaison Bâle-Paris

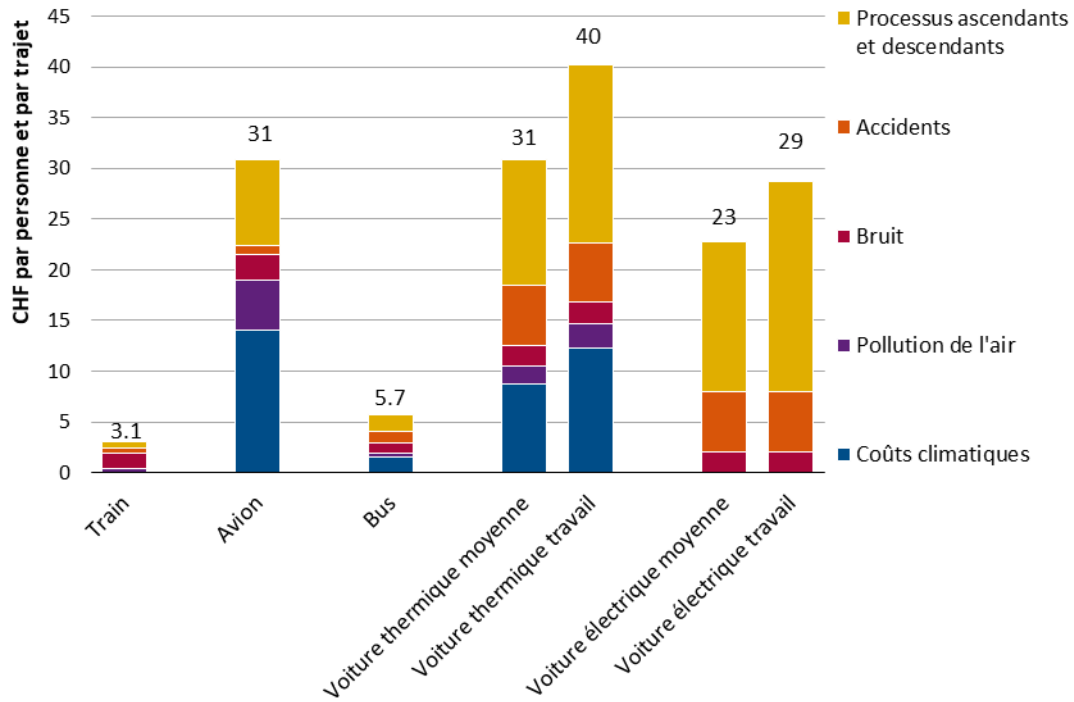


Grphe INFRAS

Lausanne – Paris

Un voyage en TGV Lyria de Lausanne à Paris génère des coûts environnementaux et liés aux accidents d'environ 3.1 CHF par personne. Un voyage en bus mène à environ 5.7 CHF par personne. Le choix de la voiture électrique (occupation de 1.53 personne par voiture) entraîne des coûts environnementaux et d'accidents de 23 CHF par personne en moyenne. Si l'occupation de la voiture baisse, comme lors d'un voyage d'affaires par exemple, les coûts passent à 29 CHF. Un voyage en avion de Lausanne à Paris engendre des coûts environnementaux et d'accidents d'environ 31 CHF par personne. Pour une voiture thermique à moteur à combustion avec un taux d'occupation moyen, les coûts se situent au même niveau avec environ 31 CHF par personne. Si le taux d'occupation est plus faible pour les voyageurs d'affaires, les coûts passent à 40 CHF par personne.

Figure 17 : Coûts environnementaux et coûts des accidents par personne et par trajet, par mode de transport, sur la liaison Lausanne-Paris



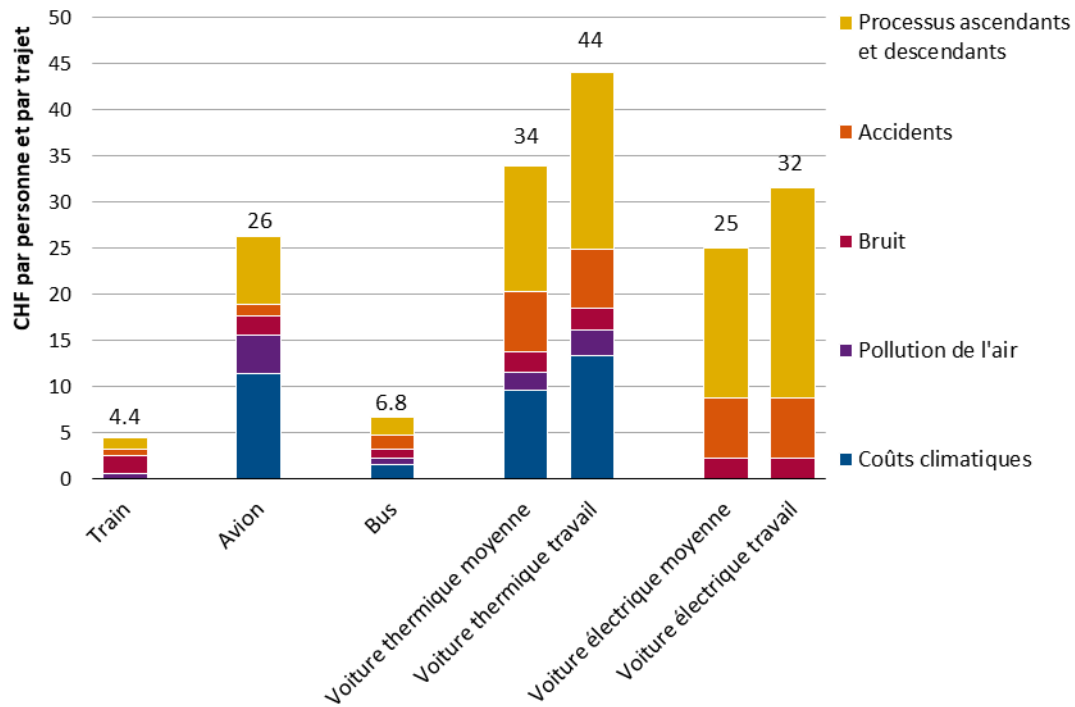
Graphe INFRAS

Lausanne – Marseille

Un voyage en TGV Lyria de Lausanne à Marseille génère des coûts environnementaux et d'accidents d'environ 4.4 CHF par personne. Un voyage en bus engendre des coûts légèrement plus élevés d'environ 6.8 CHF par personne. Le choix de voyager en voiture électrique avec une occupation moyenne entraîne environ 25 CHF par personne en coûts environnementaux et liés aux accidents. En cas d'occupation réduite, les coûts augmentent et passent à 32 CHF. Un voyage en avion de Genève à Marseille⁴ engendre des coûts environnementaux et liés aux accidents d'environ 26 CHF par personne. Pour une voiture conventionnelle à moteur à combustion avec un taux d'occupation moyen, il s'agit d'environ 34 CHF par personne. Si le taux d'occupation est plus faible, les coûts passent à 44 CHF par personne.

