



Université de Technologie de Compiègne (UTC)

Automne 2024

Comment voyager à travers le monde sans impacter fortement l'environnement ?

Groupe N°29 :

Adèle DOARÉ

Salomé FOURNEL

Youssef KHEMIRA

Suiveur :

Elias FARAH

Un projet soumis pour l'UTC :

NP90 | Nano-projets

27 mars 2026

Table des matières

1 Émissions selon le transport	3
1.1 Voitures et bus	3
1.1.1 Calcul des facteurs d'émission de CO ₂ pour chaque carburant .	3
1.1.2 Calcul des émissions de CO ₂	9
1.2 Émissions des trains	10
1.2.1 Données de base du TGV	11
1.2.2 Données de base du TER	12
1.2.3 Résumé des résultats	13
1.2.4 Comparaison avec les données de la SNCF	13
1.3 Voyager en avion	14
1.3.1 Consommation de carburant selon l'avion	14
1.3.2 Résumé des résultats avec incertitudes	16
1.4 Voyager en bateau	16
2 Application en situation réelle	17
2.1 Émissions selon la destination	17
2.1.1 Voyage Paris – Marseille	17
2.1.2 Voyage de Paris à Athènes	18
2.1.3 Voyage de Paris à Tokyo	20
2.2 Fréquence possible de voyage	22
2.2.1 Fréquence de voyage à courte distance	22
2.2.2 Fréquence de voyage à moyenne distance	23
2.2.3 Fréquence de voyage à grande distance	24
2.3 Exemple d'émissions de célébrités	24
2.3.1 Elon Musk	24
2.3.2 Taylor Swift et l'Eras Tour	26
3 Conclusion	27
Références	29

Introduction

Voyager est une activité profondément ancrée dans notre société, permettant de s'ouvrir à de nouvelles cultures, d'élargir notre compréhension du monde et de renforcer nos liens sociaux. L'envie de découvrir de nouveaux paysages, de rencontrer des cultures différentes, et de partir à l'aventure est une aspiration partagée par beaucoup. Cependant, cette envie de parcourir le monde a un prix, notamment en termes d'impact sur l'environnement. Le développement de moyens de transport modernes s'est accompagné de conséquences lourdes sur notre planète, notamment par l'émission massive de gaz à effet de serre, contribuant au changement climatique. Comment, alors, continuer à explorer le monde tout en minimisant notre empreinte carbone ?

Cette question est au cœur de notre époque, où la situation environnementale est de plus en plus préoccupante. Afin d'y répondre, il est important de poser quelques considérations de départ. Nous avons choisi de définir le terme "voyage" uniquement au sens du trajet vers une destination choisie. Notre objectif est de nous concentrer sur des voyages à visée touristique, en excluant les déplacements professionnels, souvent inévitables, limités dans le temps et organisés indépendamment de notre choix personnel. Cela nous permet de nous concentrer sur un paramètre réellement sous notre contrôle. Notre approche consiste à analyser l'impact environnemental des différents carburants utilisés dans le monde, et appliquer cette analyse à différents modes de transport réalistes pour des voyages à différentes échelles de distance, qu'il s'agisse de l'avion, des bateaux de croisière, des voitures ou encore des bus. Nous omettrons les situations jugées irréalistes (trop coûteuses, trop longues, trop complexes), car elles ne sont pas applicables dans un contexte de voyage accessible au grand public ou nécessitent des ressources disproportionnées par rapport aux bénéfices environnementaux obtenus.

Notre objectif final est de comparer concrètement les impacts écologiques des différents types de voyages, principalement en termes d'émissions de CO₂, rapportés à la durée du séjour et au quota annuel de CO₂ recommandé par personne pour limiter le réchauffement climatique. Nous souhaitons ainsi déterminer les modes de voyage les moins polluants et les fréquences auxquelles ils sont acceptables, afin de proposer des solutions concrètes permettant aux voyageurs de réduire leur impact sur la planète sans pour autant faire l'impasse sur les voyages. Pour cela, nous effectuerons des calculs d'émissions de CO₂ pour chaque mode de transport selon les types de carburant, la consommation, les technologies utilisées et le nombre de passagers transportés, en tenant compte des incertitudes ; puis nous comparerons ces résultats pour conclure sur les meilleures options.

1 Émissions selon le transport

Nous étudierons dans cette section les émissions de CO₂ des différents modes de transport ; l'objectif étant d'arriver par le calcul à une expression des émissions de CO₂ par personne par kilomètre parcouru pour chaque mode de transport, afin de pouvoir les appliquer aux différentes distances choisies dans la deuxième section. Puisque le point de départ considéré est en France, nos études seront basées sur des véhicules provenant de France, c'est-à-dire en se basant sur les statistiques particulières en France lorsque cela s'applique. Par exemple, pour établir la consommation moyenne d'un véhicule en L/100km, nous nous baserons sur les consommations moyennes des véhicules en France selon leur répartition par type de carburant ; ou encore, les éventuels prix évoqués seront basés sur les tarifs que l'on retrouve en France.

Pour chaque mode de transport, nous établirons plusieurs scénarios afin d'avoir un meilleur aperçu global et des valeurs qui ne sont pas trop moyennées. Nous considérerons notamment le "meilleur cas" et le "pire cas" à la fois en termes de consommation mais aussi en nombre de passagers. Par exemple, le meilleur cas de consommation d'une voiture serait une voiture électrique, et le meilleur cas en nombre de passagers serait un véhicule plein (5 passagers).

1.1 Voitures et bus

Nous allons nous intéresser aux émissions de CO₂ générées par les voitures et les bus. Comme dit précédemment, l'objectif est d'estimer les émissions en kilogrammes de CO₂ par personne et par kilomètre, en prenant en compte les pires et les meilleurs cas en termes de consommation de carburant et de nombre de passagers. Nous considérons différents types de carburants : **essence, diesel, GPL et électricité**.

Comme ces deux modes de transport partagent les mêmes carburants, les résultats seront exprimés sous une forme applicable aux deux cas. Les calculs seront effectués à partir de valeurs brutes, notamment les émissions de CO₂ lors de la combustion de chaque carburant, en détaillant les calculs et en incluant les incertitudes associées. Nous comparerons ensuite nos résultats avec des données trouvées dans des rapports de recherche pour vérifier leur cohérence. Enfin, nous proposerons une formule pour calculer les émissions moyennes en fonction de la consommation moyenne et du nombre moyen de passagers, et nous présenterons une synthèse sous forme de tableau.

1.1.1 Calcul des facteurs d'émission de CO₂ pour chaque carburant

Les facteurs d'émission représentent la quantité de CO₂ émise par litre de carburant consommé. Nous allons calculer ces facteurs en nous basant sur la composition chimique des carburants et les équations de combustion.

1.Essence

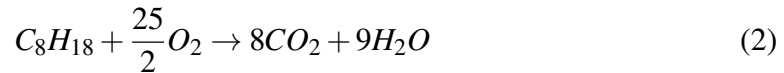
L'essence est un mélange complexe d'hydrocarbures qui comprend une variété de composés tels que les alcanes, les cycloalcanes et les composés aromatiques. La propor-

tion de ces composants dans l'essence peut varier selon les types de carburants, tels que le SP95, le SP98 ou les mélanges incluant de l'éthanol (E10 ou E85). Pour simplifier nos calculs et obtenir une estimation représentative, nous considérons l'octane comme un modèle chimique idéal de l'essence [1], sa formule étant la suivante : C_8H_{18} .

La masse molaire de l'octane vaut :

$$M_{C_8H_{18}} = 8 \times 12,01 + 18 \times 1,008 = 114,23 \text{ g/mol} \quad (1)$$

Et son équation de combustion est la suivante :



On constate que la combustion de l'essence nécessite un apport d'air contenant du dioxygène, et qu'un des produits de cette réaction est du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre. Nous pouvons calculer cette quantité de CO_2 émise par mole d'octane qui réagit. Nous savons que 1 mole d'octane produit 8 moles de CO_2 . Il est ainsi possible de déterminer la masse produite par mole d'octane :

$$m_{CO_2} = 8 \times M_{CO_2} = 8 \times 44,01 = 352,08 \text{ g} \quad (3)$$

Il reste maintenant à déterminer combien de moles d'octane sont dans un litre d'essence. Pour cela, on se sert de la densité de l'essence, trouvée dans des tables de données scientifiques [2].