⁴ Aucun vol direct n'étant proposé pour l'instant sur ce trajet, il s'agit d'une connexion hypothétique.

Figure 18 : Coûts environnementaux et coûts des accidents par personne et par trajet, par mode de transport, sur la liaison Lausanne-Marseille



Grphe INFRAS

Changements depuis 2019

Entre 2019 et 2023, les coûts environnementaux et les coûts liés aux accidents ont augmenté pour tous les modes de transport. Les coûts totaux sont (légèrement) plus élevés pour les avions, et il en va de même pour les voitures thermiques (occupation moyenne et faible). La mise à jour a également entraîné de légers changements dans les pourcentages (voir la Figure 14 et l'annexe) : La part des coûts imputables aux processus en amont et en aval a considérablement augmenté pour les bus et les voitures. En revanche, la part des coûts imputables aux polluants atmosphériques est plus faible, en particulier pour les bus.

3.4. Temps de trajet et temps exploitable

Pour les voyages professionnels, le temps de trajet durant lequel du travail peut être effectué – le temps exploitable – peut être un critère important dans le choix d'un mode de transport. Il convient également de noter que le temps de trajet exploitable présente également un avantage économique. C'est pourquoi ce chapitre compare le temps exploitable pour les différents modes de transport. Les calculs prennent également en compte les trajets en amont et en aval du trajet principal. Or, le temps exploitable dans ces trajets avant et après le trajet principal a été considéré comme nul.

Dans ces cas, le travail au cours d'un voyage est défini comme le travail sur un appareil technique (par exemple un ordinateur portable) qui va au-delà des appels téléphoniques. Le bus longue distance représente un cas particulier : De nombreux bus circulent la nuit. En principe, il est également possible d'y travailler, mais en réalité, ce temps de trajet n'est pas comptabilisé comme du temps de travail. Certaines correspondances sont également disponibles pendant la journée. Dans certains cas, cependant, il faut changer de bus. Il n'est donc pas facile de calculer une valeur moyenne pour les bus longue distance. Les exemples suivants sont basés sur le cas idéal où le bus circule pendant la journée et où qu'un seul changement de bus n'a lieu.

Le Tableau 13 donne un aperçu du temps de trajet exploitable pour chaque mode de transport. Lors d'un voyage en bus, le temps de travail possible est le plus élevé, ce qui est également dû au fait que la durée totale du voyage est comparativement élevée. Le voyage en TGV Lyria offre une part très élevée de temps exploitable mesuré au temps total du trajet – et ce sur tous les itinéraires.

Tableau 13 : Temps de trajet exploitable : en heures par personne et par trajet

Trajet	Temps de trajet exploitable (h)			
	Train	Avion	Bus	Voiture travail
Genève-Paris	3.0	0.8	7.3	0.0
Lausanne-Paris	3.5	0.8	7.1	0.0
Bâle-Paris	2.9	0.9	7.7	0.0
Zurich-Paris	3.8	0.9	8.9	0.0
Lausanne-Marseille	4.2	1.9	6.8	0.0

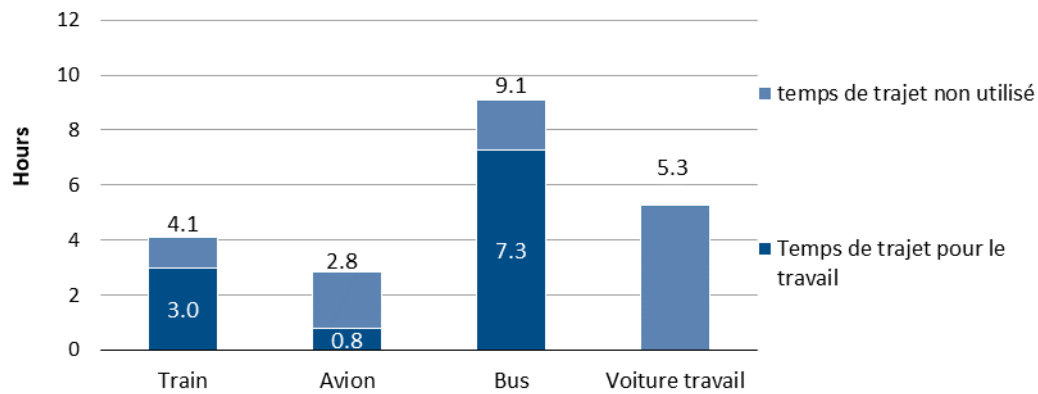
Tableau INFRAS

Genève – Paris

Les voyageurs du TGV Lyria disposent de trois heures de travail sur les quelque quatre heures de voyage total de Genève-Paris (Annemasse-Versailles). Dans l'avion, seulement un peu moins d'une heure sur les quelque 3 heures de voyage peut être utilisée de manière productive. En théorie, environ 7 heures sur les 9 heures totales peuvent être travaillées dans le bus longue

distance. Dans la réalité, cela devrait être moins, car les trajets se font souvent de nuit. Le trajet en voiture sur cet itinéraire durent environ 5 heures. Or, étant donné que la personne conduit, le temps exploitable pour travailler est nul.