- **Densité de l'essence** : Environ 0,745 kg/L.

- **Masse d'un litre d'essence** : $m_{essence} = 0,745 \text{ kg} = 745 \text{ g}$

- **Nombre de moles d'octane dans un litre d'essence** :

$$n_{C_8H_{18}} = \frac{m_{essence}}{M_{C_8H_{18}}} = \frac{745}{114,23} \approx 6,52 \text{ mol} \quad (4)$$

On peut alors multiplier la masse de CO_2 trouvée dans une mole d'octane par le nombre de moles d'octane dans 1 L d'essence :

$$m_{CO_2/L} = n_{C_8H_{18}} \times m_{CO_2} = 6,52 \times 352,08 \approx 2,295 \text{ kg} \quad (5)$$

Finalement, on trouve comme facteur d'émission pour l'essence :

$$F_{essence} = 2,295 \text{ kg } CO_2/L \quad (6)$$

- **Incertitude associée** : Pour estimer l'incertitude sur le facteur d'émission, nous utilisons une propagation des incertitudes basée sur les sources d'erreur potentielles, telles que la densité de l'essence ($\delta\rho$) et la masse molaire de l'octane ($\delta M_{C_8H_{18}}$). Soit :

$$\delta F_{essence} = F_{essence} \times \sqrt{\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_8H_{18}}}{M_{C_8H_{18}}}\right)^2} \quad (7)$$

Avec :

$$\delta\rho = 0,01 \text{ kg/L}, \quad \delta M_{C_8H_{18}} = 0,05 \text{ g/mol} \quad (8)$$

$$\delta F_{essence} = 2,295 \times \sqrt{\left(\frac{0,01}{0,745}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{114,23}\right)^2} \approx 0,046 \text{ kg CO}_2/\text{L} \quad (9)$$

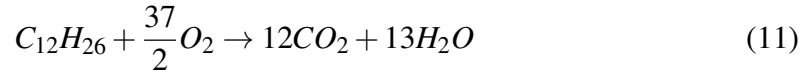
1. Diesel (Gazole)

Tout comme l'essence, le diesel est un mélange complexe d'hydrocarbures comprenant divers composés tels que des alcanes à longue chaîne, la différence étant que ces hydrocarbures sont plus lourds que pour l'essence. La proportion de ces composants peut varier en fonction du type de carburant et de ses spécifications. Pour simplifier nos calculs et obtenir une estimation représentative, nous considérons le dodécane comme un modèle chimique idéal pour le diesel [3], avec la formule suivante : $C_{12}H_{26}$.

La masse molaire du dodécane vaut :

$$M_{C_{12}H_{26}} = 12 \times 12,01 + 26 \times 1,008 = 170,34 \text{ g/mol} \quad (10)$$

Et son équation de combustion est la suivante :



Tout comme pour la combustion de l'essence, celle du diesel nécessite un apport d'air contenant du dioxygène et produit du CO_2 . Nous pouvons calculer cette quantité de CO_2 émise par mole de dodécane qui réagit. Nous savons que 1 mole d'octane produit 12 moles de CO_2 . Il est ainsi possible de déterminer la masse produite par mole de dodécane :

$$m_{CO_2} = 12 \times 44,01 = 528,12 \text{ g} \quad (12)$$

On peut utiliser la densité du diesel, également trouvée dans des tables de données scientifiques [2], pour trouver le nombre de moles de dodécane dans un litre de diesel.

- **Densité du diesel** : Environ 0,832 kg/L.
- **Masse d'un litre de diesel** : $m_{diesel} = 0,832 \text{ kg} = 832 \text{ g}$
- **Nombre de moles de dodécane dans un litre de diesel** :

$$n_{C_{12}H_{26}} = \frac{832}{170,34} \approx 4,885 \text{ mol} \quad (13)$$

On peut alors multiplier la masse de CO_2 trouvée dans une mole de dodécane par le nombre de moles de dodécane dans 1 L de diesel :

$$m_{CO_2/L} = n_{C_{12}H_{26}} \times m_{CO_2} = 4,885 \times 528,12 \approx 2,581 \text{ kg} \quad (14)$$

Finalement, on trouve comme facteur d'émission pour l'essence :

$$\boxed{F_{diesel} = 2,581 \text{ kg CO}_2/\text{L}} \quad (15)$$

- **Incertitude associée** : Pour l'incertitude sur le facteur d'émission du diesel, nous prenons en compte les variations potentielles de la densité ($\delta\rho$) et de la masse molaire du dodécane ($\delta M_{C_{12}H_{26}}$). L'incertitude est donnée par :

$$\delta F_{diesel} = F_{diesel} \times \sqrt{\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_{12}H_{26}}}{M_{C_{12}H_{26}}}\right)^2} \quad (16)$$

Avec :

$$\delta\rho = 0,015 \text{ kg/L}, \quad \delta M_{C_{12}H_{26}} = 0,1 \text{ g/mol} \quad (17)$$

$$\delta F_{diesel} = 2,581 \times \sqrt{\left(\frac{0,015}{0,832}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{170,34}\right)^2} \approx 0,052 \text{ kg CO}_2/\text{L} \quad (18)$$

1. GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié)

Le GPL est principalement composé d'un mélange de propane et de butane [4]. En France, la composition typique du GPL carburant est d'environ 20% de propane (C_3H_8) et 80% de butane (C_4H_{10}) [5].

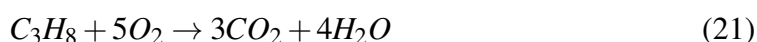
La masse molaire du propane vaut :

$$M_{C_3H_8} = 3 \times 12,01 + 8 \times 1,008 = 44,096 \text{ g/mol} \quad (19)$$

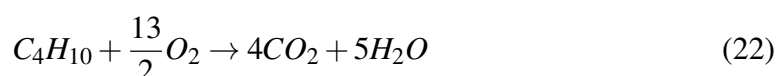
La masse molaire du butane vaut :

$$M_{C_4H_{10}} = 4 \times 12,01 + 10 \times 1,008 = 58,124 \text{ g/mol} \quad (20)$$

L'équation de combustion du propane est la suivante :



L'équation de combustion du butane est la suivante :



La combustion du GPL, comme celle de l'essence et du diesel, nécessite un apport en dioxygène et produit du CO_2 . Nous pouvons calculer la quantité de CO_2 émise par mole de propane et de butane qui réagit.

- **Calcul de la masse de CO_2 émise par mole de propane :**

$$m_{CO_2, C_3H_8} = 3 \times 44,01 = 132,03 \text{ g} \quad (23)$$

- **Calcul de la masse de CO_2 émise par mole de butane :**

$$m_{CO_2, C_4H_{10}} = 4 \times 44,01 = 176,04 \text{ g} \quad (24)$$

Ensuite, nous pouvons utiliser la densité moyenne des composants pour estimer la masse d'un litre de GPL [2].

- **Densité du propane :** 0,493 kg/L

- **Densité du butane :** 0,584 kg/L

- **Masse d'un litre de GPL :**

$$m_{GPL} = 0,2 \times 0,493 + 0,8 \times 0,584 = 0,5664 \text{ kg} \quad (25)$$

Il est maintenant possible de calculer le nombre de moles de propane et de butane dans un litre de GPL.

- **Nombre de moles de propane dans 1 L :**

$$n_{C_3H_8} = \frac{0,2 \times 0,493 \times 1000}{44,096} \approx 2,238 \text{ mol} \quad (26)$$

- **Nombre de moles de butane dans 1 L :**

$$n_{C_4H_{10}} = \frac{0,8 \times 0,584 \times 1000}{58,124} \approx 8,041 \text{ mol} \quad (27)$$

On peut alors multiplier la masse de CO₂ produite par mole de propane et de butane par le nombre de moles de chaque composant dans 1 L de GPL :

$$\begin{aligned} m_{CO_2/L} &= n_{C_3H_8} \times m_{CO_2,C_3H_8} + n_{C_4H_{10}} \times m_{CO_2,C_4H_{10}} \\ &= 2,238 \times 132,03 + 8,041 \times 176,04 \\ &\approx 295,5 + 1415,1 \approx 1710,6 \text{ g} = 1,711 \text{ kg} \end{aligned} \quad (28)$$

Finalement, on trouve comme facteur d'émission pour le GPL :

$$\boxed{F_{GPL} = 1,711 \text{ kg CO}_2/\text{L}} \quad (29)$$

- **Incertitude associée :** Pour estimer l'incertitude sur le facteur d'émission du GPL, nous utilisons une propagation des incertitudes basée sur les sources d'erreur potentielles, telles que la densité moyenne du GPL ($\delta\rho_{GPL}$) et les masses molaires des composants (propane et butane). Soit :

$$\delta F_{GPL} = F_{GPL} \times \sqrt{\left(\frac{\delta\rho_{GPL}}{\rho_{GPL}}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_3H_8}}{M_{C_3H_8}}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_{C_4H_{10}}}{M_{C_4H_{10}}}\right)^2} \quad (30)$$

Avec :

$$\delta\rho_{GPL} = 0,02 \text{ kg/L}, \quad \delta M_{C_3H_8} = 0,03 \text{ g/mol}, \quad \delta M_{C_4H_{10}} = 0,04 \text{ g/mol} \quad (31)$$

$$\delta F_{GPL} = 1,711 \times \sqrt{\left(\frac{0,02}{0,5664}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{44,096}\right)^2 + \left(\frac{0,04}{58,124}\right)^2} \approx 0,063 \text{ kg CO}_2/\text{L} \quad (32)$$

1. Véhicules électriques

Les véhicules électriques n'émettent pas directement de CO₂ lors de leur fonctionnement. Cependant, il est essentiel de considérer les émissions de CO₂ indirectes, principalement liées à la production de l'électricité. Ces émissions varient en fonction du mix énergétique du pays (nous nous basons ici sur la France), qui est majoritairement décarboné grâce à une forte proportion d'énergie nucléaire et renouvelable [6].

Pour simplifier nos calculs, nous allons définir le facteur d'émission moyen de l'électricité en France [7].

- **Facteur d'émission moyen de l'électricité :** Environ 0,032 kg CO₂/kWh.

Cette valeur provient du mix énergétique français en 2023, qui bénéficie d'une forte proportion d'énergie nucléaire et renouvelable, réduisant ainsi son empreinte carbone (toutes les sources sont en annexe).

Nous devons également connaître la consommation moyenne d'énergie des véhicules électriques pour pouvoir estimer les émissions.

- **Consommation moyenne d'énergie des véhicules électriques** : Environ 17,5 kWh/100 km [8].

Il est maintenant possible de calculer les émissions de CO₂ par kilomètre parcouru par un véhicule électrique :

$$E_{CO_2/km} = \text{Consommation} \times \text{Facteur d'émission} = \left(\frac{17,5 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \right) \times 0,032 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \quad (33)$$

$$E_{CO_2/km} = 0,0056 \text{ kg CO}_2/\text{km} \quad (34)$$

Pour estimer les émissions par litre équivalent (en supposant une comparaison avec l'essence ou le diesel), nous devons d'abord déterminer l'énergie contenue dans un litre d'essence.

- **Énergie dans un litre d'essence** : Environ 9,7 kWh/L. Cette valeur est basée sur la densité énergétique de l'essence [1], qui varie légèrement selon sa composition, mais est généralement acceptée autour de 9,7 kWh/L pour les calculs énergétiques.

Ainsi, l'équivalent en termes d'émissions est :

$$F_{\text{électrique}} = E_{CO_2/km} \times \left(\frac{100}{17,5} \right) \approx 0,32 \text{ kg CO}_2/\text{L (équivalent)} \quad (35)$$

Finalement, on trouve comme facteur d'émission pour les véhicules électriques :

$$\boxed{F_{\text{électrique}} = 0,32 \text{ kg CO}_2/\text{L (équivalent)}} \quad (36)$$

- **Incertitude associée** : Pour estimer l'incertitude sur le facteur d'émission des véhicules électriques, nous devons considérer la variabilité du facteur d'émission de l'électricité ($\delta F_{\text{électricité}}$) ainsi que celle de la consommation d'énergie (δC). L'incertitude est donnée par :

$$\delta F_{\text{électrique}} = F_{\text{électrique}} \times \sqrt{\left(\frac{\delta F_{\text{électricité}}}{F_{\text{électricité}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C} \right)^2} \quad (37)$$

Avec :

$$\delta F_{\text{électricité}} = 0,005 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}, \quad \delta C = 2 \text{ kWh}/100 \text{ km} \quad (38)$$

$$\delta F_{\text{électrique}} = 0,32 \times \sqrt{\left(\frac{0,005}{0,032} \right)^2 + \left(\frac{2}{17,5} \right)^2} \approx 0,04 \text{ kg CO}_2/\text{L (équivalent)} \quad (39)$$

1.1.2 Calcul des émissions de CO₂

2. Formule générale

On peut désormais établir une formule générale qui nous permettra d'obtenir directement les émissions de CO₂/personne/km en fonction du facteur d'émission que l'on a calculé précédemment, et en modifiant facilement le nombre de passagers et la consommation pour les meilleurs et pires cas :

$$E = \frac{C \times F}{N} \quad (40)$$

où :

- E : Émissions de CO₂ par personne par kilomètre (kg CO₂/personne/km)
- C : Consommation de carburant par kilomètre (L/km ou kWh/km)
- F : Facteur d'émission du carburant (kg CO₂/L ou kg CO₂/kWh)
- N : Nombre de passagers

2. Calcul des incertitudes

L'incertitude sur les émissions (δE) est calculée en utilisant la propagation des incertitudes :

$$\delta E = E \times \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2} \quad (41)$$

Hypothèses sur les incertitudes :

- **Consommation** (δC) : $\pm 10\%$ de C , basé sur la variabilité typique des véhicules et des conditions de conduite [8].
- **Facteur d'émission** (δF) : $\pm 2\%$ pour les carburants fossiles [9], $\pm 10\%$ pour l'électricité [7].
- **Nombre de passagers** (δN) : Nul si le nombre est connu (1 ou 5 pour les voitures), négligeable pour les bus si le nombre de passagers est déterminé [10].

Synthèse sous forme de tableau

Type de véhicule	Carburant	Consommation (L/100 km)	Nombre de passagers	Émissions (kg CO ₂ /personne/km)
Voiture (pire cas)	Essence	12	1	0,275 $\pm$ 0,027
Voiture (meilleur cas)	Essence	4	5	0,0183 $\pm$ 0,0018
Voiture (pire cas)	Diesel	10	1	0,258 $\pm$ 0,026
Voiture (meilleur cas)	Diesel	3,5	5	0,0181 $\pm$ 0,0018
Voiture (pire cas)	GPL	11	1	0,188 $\pm$ 0,019
Voiture (meilleur cas)	GPL	5	5	0,0150 $\pm$ 0,0015
Voiture (pire cas)	Électrique	25 kWh	1	0,080 $\pm$ 0,008
Voiture (meilleur cas)	Électrique	15 kWh	5	0,0096 $\pm$ 0,0010
Bus (pire cas)	Diesel	50	10	0,129 $\pm$ 0,013
Bus (meilleur cas)	Diesel	30	50	0,0155 $\pm$ 0,0016

TABLE 1 – Tableau résumant les émissions de CO₂ par type de véhicule, carburant, consommation et nombre de passagers.