Figure 19 : Genève-Paris : Proportion du temps de trajet pouvant être utilisé pour travailler

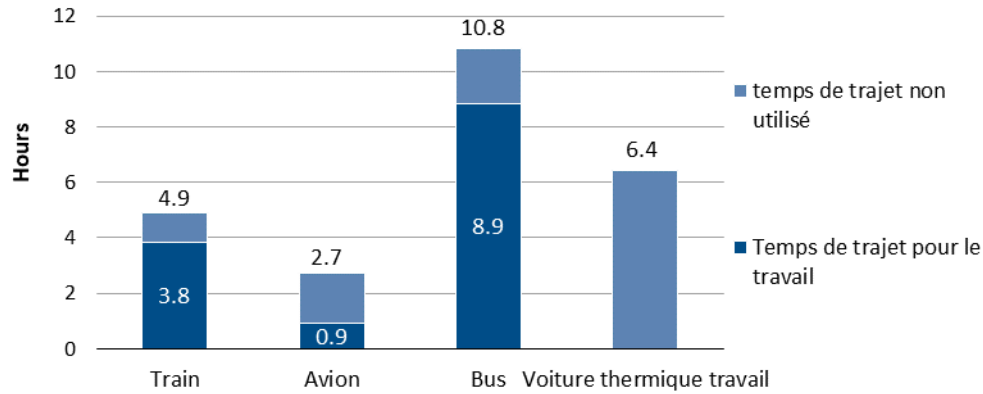


Graphe INFRAS

Zurich – Paris

C'est en voyageant en train qu'une personne maximise ses heures productives, par exemple pour travailler. En effet, sur les 5 heures que dure le trajet entre le centre-ville de Zurich et Boulogne-Billancourt, près de 4 heures peuvent être consacrées au travail. Globalement, le temps de trajet en avion est le plus court sur cet itinéraire. Cependant, seulement un peu moins d'une heure peut être utilisée pour le travail. En théorie, près de 9 heures sur les 11 heures totales peuvent être consacrées au travail dans le bus longue distance. En réalité, il est probable que ce soit moins (trajets de nuit). Les trajets en voiture sur cet itinéraire durent environ 6.4 heures, mais aucune heure ne peut être effectivement utilisée pour travailler.

Figure 20 : Zurich–Paris: Proportion du temps de trajet pouvant être utilisé pour travailler

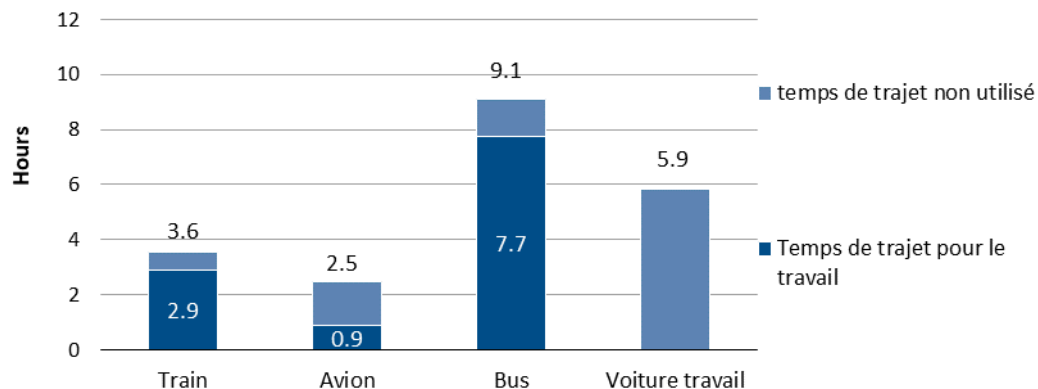


Graphe INFRAS

Bâle– Paris

Sur les 3.6 heures que dure le trajet entre Reinach BL et le centre de Paris, les voyageurs du TGV Lyria disposent de près de 3 heures pour travailler. Dans l'avion, sur les 2.5 heures de voyage, seule une heure environ peut être utilisée de manière productive. En théorie, près de 8 heures sur les 9 heures totales peuvent être travaillées dans un bus longue distance ; en pratique, il est probable que ce soit moins (trajets de nuit). Les trajets en voiture sur cet itinéraire durent environ 6 heures. Or, aucune de ces heures ne peut être utilisée pour travailler car le voyageur est aussi la personne qui conduit le véhicule.

Figure 21 : Bâle –Paris : Proportion du temps de trajet pouvant être utilisé pour travailler

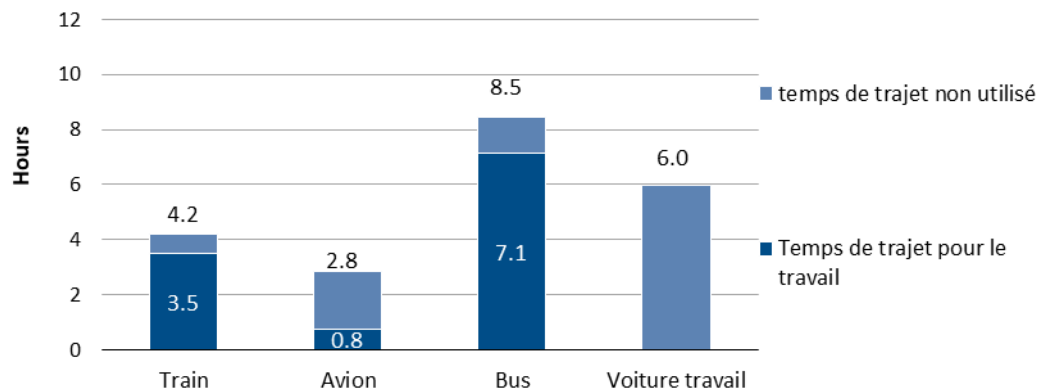


Graphe INFRAS

Lausanne – Paris

Les voyageurs du TGV Lyria disposent d'environ 3.5 heures de travail sur les plus de 4 heures que dure le voyage de Lausanne à Paris (de Montreux au centre de Paris). Dans l'avion, seulement un peu moins d'une heure sur les quelque 3 heures de voyage peut être utilisée de manière productive. Théoriquement, environ 7 heures sur les 8.5 heures totales peuvent être consacrées au travail dans le bus longue distance. En réalité, il est probable que ce soit moins (trajets de nuit). Les trajets en voiture sur cet itinéraire durent environ 6 heures. Aucune de ces heures ne peut être utilisée pour travailler.