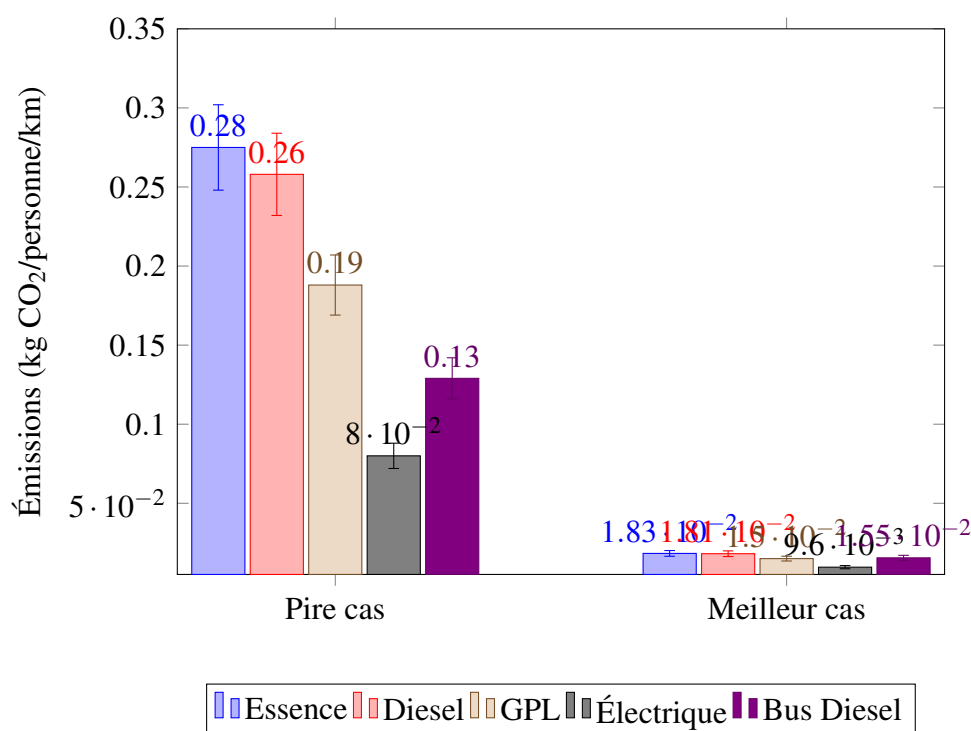


FIGURE 1 – Diagramme à bâtons des émissions de CO₂ par type de véhicule et carburant avec incertitudes.

Les émissions de CO₂ par personne et par kilomètre varient considérablement en fonction du type de véhicule, du carburant utilisé, de la consommation et du nombre de passagers. Les bus, lorsqu'ils sont bien remplis, émettent moins de CO₂ par personne que les voitures individuelles. Les véhicules électriques présentent les émissions les plus faibles, surtout si l'électricité provient de sources renouvelables. Les valeurs de consommation utilisées dans le tableau récapitulatif correspondent aux 10% les plus élevés et aux 10% les plus faibles, basées sur des données issues de sources fiables [5, 8, 9].

Enfin, les incertitudes calculées montrent que les variations dans la consommation et les facteurs d'émission ont un impact sur les émissions totales, mais ces incertitudes restent relativement faibles, ce qui nous permet de tirer des conclusions fiables.

1.2 Émissions des trains

La consommation électrique d'un train varie considérablement en fonction de plusieurs facteurs, tels que le type de train (TGV, TER), la distance parcourue, la charge transportée, la vitesse, le profil du trajet (plat ou avec des pentes), et l'efficacité du système de traction. De plus, la quantité de CO₂ émis dépend de la source d'électricité utilisée pour alimenter le train.

Dans nos calculs, nous avons simplifié ces paramètres en ne prenant en compte que deux types de trains, les TGV et TER qui sont les plus répandus, et en observant la différence des émissions de CO₂ par personne lorsque ces trains étaient pleins ou non. Nous n'avons pas pris en compte les émissions liées à la fabrication, la maintenance, ou

d'autres facteurs environnementaux. [11]

1.2.1 Données de base du TGV

- Consommation d'énergie du TGV : 20kWh/km
- Facteur d'émission : 0.032kg CO₂/kWh
- Capacité du TGV :
 - Plein : 500 passagers
 - Moitié plein : 250 passagers
- Incertitudes :
 - Sur la consommation d'énergie : 2%
 - Sur le facteur d'émission : 5%

Calcul des émissions de CO₂ totales

Les émissions de CO₂ par km sont données par la formule précédemment établie :

$$E = \frac{C \times F}{N} \quad (42)$$

où :

- E : Émissions de CO₂ par personne par kilomètre (kg CO₂/personne/km)
- C : Consommation d'électricité par kilomètre (kWh/km)
- F : Facteur d'émission du TGV (kg CO₂/kWh)
- N : Nombre de passagers

Nous ignorerons le nombre de passagers pour le moment.

$$\text{Émissions de CO}_2 \text{ par km} = 20\text{kWh/km} \times 0.032\text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 0.64\text{ kg CO}_2/\text{km} \quad (43)$$

Estimation des incertitudes

L'incertitude sur la consommation d'énergie par km est de 2%, donc :

$$\delta E_{\text{énergie}} = 20\text{kWh/km} \times 0.02 = 0.4\text{kWh/km} \quad (44)$$

Et la contribution de l'incertitude sur la consommation d'énergie aux émissions de CO₂ est :

$$\delta \text{CO}_{2\text{énergie}} = 0.4\text{kWh/km} \times 0.032\text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 0.0128\text{ kg CO}_2/\text{km} \quad (45)$$

L'incertitude sur le facteur d'émission est de 5%, donc :

$$\delta \text{CO}_{2\text{facteur}} = 0.64\text{ kg CO}_2/\text{km} \times 0.05 = 0.032\text{ kg CO}_2/\text{km} \quad (46)$$

Enfin, l'incertitude totale sur les émissions de CO₂ totales est la somme quadratique des incertitudes individuelles :

$$\delta \text{CO}_{2\text{totale}} = \sqrt{(\delta \text{CO}_{2\text{énergie}})^2 + (\delta \text{CO}_{2\text{facteur}})^2} \quad (47)$$

$$\delta CO_{2\text{totale}} = \sqrt{(0.0128)^2 + (0.032)^2} = \sqrt{0.00016384 + 0.001024} \\ = \sqrt{0.00118784} \approx 0.0344 \text{ kg CO}_2/\text{km} \quad (48)$$

Calcul des émissions de CO₂ par passager

Maintenant que nous avons calculé les émissions de CO₂ par km, nous pouvons rapporter cette valeur au nombre de passagers dans le train, ce qui va nous permettre d'établir l'empreinte individuelle de chaque passager, qui diminue avec leur nombre.

Pour un train plein (estimé à 500 passagers), les émissions par passager par kilomètre sont :

$$\text{Émissions par passager} = \frac{0.64 \text{ kg CO}_2}{500} = 0.00128 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \quad (49)$$

Tandis que l'incertitude associée est la suivante :

$$\delta CO_{2\text{passager, plein}} = \frac{0.0344 \text{ kg CO}_2}{500} = 0.0000688 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \quad (50)$$

Pour un train à moitié plein (250 passagers), les émissions par passager par kilomètre sont :

$$\text{Émissions par passager} = \frac{0.64 \text{ kg CO}_2}{250} = 0.00256 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \quad (51)$$

L'incertitude par passager pour un train moitié plein est :

$$\delta CO_{2\text{passager, moitié plein}} = \frac{0.0344 \text{ kg CO}_2}{250} = 0.0001376 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \quad (52)$$

1.2.2 Données de base du TER

- Consommation de carburant : 200L/100 km
- Facteur d'émission : 2.581 kg CO₂/L
- Incertitude sur le facteur d'émission : $\pm 0.052 \text{ kg CO}_2/\text{L}$
- Capacité du TER :
 - Plein : 550 passagers
 - Moitié plein : 275 passagers