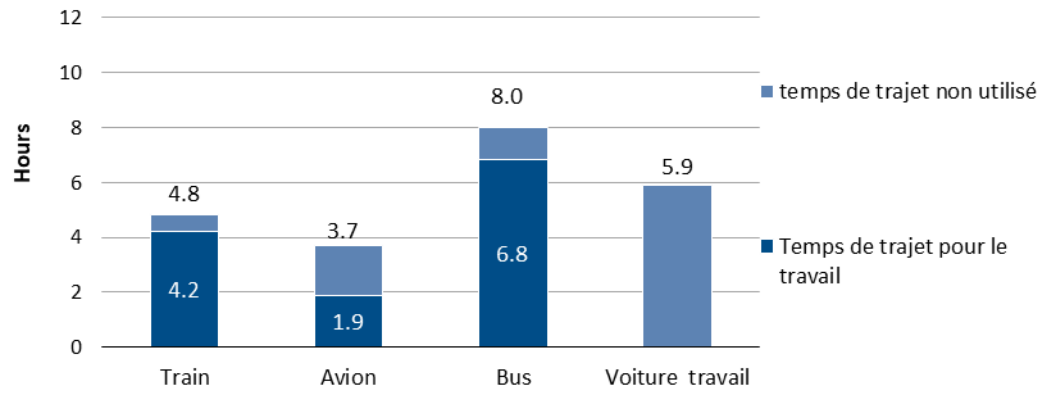
Figure 22 : Lausanne–Paris : Proportion du temps de trajet pouvant être utilisé pour travailler



Graphe INFRAS

Lausanne – Marseille

Les voyageurs de TGV Lyria disposent d'environ 4 heures de travail sur les presque 5 heures que dure le voyage de Lausanne à Marseille (de Lausanne au centre-ville de Marseille). Dans l'avion, environ 2 heures sur les presque 4 heures de voyage peuvent être utilisées de manière productive. En théorie, environ 7 heures sur les 8 heures totales peuvent être travaillées dans le bus longue distance. En réalité, c'est probablement moins (trajets de nuit). Les trajets en voiture sur cet itinéraire durent presque 6 heures. Or, ce temps de voyage ne peut être exploité dû à l'activité de conduite.

Figure 23 : Lausanne – Marseille : Proportion du temps de trajet pouvant être utilisé pour travailler

Graphe INFRAS

4. Conclusions

La comparaison écologique des modes de transport, à savoir le train (TGV Lyria), la voiture (électrique et conventionnelle), le bus et l'avion sur les cinq itinéraires différents entre la Suisse et la France, permettent de faire les constatations suivantes :

- Dans une comparaison par personne et par trajet, **l'occupation des véhicules est une variable centrale**. Les modes de transport TGV Lyria, bus et avion sont bien occupés en moyenne et les taux pour les bus et les avions ont même augmenté au cours des quatre dernières années. En contraste à cela, la voiture a un taux d'occupation plus faible (1.53 personne par véhicule) en moyenne, et encore plus bas si l'on considère les voyages d'affaires séparément.
- Avec les taux d'occupation actuels des modes de transport étudiés, le mode de transport présentant le plus grand avantage environnemental en termes **d'empreinte climatique** est clairement le chemin de fer, c'est-à-dire le TGV Lyria. Avec de légères différences sur chaque itinéraire, les émissions de gaz à effet de serre par personne (comprenant également les processus préliminaires) pour un voyage en TGV Lyria sur l'itinéraire principal sont environ 6 fois inférieures à celles du bus, environ 20 fois inférieures à celles de la voiture électrique, environ 37 fois inférieures à celles de la voiture thermique à carburant fossile et environ 41 fois inférieures à celles de l'avion. Du point de vue de la protection du climat, un voyage en train avec TGV Lyria offre le plus grand avantage sur les itinéraires étudiés. Sur les cinq trajets étudiés, l'impact des trajets en amont et en aval du trajet principal sont négligeables par rapport au trajet principal.
- Le **bilan énergétique** a volontairement été établi sur la base de l'énergie finale des différents modes de transport, car l'étude devait comparer l'efficacité énergétique des modes de transport et non l'efficacité des différents systèmes énergétiques en arrière-plan. En d'autres termes, l'efficacité d'un moteur électrique est comparée à celle d'un moteur à combustion et non la production d'électricité à la production de diesel. Sur cette base, la comparaison des différents bilans énergétiques montre que le TGV Lyria présente la plus haute efficacité énergétique. Viennent ensuite les bus à longue distance, suivis des voitures électriques. Les voitures thermiques sont en moyenne environ 7 à 14 fois moins efficaces sur le plan énergétique par personne et par trajet. Le transport aérien est en moyenne environ 6 à 10 fois moins efficace sur le plan énergétique, comparé au train. Depuis 2019, la consommation d'énergie de la nouvelle flotte introduite à l'époque est restée la même. Toutefois, d'autres modes de transport connaissent une évolution de leur efficacité énergétique en raison de développements technologiques ou de tendances de consommation : Alors que l'avion est devenu plus efficace, les trajets en voiture ont évolué dans le sens inverse, ce qui

s'explique par le fait que les voitures sont de plus en plus grandes et de plus en plus lourdes, réduisant leur bilan énergétique.

- Pour déterminer **les coûts environnementaux et liés aux accidents** par personne et par trajet, les cinq catégories de coûts que sont le climat, les polluants atmosphériques, le bruit, les accidents et les processus en amont et en aval ont été prises en compte. Les trajets ferroviaires effectués par le TGV Lyria génèrent les coûts environnementaux et d'accidents les plus bas par personne et par trajet sur tous les itinéraires étudiés. Cela s'explique en grande partie par le fait que le TGV Lyria ne génère pratiquement aucun coût direct dans les domaines du climat, de la pollution de l'air et des accidents en cours d'exploitation, alors que ces catégories de coûts sont les plus élevées pour les autres modes de transport. Les coûts environnementaux et d'accidents générés par un trajet en bus sont deux à trois fois plus élevés que ceux du TGV Lyria. Les coûts engendrés en utilisant la voiture électrique ainsi que l'avion sont environ 6 à 11 fois plus élevés en comparaison au TGV Lyria. Les coûts environnementaux et liés aux accidents de la voiture thermique (essence / diesel) sont environ 8 à 15 fois plus élevés que ceux du TGV Lyria. En comparant ces résultats aux données obtenues en 2019, on constate une augmentation des coûts environnementaux et des coûts des accidents en termes totaux pour les avions et les voitures thermiques. Les parts se sont également déplacées pour certains modes de transport, de sorte que la part des coûts causés par les processus en amont et en aval a augmenté de manière significative pour les bus et les voitures. Inversement, la part des coûts attribuée aux polluants atmosphériques a diminué, en particulier pour les bus.
- En particulier pour les entreprises, **l'exploitation du temps de trajet** comme temps de travail devrait être un critère plus conséquent lors du choix du mode de transport pour les déplacements professionnels. L'étude a porté sur l'ensemble du temps de déplacement, y compris les trajets en amont et en aval du trajet principal. Un voyage en train permet d'utiliser environ 80 % du temps de voyage pour travailler. Il en va de même pour les bus. Toutefois, il convient de noter que les déplacements longue distance en bus se font souvent de nuit, ce qui réduit fortement le temps de travail potentiel lors du voyage. Sur un vol, seuls 35% du temps de voyage total peuvent être considérés comme du trajet exploitable. La définition du travail productif est le travail avec un dispositif technique (ordinateur portable, etc.) qui va au-delà du téléphone. Par conséquent, il n'y a pas de temps de travail exploitable lors d'un voyage en voiture.
- En **comparant globalement les trajets longue distance** étudiés, le train, notamment le TGV Lyria, se révèle être le meilleur choix dans tous les domaines et pour tous les trajets. De plus, il a amélioré ses performances au cours des quatre dernières années. En termes d'empreinte climatique et de coûts environnementaux et d'accidents, le TGV Lyria est clairement

en tête de course. En ce qui concerne impact climatique, le transport en bus vient après le transport ferroviaire, générant toujours des émissions de gaz à effet de serre et des coûts environnementaux environ 6 fois plus élevés que le train. La voiture et l'avion présentent un bilan climatique et environnemental nettement moins bon que le chemin de fer (TGV Lyria). Bien que la voiture électrique présente une meilleure empreinte climatique et des coûts environnementaux moins élevés que la voiture conventionnelle, l'empreinte climatique et les coûts environnementaux de la voiture électrique restent supérieurs à ceux du TGV Lyria sur les itinéraires étudiés. Le chemin de fer présente donc actuellement un net avantage environnemental par rapport à la voiture, même avec l'électrification progressive des voitures. L'avantage environnemental du chemin de fer par rapport à l'avion est tout aussi significatif.

Annexe

Empreintes climatiques pour chaque itinéraire en fonction de la source d'émissions

Zurich - Paris

Tableau 14 : Emissions de gaz à effet de serre, Zurich-Paris, selon la source d'émission

Kg CO ₂ -eq / Personne				Voiture thermique moyenne	Voiture thermique travail	Voiture électrique moyenne	Voiture électrique moyenne
	Train	Avion	Bus				
Émissions directes Opération	0	105.0	11.9	62.5	87.8	0	0
Approvisionnement en énergie	1.4	22	3.2	24.7	35	18	25
Production de véhicules et d'infrastructures	1.8	4.7	3.2	21	30	39	54
Total	3.1	132	18	109	153	57	79
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.4</i>	<i>127</i>	<i>15</i>	<i>87</i>	<i>122</i>	<i>18</i>	<i>25</i>

Bâle - Paris

Tableau 15 : Emissions de gaz à effet de serre, Bâle-Paris, selon la source d'émission

Kg CO ₂ -eq / Personne				Voiture thermique moyenne	Voiture thermique travail	Voiture électrique moyenne	Voiture électrique moyenne
	Train	Avion	Bus				
Émissions directes Opération	0	90	10	56	78	0	0
Approvisionnement en énergie	1.2	19	2.8	22.0	31	16	22
Production de véhicules et d'infrastructures	1.5	4.0	2.9	19	27	35	48
Total	2.7	113	16	97	136	50	71
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.2</i>	<i>109</i>	<i>13</i>	<i>78</i>	<i>109</i>	<i>16</i>	<i>22</i>

Lausanne - Paris

Table 16 : Emissions de gaz à effet de serre, Lausanne-Paris, selon la source d'émission

Kg CO ₂ -eq / Personne				Voiture thermique moyenne	Voiture thermique travail	Voiture électrique moyenne	Voiture électrique moyenne
	Train	Avion	Bus				
Émissions directes Opération	0	91	10	57	79	0	0
Approvisionnement en énergie	1.1	19	2.6	22.4	31	16	23
Production de véhicules et d'infrastructures	1.4	4.0	2.7	19	27	35	49
Total	2.4	115	15	98	138	51	72
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.1</i>	<i>111</i>	<i>12</i>	<i>79</i>	<i>111</i>	<i>16</i>	<i>23</i>

Lausanne - Marseille

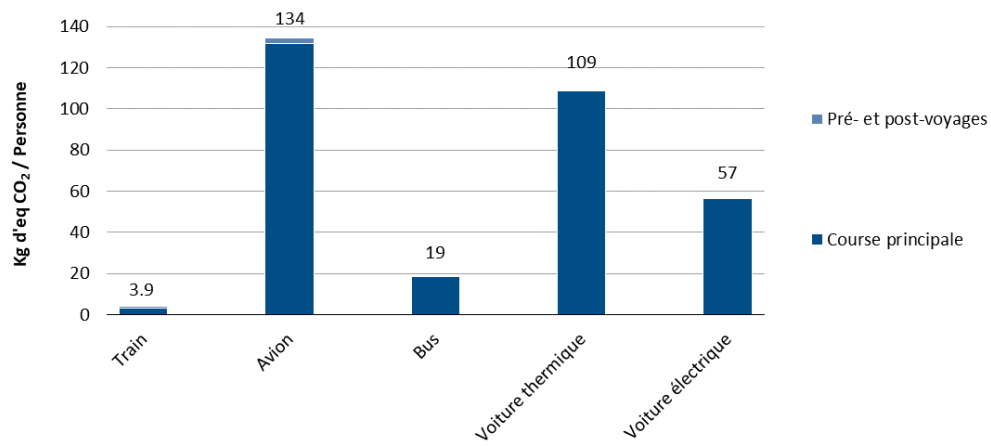
Table 17 : Emissions de gaz à effet de serre, Lausanne-Marseille, selon la source d'émission

Kg CO ₂ -eq / Personne				Voiture thermique moyenne	Voiture thermique travail	Voiture électrique moyenne	Voiture électrique moyenne
	Train	Avion	Bus				
Émissions directes Opération	0	74	10	62	87	0	0
Approvisionnement en énergie	1.3	16	2.8	24.5	34	18	25
Production de véhicules et d'infrastructures	1.7	3.3	2.8	21	30	38	54
Total	2.9	93	16	108	152	56	79
<i>Total selon la norme SN EN 16258</i>	<i>1.3</i>	<i>90</i>	<i>13</i>	<i>87</i>	<i>122</i>	<i>18</i>	<i>25</i>

Empreintes climatiques par itinéraire, incluant les trajets en amont et en aval du trajet principal