Calcul des émissions de CO₂ par passager

Les émissions de CO₂ par passager et par km sont données par la formule :

$$\text{Émissions de CO}_2 = \frac{200 \text{ L} \times 2.581 \text{ kg CO}_2/\text{L} \times 10^3}{100 \text{ km} \times N_{\text{passagers}}} \quad (53)$$

Pour un TER à moitié plein (275 passagers) :

$$\text{Émissions de CO}_2 = \frac{200 \times 2.581 \times 10^3}{100 \times 275} = 18.77 \text{ g CO}_2/\text{km/passager} \quad (54)$$

Incertitude associée :

$$\delta\text{CO}_2 = 18.77 \times \sqrt{\left(\frac{0.052}{2.581}\right)^2 + \left(\frac{0.052}{200}\right)^2} \approx 18.77 \times 0.0201 \approx 0.377 \text{ g CO}_2/\text{km/passager} \quad (55)$$

Pour un TER plein (550 passagers) :

$$\text{Émissions de CO}_2 = \frac{200 \times 2.581 \times 10^3}{100 \times 550} = 9.385 \text{ g CO}_2/\text{km/passager} \quad (56)$$

Incertitude associée :

$$\delta\text{CO}_2 = 9.385 \times \sqrt{\left(\frac{0.052}{2.581}\right)^2 + \left(\frac{0.052}{200}\right)^2} \approx 9.385 \times 0.0201 \approx 0.188 \text{ g CO}_2/\text{km/passager} \quad (57)$$

1.2.3 Résumé des résultats

- **Émissions de CO₂ pour un TER à moitié plein (275 passagers) :**
18.77 g CO₂/km/passager ± 0.377 g CO₂/km/passager
- **Émissions de CO₂ pour un TER plein (550 passagers) :**
9.385 g CO₂/km/passager ± 0.188 g CO₂/km/passager

1.2.4 Comparaison avec les données de la SNCF

[12] Nous avons deux types de données, les données que nous avons calculées et les données que fournit la SNCF en fonction du type de train. Nous allons donc réaliser un calcul d'erreur pour les comparer

L'erreur relative est calculée par cette formule :

$$\text{Erreur relative} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur théorique}}{|\text{valeur théorique}|} \quad (58)$$

Nous pouvons l'appliquer dans notre cas sous cette forme :

$$\text{Erreur relative} = \frac{\text{valeur calculé} - \text{valeur SNCF}}{|\text{valeur SNCF}|} \quad (59)$$

Application pour le TGV :

$$\text{Erreur relative}_{\text{TGV}} = \frac{1,28 - 3,5}{|3,5|} = -0,634 \quad (60)$$

Application pour le TER :

$$\text{Erreur relative}_{\text{TER}} = \frac{9,385 - 30,4}{|30,4|} = -0,691 \quad (61)$$

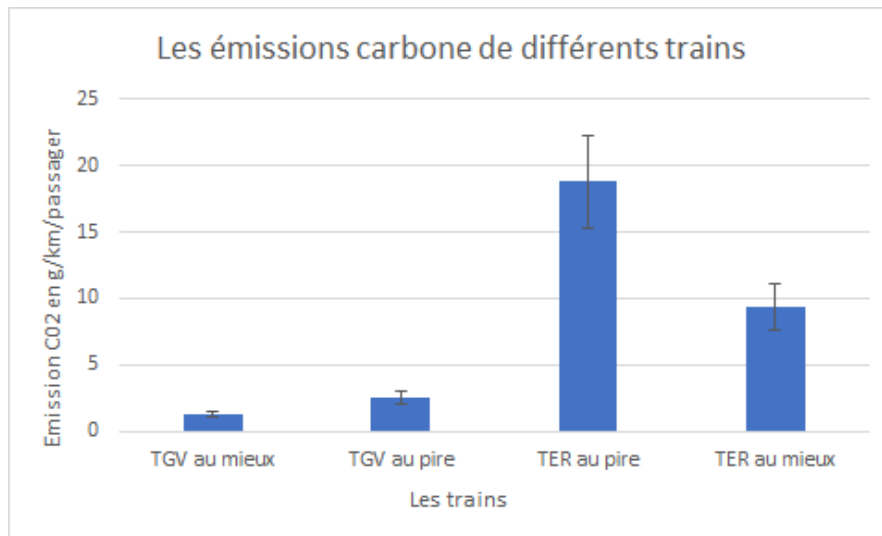


FIGURE 2 – Émissions de carbone en fonction du type de train et du scénario.

Nous pouvons expliquer cet écart par plusieurs raisons. Tout d’abord, nous avons choisi de ne prendre en compte que les émissions de dioxyde de carbone lors de l’utilisation du train alors que la SNCF comprend la fabrication, la maintenance, l’utilisation. . . De plus, la SNCF utilise un mix énergétique spécifique, qu’elle produit en partie. Nous n’avons pas de descriptif précis. Et chaque source d’énergie n’émet pas la même quantité de CO₂.

1.3 Voyager en avion

[13] Nous avons choisi d’étudier deux modèles d’avions très répandus : l’Airbus A320 pour les courts et moyens courriers et le Boeing 747 pour les longs courriers.

Nous considérerons trois sources d’incertitude principales :

- **Sur la consommation de carburant** : Les valeurs de consommation de carburant peuvent varier en fonction des conditions météorologiques, du poids de l’avion, etc. On prendra donc une incertitude de 5%.
- **Sur la vitesse de croisière** : Les vitesses de croisière changent aussi selon les conditions de vol. Les valeurs sont fiables, car fournies par les fabricants. On prendra donc une incertitude de 2%.
- **Sur le calcul du CO₂** : Des petites erreurs dans les valeurs molaires ou les arrondis de calculs peuvent être prises en compte avec une incertitude de 2%.

1.3.1 Consommation de carburant selon l’avion

Pour les avions étudiés, nous avons les consommations suivantes :

- **Airbus A320** : 3000 L/h
- **Boeing 747** : 13 000 L/h

Vitesse de croisière

Boeing 747 :

$$\text{Mach } 0,85 \rightarrow 0,85 \times 340 \text{ m/s} = 289 \text{ m/s} = 1040,4 \text{ km/h} \quad (62)$$

L'incertitude est de $\pm 2\%$:

On obtient donc $1040,4 \pm 20,81 \text{ km/h}$, soit une valeur comprise entre 1019,6 et 1061,2 km/h. (63)

Airbus A320 :

$$\text{Mach } 0,78 \rightarrow 0,78 \times 340 \text{ m/s} = 265,2 \text{ m/s} = 954,72 \text{ km/h} \quad (64)$$

L'incertitude est de $\pm 2\%$:

On obtient donc $954,72 \pm 19,09 \text{ km/h}$, soit une valeur comprise entre 935,63 et 973,81 km/h. (65)

Nombre de passagers

— **Boeing 747** : 371 passagers

— **Airbus A320** : 174 passagers

Pour les calculs, nous considérons ici un avion plein. Pour un avion à moitié plein, il faudra multiplier le résultat final par 2.

Consommation de carburant par passager et par kilomètre**Boeing 747 :**

$$\text{Consommation} : 0,034 \text{ L/km/passager} \quad (66)$$

Incertitude : $\pm 5\%$

On a donc $0,034 \pm 0,0017 \text{ L/km/passager}$,
soit une valeur comprise entre 0,0323 et 0,0357 L/km/passager (67)

Airbus A320 :

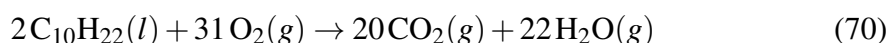
$$\text{Consommation} : 0,018 \text{ L/km/passager} \quad (68)$$

Incertitude : $\pm 5\%$

On a donc $0,018 \pm 0,0009 \text{ L/km/passager}$,
soit une valeur comprise entre 0,0171 et 0,0189 L/km/passager (69)

Rejet de CO₂

La réaction de combustion du kérosène est :



Avec la concentration de moles de kérosène, nous avons :

$$c = 2,82 \text{ mol/L pour 2 L de kérosène} \quad (71)$$

56,4 mol de CO₂ par L de kérosène, soit une masse de $56,4 \text{ mol} \times 44 \text{ g/mol} = 2,482 \text{ kg/L de CO}_2$ (72)

Boeing 747 : Rejet de CO₂ en g/km/passager :

$$0,034 \text{ L/km/passager} \times 2,482 \text{ kg/L} \times 1000 \text{ g/kg} = 84,4 \text{ g/km/passager} \quad (73)$$

Incertitude de $\pm 2\%$:

$$84,4 \pm 1,69 \text{ g/km/passager} \quad (74)$$

On obtient donc des valeurs comprises dans l'intervalle allant de 82,71 à 86,09 g/km/passager.