Zurich - Paris

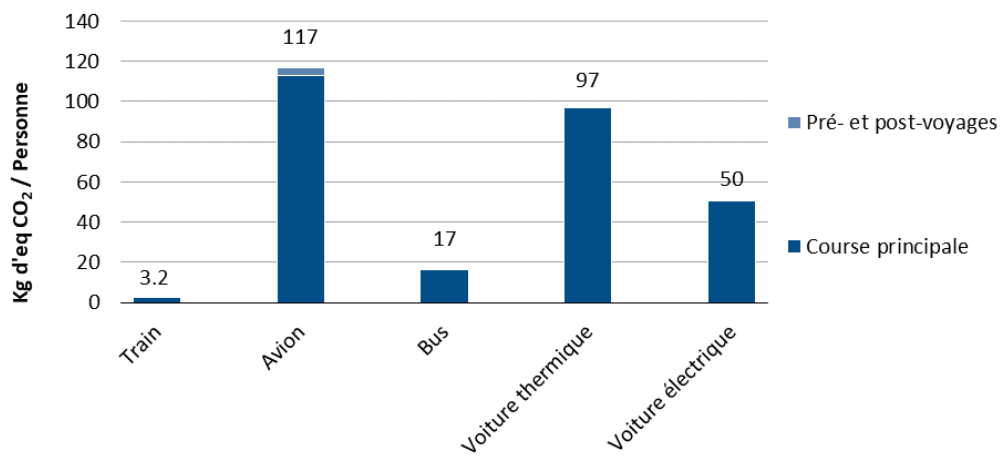
Figure 24 : Valeurs moyennes par mode de transport (empreinte climatique en eq. CO_2 par personne et par trajet)



Graphe INFRAS

Bâle - Paris

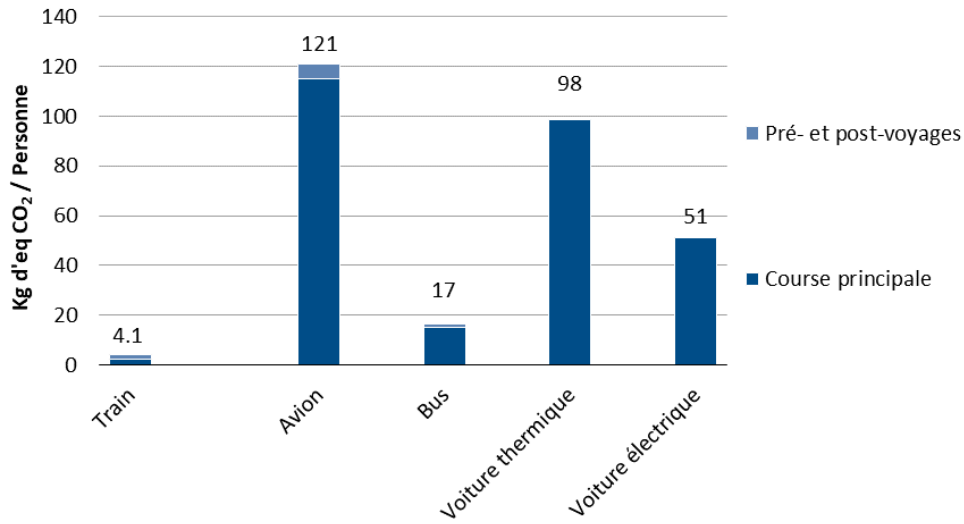
Figure 25 : Valeurs moyennes par mode de transport (empreinte climatique en eq. CO_2 par personne et par trajet)



Graphe INFRAS.

Lausanne - Paris

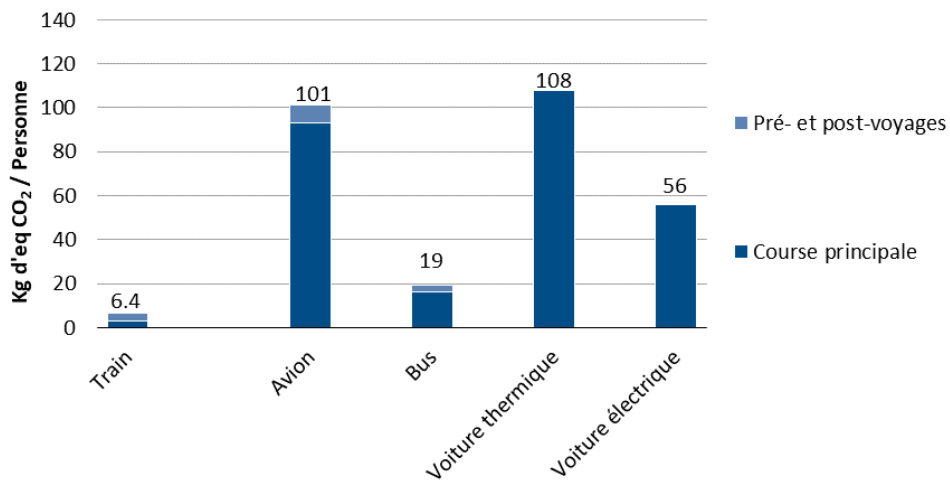
Figure 26 : Valeurs moyennes par mode de transport (empreinte climatique en eq. CO_2 par personne et par trajet)



Graphe INFRAS

Lausanne - Marseille

Figure 27 : Valeurs moyennes par mode de transport (empreinte climatique en eq. CO_2 par personne et par trajet)

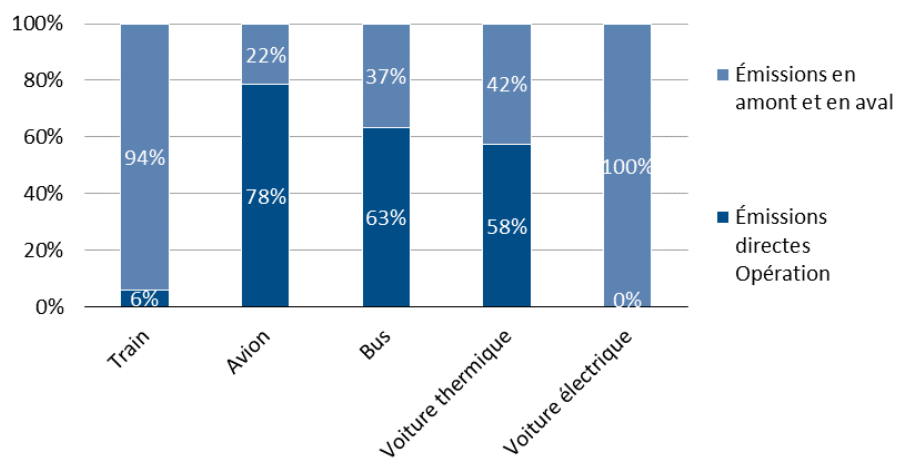


Graphe INFRAS

Parts des émissions de gaz à effet de serre directs et indirects (en amont et en aval)

Zurich – Paris

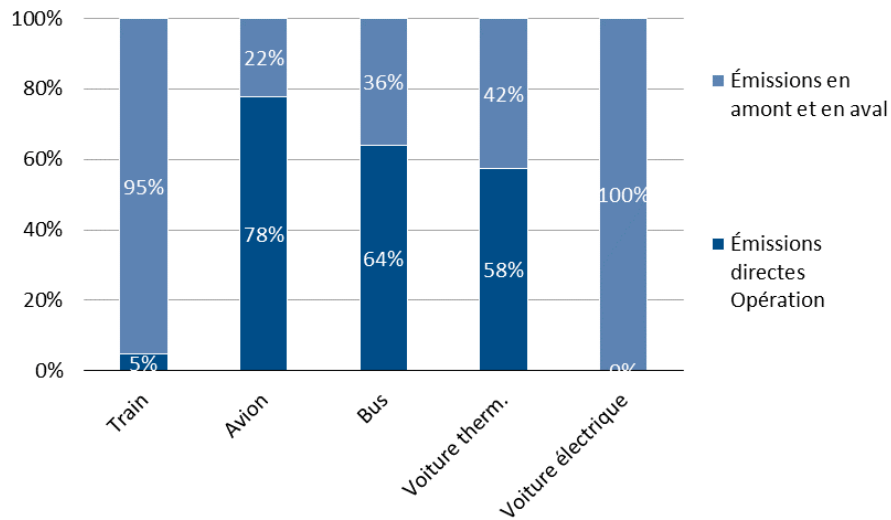
Figure 28 : Zurich-Paris : Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport à l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre



Graphe INFRAS

Bâle - Paris

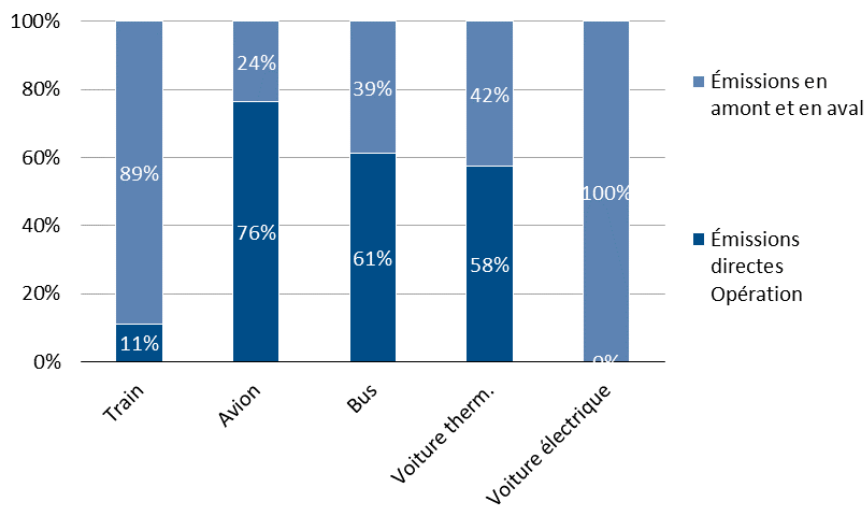
Figure 29 : Bâle–Paris : Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport à l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre



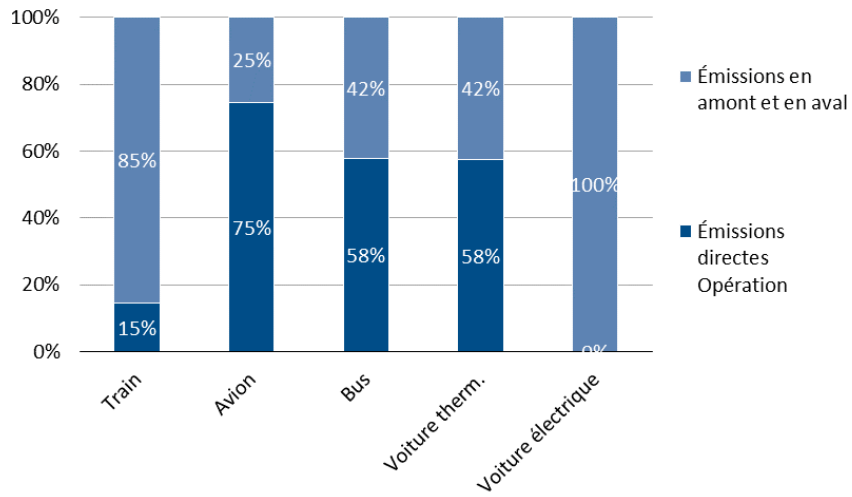
Graphe INFRAS

Lausanne - Paris

Figure 30 : Lausanne–Paris : Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport à l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre



Graphe INFRAS

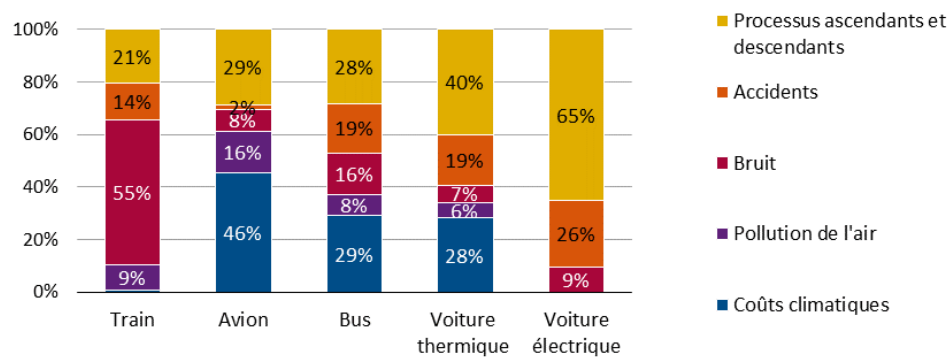
Lausanne - Marseille**Figure 31: Lausanne–Marseille : Proportion des émissions de gaz à effet de serre en amont et en aval par rapport à l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre**

Graphe INFRAS

Proportions pour les différentes catégories de coûts environnementaux et liés aux accidents