Airbus A320 : Rejet de CO₂ en g/km/passager :

$$0,018 \text{ L/km/passager} \times 2,482 \text{ kg/L} \times 1000 \text{ g/kg} = 44,7 \text{ g/km/passager} \quad (75)$$

Incertitude de $\pm 2\%$:

$$44,7 \pm 0,89 \text{ g/km/passager} \quad (76)$$

On obtient donc des valeurs comprises dans l'intervalle allant de 43,81 à 45,59 g/km/passager.

1.3.2 Résumé des résultats avec incertitudes

Boeing 747 :

- **Vitesse de croisière** : $1040,4 \pm 20,8$ km/h → intervalle de 1019,6 à 1061,2 km/h
- **Consommation par passager** : $0,034 \pm 0,0017$ L/km/passager → intervalle de 0,0323 à 0,0357 L/km/passager
- **Rejet de CO₂** : $84,4 \pm 1,69$ g/km/passager → intervalle de 82,71 à 86,09 g/km/passager

Airbus A320 :

- **Vitesse de croisière** : $954,72 \pm 19,1$ km/h → intervalle de 935,63 à 973,81 km/h
- **Consommation par passager** : $0,018 \pm 0,0009$ L/km/passager → intervalle de 0,0171 à 0,0189 L/km/passager
- **Rejet de CO₂** : $44,7 \pm 0,89$ g/km/passager → intervalle de 43,81 à 45,59 g/km/passager

Ces résultats montrent que, bien que le Boeing 747 consomme plus de carburant par heure, il transporte également beaucoup plus de passagers, ce qui rend la consommation par passager plus faible en comparaison avec l'Airbus A320.

1.4 Voyager en bateau

Le milieu des constructeurs de bateaux manque fortement de transparence. Aucune donnée sur les moteurs, leur nombre ou leur puissance n'est accessible au public. De plus, ce moyen de transport est difficile à utiliser en raison du temps nécessaire et ne permet pas de joindre les destinations que nous utiliserons dans la deuxième partie.

Nous avons donc décidé d'exclure les calculs sur ce mode de transport. Nous prendrons en compte la donnée fournie par l'Agence européenne de l'environnement, selon laquelle le transport en ferry émet environ 60 grammes de CO₂ par kilomètre et par passager, soit près de trois fois moins qu'en avion. Cependant, la pollution hors CO₂ est non négligeable, notamment la pollution de l'eau.

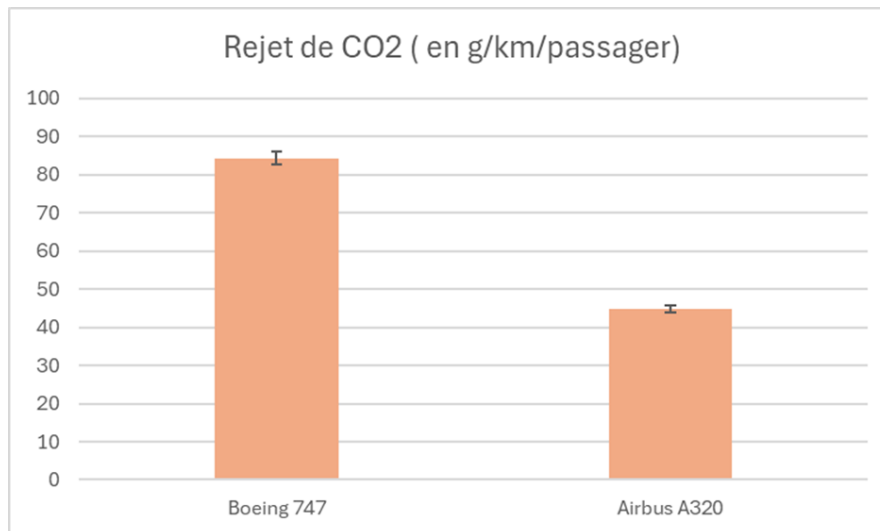


FIGURE 3 – Émissions de carbone en fonction du type d'avion et du scénario.

2 Application en situation réelle

2.1 Émissions selon la destination

Maintenant que nous avons établi des formules permettant de calculer les émissions de CO₂ par personne et par km pour chaque mode de transport, nous pouvons estimer l'empreinte carbone de voyages à différentes distances. Pour chacune des destinations, nous choisirons comme point de départ et d'arrivée les hôtels de ville, en prenant en compte les déplacements nécessaires entre ces derniers et les gares / aéroports / ports. Nous étudierons le cas d'une seule personne qui voyage en prenant les transports les plus adaptés vers sa destination, ainsi qu'une éventuelle alternative réaliste vers cette destination lorsque cela est possible. Les distances fournies sont des approximations obtenues à partir de données de cartographie (trajets Google Maps, outils en ligne...).

Les différentes destinations que nous traiterons sont : Marseille (courte distance), Athènes (moyenne distance) et Tokyo (longue distance). Chacune de ces destinations est accessible via plusieurs modes de transport

2.1.1 Voyage Paris – Marseille

Nous avons défini 4 itinéraires jugés réalistes pour effectuer un trajet de Paris à Athènes, hôtel de ville à hôtel de ville.

En train : Distance totale : 750 km

TGV (rempli) :

$$750 \times 1,28 = 0,960 \text{ kg} \quad \pm 750 \times 0,0000688 = 0,052 \text{ kg} \quad (77)$$

TER (rempli à 50%) :

$$750 \times 18,77 = 14,1 \text{ kg} \quad \pm 750 \times 0,000377 = 0,3 \text{ kg} \quad (78)$$

En voiture (787 km) : Essence :

$$787 \times 0,0183 \times 5 = 72,2 \text{ kg} \quad \pm 0,0018 \times 5 \times 787 = 7,1 \text{ kg} \quad (79)$$

Diesel :

$$787 \times 0,0181 \times 5 = 71,3 \text{ kg} \quad \pm 0,0018 \times 5 \times 787 = 7,1 \text{ kg} \quad (80)$$

Électrique :

$$787 \times 0,0096 \times 5 = 38,0 \text{ kg} \quad \pm 0,0010 \times 5 \times 787 = 3,9 \text{ kg} \quad (81)$$

En bus (787 km) : Bus :

$$787 \times 0,0155 = 12,2 \text{ kg} \quad \pm 0,0016 \times 787 = 1,3 \text{ kg} \quad (82)$$

En avion (646,19 km) : Airbus :

$$646,19 \times 0,044 = 28,43 \text{ kg} \quad \pm 0,00089 \times 646,19 = 0,58 \text{ kg} \quad (83)$$

Distance en voiture à ajouter (21,4 + 22,9 km) : Voiture essence (44,3 km) :

$$44,3 \times 0,0183 \times 5 = 4,05 \text{ kg} \quad \pm 0,0018 \times 5 \times 44,3 = 0,39 \text{ kg} \quad (84)$$

Incertitude absolue : U_{Total}

La formule de l'incertitude est donnée par :

$$U_{\text{Total}} = \text{Valeur totale} \times \sqrt{\left(\frac{U_1}{\text{Val}_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{\text{Val}_2}\right)^2} \quad (85)$$

Appliquée aux émissions totales :

$$U_{\text{Total}} = 58,55 \times \sqrt{\left(\frac{0,58}{28,43}\right)^2 + \left(\frac{0,39}{14,05}\right)^2} \approx 2,01 \text{ kg} \quad (86)$$