Zurich - Paris

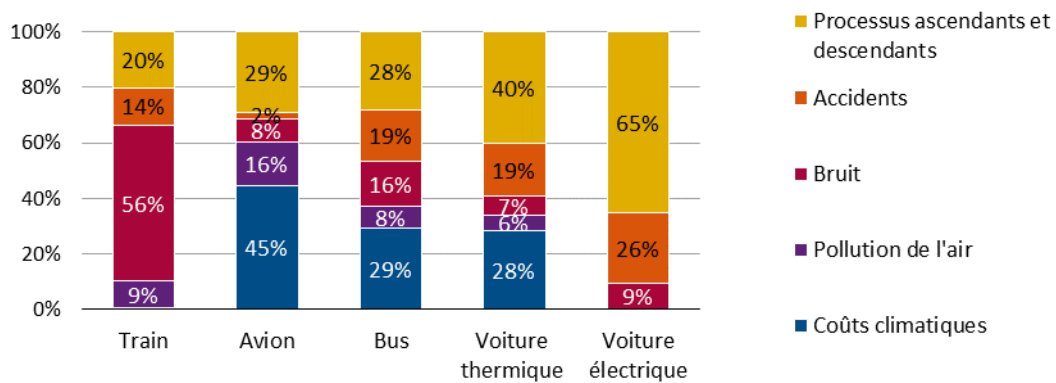
Figure 32 : Zurich–Paris : Proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents



Graphe INFRAS

Bâle - Paris

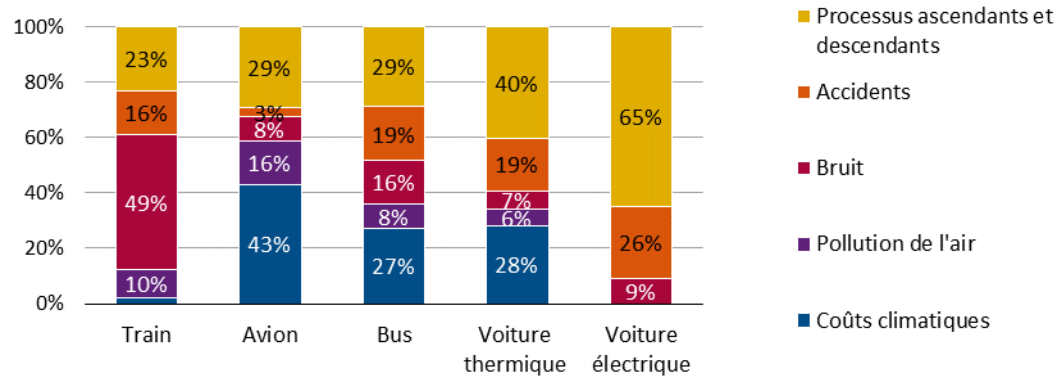
Figure 33 : Bâle–Paris : Proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents



Graphe INFRAS

Lausanne - Paris

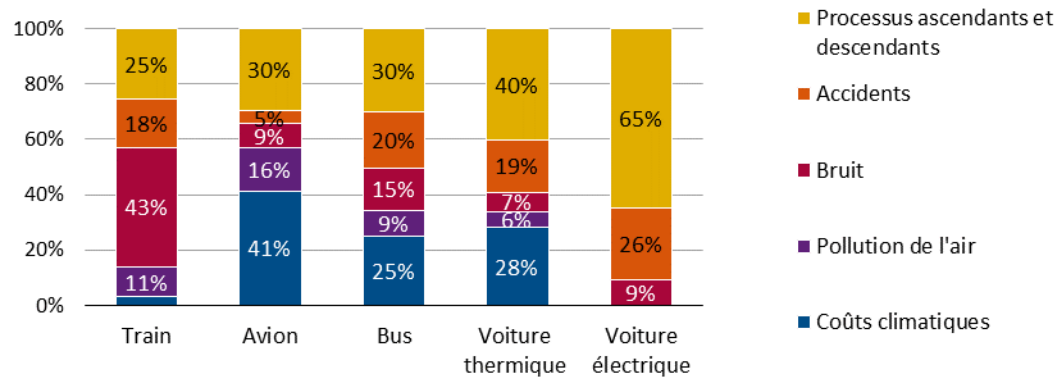
Figure 34 : Lausanne–Paris : Proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents



Graphe INFRAS

Lausanne - Marseille

Figure 35 : Lausanne–Marseille : Proportion des différentes catégories de coûts par rapport au total des coûts environnementaux et des coûts liés aux accidents



Graphe INFRAS

Bibliographie

- Atmosfair 2019:** atmosfair Flug-Emissionsrechner. Dokumentation der Methode und Daten. Berlin, Mars 2021.
- Atmosfair 2024a:** CO₂-Fußabdruck meines Flugs berechnen. Online: <https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/flug/>.
- Atmosfair 2024b:** Berechnungen der Dienstreisen per Flugzeug der ETH Zürich, unpublished.
- ARE 2018:** Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, Ecoplan et INFRAS sur mandat de l'Office fédéral du développement territorial ARE, Berne.
- ARE 2019:** Costs and Benefits of Transport in Switzerland 2016.
- ARE 2023:** Mobilitätsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021. Neuchâtel 2023. Online: <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/dokumente/mikrozensus/mzmv-hauptbericht2021.pdf.download.pdf/Hauptbericht%20MZMV%202021%20DE.pdf>.
- Bieler, C., Sutter, D. 2018:** Umweltkosten des Verkehrs in Deutschland, Sachstandspapier zur Methodenkonvention 3.0., Umweltbundesamt, Septembre 2018.
- DG MOVE 2019:** Handbook on the external costs of transport, Version 2019, European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, 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:** Schweizer Plattform für Mobilitätsmanagementtools und aufbereitete Umweltdaten; gemeinschaftliches Engagement der Trägerschaft aus SBB, Swisscom, EnergieSchweiz, Bundesamt für Umwelt BAFU und öbu. Online: <https://www.mobitool.ch/>.
- IATA 2023:** Air Passenger Market Analysis. Online: www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis-december-2023/.
- INFRAS 2019a:** Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland, Aufdatierung 2018, im Auftrag der Allianz pro Schiene, Zurich, 2019.
- INFRAS 2022:** HBEFA 4.2. Handbook of Emission Factors for Road Transport. Infrass, Berne. [www.hbefa.net].
- INFRAS, Quantis 2020:** Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext, Schlussbericht, Forschungsprojekt, Berne, Villigen, Zurich, non publié.
- UBA 2019:** Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Stand Februar 2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Février 2019.