Le total des émissions est donc :

$$58,55 \text{ kg} \quad \pm 2,01 \text{ kg} \quad (87)$$

2.1.2 Voyage de Paris à Athènes

Itinéraire 1 : Tout en voiture

Situation la plus fréquente (véhicule essence)

Pour un trajet Paris-Athènes de 3 090 km, nous considérons deux cas pour une voiture essence :

- Pire cas : Consommation de 12 L/100 km avec un seul passager. Les émissions sont alors 275 g de CO₂ par km, soit :

$$275 \times 10^{-3} \times 3090 = 849,75 \text{ kg} \quad (88)$$

- Meilleur cas : Consommation de 4 L/100 km avec 5 passagers. Les émissions sont alors de 18,3 g de CO₂ par km, soit :

$$18,3 \times 10^{-3} \times 3090 = 56,55 \text{ kg} \quad (89)$$

Situation optimale (véhicule électrique) Pour une voiture électrique, les cas étudiés sont :

- **Pire cas** : Consommation de 25 kWh/100 km avec un seul passager. Les émissions sont alors de 80 g de CO₂ par km, soit :

$$80 \times 10^{-3} \times 3090 = 247,2 \text{ kg} \quad (90)$$

- **Meilleur cas** : Consommation de 15 kWh/100 km avec 5 passagers. Les émissions sont alors de 9,6 g de CO₂ par km, soit :

$$9,6 \times 10^{-3} \times 3090 = 29,66 \text{ kg} \quad (91)$$

Itinéraire 2 : Tout en bus

- Distance totale : 3 090 km.
- Calculs pour chaque cas :
 - **Cas favorable** : Bus diesel, 50 passagers, consommation 30 L/100 km.

$$E_{\text{favorable}} = 0.0155 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \times 3090 \text{ km} = 47.90 \text{ kg CO}_2. \quad (92)$$

- **Cas défavorable** : Bus diesel, 10 passagers, consommation 50 L/100 km.

$$E_{\text{défavorable}} = 0.129 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \times 3090 \text{ km} = 398.61 \text{ kg CO}_2. \quad (93)$$

Itinéraire 3 : Avion + voiture

- **Étape 1 : Voiture Hôtel de Ville Paris → Charles-de-Gaulle (30 km)**

- Cas favorable : $E = 0.0183 \times 30 = 0.549 \text{ kg CO}_2$.
- Cas défavorable : $E = 0.275 \times 30 = 8.25 \text{ kg CO}_2$.

- **Étape 2 : Avion Paris-Athènes (2 095 km)**

- Cas favorable : Airbus A320 rempli, 44.7 g CO₂/km/passager.

$$E_{\text{favorable}} = 0.0447 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager} \times 2095 = 93.63 \text{ kg CO}_2. \quad (94)$$

- Cas défavorable : Airbus A320 à moitié plein, $2 \times 0.0447 = 0.0894 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager}$.

$$E_{\text{défavorable}} = 0.0894 \times 2095 = 187.26 \text{ kg CO}_2. \quad (95)$$

- **Étape 3 : Voiture Aéroport Athènes → Hôtel de Ville (20 km)**

- Cas favorable : $E = 0.0183 \times 20 = 0.366 \text{ kg CO}_2$.
- Cas défavorable : $E = 0.275 \times 20 = 5.5 \text{ kg CO}_2$.

- **Total :**

- Cas favorable : $0.549 + 93.63 + 0.366 = 94.55 \text{ kg CO}_2$.
- Cas défavorable : $8.25 + 187.26 + 5.5 = 201.01 \text{ kg CO}_2$.

Itinéraire 4 : Avion + bus

— **Étape 1 : Bus Hôtel de Ville Paris → Charles-de-Gaulle (30 km)**

— Cas favorable : $E = 0.0155 \times 30 = 0.465 \text{ kg CO}_2$.

— Cas défavorable : $E = 0.129 \times 30 = 3.87 \text{ kg CO}_2$.

— **Étape 2 : Avion Paris-Athènes (2 095 km)** (cf. Itinéraire 3)

— Cas favorable : 93.63 kg CO_2 .

— Cas défavorable : 187.26 kg CO_2 .

— **Étape 3 : Bus Aéroport Athènes → Hôtel de Ville (20 km)**

— Cas favorable : $E = 0.0155 \times 20 = 0.31 \text{ kg CO}_2$.

— Cas défavorable : $E = 0.129 \times 20 = 2.58 \text{ kg CO}_2$.

— **Total :**

— Cas favorable : $0.465 + 93.63 + 0.31 = 94.41 \text{ kg CO}_2$.

— Cas défavorable : $3.87 + 187.26 + 2.58 = 193.71 \text{ kg CO}_2$.

Conclusion

— L'itinéraire **tout en voiture (défavorable)** est le plus polluant avec 849.75 kg CO_2 .

— L'itinéraire **tout en bus (favorable)** est le moins polluant avec 47.90 kg CO_2 .

2.1.3 Voyage de Paris à Tokyo

En train et en ferry

[14] [15] [16] [17] [18] On peut considérer une incertitude inexistante pour la distance en train, due au fait que les rails imposent un parcours constant. L'incertitude de distance en ferry peut être approximée à 1%.

Itinéraire détaillé

— Paris – Varsovie (via Cologne) (train)

— Varsovie – Moscou (train)

— Moscou – Pékin (Transmongolien)

— Pékin – Shanghai (train)

— Shanghai – Kobe (ferry)

— Kobe – Tokyo (train)

Résumé du trajet

— Distance en train : $12221,74 \text{ km}$

— Distance en ferry : $1434,3 \pm 14,343 \text{ km}$

Calcul des émissions de CO₂

Train : On sait qu'un train émet $1,28 \pm 0,068 \text{ g CO}_2/\text{km/passager}$.

$$\text{Total train} = 12221,74 \times 1,28 = 15644,83 \text{ g CO}_2 \quad (96)$$

Ferry : On sait qu'un ferry émet $60 \text{ g CO}_2/\text{km/passager}$.

$$\text{Total ferry} = 1434,3 \times 60 = 86058 \text{ g CO}_2 \quad (97)$$

Total :

$$\text{Total CO}_2 = 15\,644,83 + 86\,058 = 101\,701,83 \text{ g CO}_2 = 101,7 \text{ kg CO}_2 \quad (98)$$

Incertitude associée :

$$U_{\text{Total}} = 101,7 \times \sqrt{\left(\frac{14,343}{1434,3}\right)^2 + \left(\frac{0,068}{1,28}\right)^2} \quad (99)$$

$$U_{\text{Total}} \approx 5,50 \text{ kg CO}_2 \quad (100)$$

Résultat final :

$$101,7 \pm 5,50 \text{ kg CO}_2 \quad (101)$$

Conclusion On remarque que l'impact environnemental de ce voyage est relativement faible. Cependant, il reste important de prendre en compte que ce trajet est long et onéreux : il dure environ 8 jours et coûte entre 925 € et 1 636 € par personne. Il est donc réservé à des profils de voyageurs particuliers, avec beaucoup de congés et un budget conséquent.

En avion et voiture On considérera que les trajets jusqu'aux aéroports seront faits en voiture. [19] [20] [21] **Itinéraire détaillé**

- Paris – Aéroport Charles de Gaulle (voiture)
- Aéroport Charles de Gaulle – Haneda (avion)
- Haneda – Tokyo (voiture)

Résumé du trajet

- Distance en avion : 9752,90 km
- Distance en voiture : 61,9 km (25,9 km au Japon + 36 km en France)

Calcul des émissions de CO₂

Avion : On sait qu'un avion consomme $84,4 \pm 1,69 \text{ g CO}_2/\text{km/passager}$, soit une incertitude de 2%. En intégrant cette incertitude, nous considérons une marge totale de 5%.

$$\text{Total avion} = 84,4 \times 9752,90 = 823\,144,76 \text{ g CO}_2 = 823,14 \pm 41,16 \text{ kg CO}_2 \quad (102)$$

Voiture : Pour une voiture GPL idéale consommant 5 L/100 km, l'émission est de :

$$0,0150 \pm 0,0015 \text{ kg CO}_2/\text{km/passager pour 5 passagers.} \quad (103)$$

Pour 1 passager, on obtient :

$$0,0150 \times 5 \pm 0,0015 \times 5 = 0,075 \pm 0,0075 \text{ kg CO}_2/\text{km.} \quad (104)$$

Ainsi, les émissions pour 61,9 km sont :

$$\text{Total voiture} = 61,9 \times 0,075 = 4,64 \pm 0,0075 \text{ kg CO}_2. \quad (105)$$

Total :

$$\text{Total CO}_2 = 823,14 + 4,64 = 827,78 \text{ kg CO}_2. \quad (106)$$

Incertitude associée

$$U_{\text{Total}} = 827,78 \times \sqrt{\left(\frac{0,0075}{4,64}\right)^2 + \left(\frac{41,16}{823,14}\right)^2}. \quad (107)$$

$$U_{\text{Total}} \approx 41,41 \text{ kg CO}_2. \quad (108)$$

Résultat final :

$$827,78 \pm 41,41 \text{ kg CO}_2. \quad (109)$$

Conclusion Ce trajet, bien que beaucoup plus polluant (plus de 8 fois plus qu'un voyage en train et ferry), reste plus accessible en termes de budget et de temps. En effet, il ne dure que 13,25 heures environ, et coûte entre 398€ et 789€.

2.2 Fréquence possible de voyage

L'ADEME (l'agence de la transition écologique) indique que le budget carbone individuel annuel est établi à 2 tonnes par an en France, afin de limiter le réchauffement climatique à +1,5°C d'ici à 2050. Maintenant que nous avons déterminé les émissions de CO₂ d'une personne voyageant seule dans le monde, nous pouvons établir des scénarios optimisés permettant à un individu de pouvoir voyager le plus possible à chacune de ces destinations sans dépasser leur budget carbone annuel. Le budget carbone étant déjà dépassé sans prendre en compte les déplacements, il faudrait réduire nos consommations quotidiennes et limiter les voyages. Cependant, pour rester réalistes, nous considérons que les voyages doivent représenter 5% des émissions carbone annuelles de chaque personne. Cela correspond à un plafond de 100 kg de CO₂ par an pour les voyages.

2.2.1 Fréquence de voyage à courte distance

Émissions moyennes par trajet (tous modes de transport) :

$$\frac{58,55 + 12 + 38 + 70 + 72 + 14,1 + 0,960}{7} = 37,94 \text{ kg} \quad (110)$$

Émissions pour un aller-retour :

$$37,94 \times 2 = 75,88 \text{ kg} \quad (111)$$

Budget carbone restant :

$$100 - 75,88 = 24,12 \text{ kg} \quad (112)$$

Voyages possibles par an :

- 1 voyage par an à une petite destination avec des émissions restantes (24,12 kg non émises, sachant que le transport a été pris en compte).
- 50 aller-retours par an si vous choisissez le TGV, ce qui est le moyen de transport le plus favorable pour une fréquence de voyages élevée tout en émettant le moins de CO₂.

2.2.2 Fréquence de voyage à moyenne distance

Émissions moyennes par trajet (tous itinéraires confondus) :

$$\text{Moyenne} = \frac{849,75 + 56,55 + 247,2 + 29,66 + 398,61 + 47,90 + 187,26 + 94,55}{8} \quad (113)$$

$$\text{Moyenne} = 238,43 \text{ kg CO}_2 \quad (114)$$

Émissions pour un aller-retour :

$$238,43 \times 2 = 476,86 \text{ kg CO}_2 \quad (115)$$

Budget carbone restant :

$$100 - 476,86 = -376,86 \text{ kg CO}_2 \quad (116)$$

Voyages possibles par an :

$$\text{Nombre de voyages} = \frac{100}{476,86} \approx 0,21 \text{ voyage par an.} \quad (117)$$

Puisque le budget est négatif, il est possible d'effectuer ce trajet une fois tous les **5 ans environ**.

Nombre de voyages possibles dans le cas le plus favorable (bus rempli) :

$$\text{Cas favorable} = 47,90 \text{ kg CO}_2 \text{ par trajet.} \quad (118)$$

Émissions pour un aller-retour :

$$47,90 \times 2 = 95,80 \text{ kg CO}_2 \quad (119)$$

Budget carbone restant :

$$100 - 95,80 = 4,20 \text{ kg CO}_2 \quad (120)$$

Voyages possibles par an :

$$\text{Nombre de voyages favorables} = \frac{100}{95,80} \approx 1,04 \text{ voyage par an.} \quad (121)$$

2.2.3 Fréquence de voyage à grande distance

Calcul de la fréquence : Pour un voyage aller-retour Paris-Tokyo, avec une incertitude de 10% pour généraliser le cas :

$$\text{Fréquence avion} = \frac{827,78 \times 2}{100} = 16,36 \pm 10\%. \quad (122)$$

En arrondissant à l'entier supérieur :

$$\text{Il faudrait attendre 17 ans avant de voyager à nouveau.} \quad (123)$$

Pour un voyage en train et ferry, nous avons :

$$\text{Fréquence train/ferry} = \frac{101,7 \times 2}{100} = 2,03 \pm 10\%. \quad (124)$$

En arrondissant à l'entier supérieur, il faudrait attendre 3 ans avant de voyager à nouveau.

2.3 Exemple d'émissions de célébrités

Afin de mieux réaliser l'impact écologique de nos déplacements, nous allons effectuer une analyse d'émissions de transport de deux célébrités : Elon Musk et Taylor Swift. On considérera 3 sources d'incertitude principales :

- **Sur la consommation de carburant :** La valeur de consommation de carburant peut varier en fonction des conditions météorologiques, du poids de l'avion, etc. On prendra donc une incertitude de 5%.
- **Sur la vitesse de croisière :** Les vitesses de croisière changent aussi selon les conditions de vol. Les valeurs sont fiables, car fournies par les fabricants. On prendra donc une incertitude de 2%.
- **Sur le calcul du CO₂ :** Des petites erreurs dans les valeurs molaires ou les arrondis de calculs peuvent être prises grâce à une incertitude de 2%.

En plus d'un vol commercial, on considère une incertitude sur les données de base concernant les trajets. On prend une incertitude de 10%. En effet, selon nos sources, on a des distances parcourues allant de 212 068,58 miles à 183 308 miles. On fait donc une moyenne :

$$\text{Moyenne} = \frac{212068.58 + 183308}{2} = 197688.29 \text{ miles}, \quad (125)$$

et cette moyenne se situe à environ 10% des valeurs sourcées (on a un intervalle compris entre 217 457,12 et 177 919,46 miles).

On considère un passager, car l'équipage ne voyagerait pas si le voyageur ne prenait pas l'avion. On ne prend donc pas une émission de carbone en fonction du nombre de voyageurs, mais simplement selon le trajet.

2.3.1 Elon Musk

[22] [23] [24]

Modèle jet : Gulfstream G700

- Vitesse de croisière : Mach 0,85 ($0,85 \times 340 \text{ m/s} = 289 \text{ m/s} = 1\,040,4 \text{ km/h.}$)
Incertitude : $\pm 2\%$, soit : $1\,040,4 \text{ km/h} \pm 20,8 \text{ km/h}$
- Consommation de carburant : 382 gal/h avec $1 \text{ gal} = 3,79 \text{ L}$
 $\Rightarrow 382 \text{ gal/h} = 1\,447,78 \text{ L/h.}$
Incertitude : $\pm 5\%$, soit : $1\,447,78 \text{ L/h} \pm 72,389 \text{ L/h}$
- Consommation en L/km :

$$\frac{1\,447,78 \text{ L/h}}{1\,040,4 \text{ km/h}} = 1,39 \text{ L/km.} \quad (126)$$

Rejet de CO₂ : On utilise nos calculs de la partie 1 pour déterminer que l'on rejette $2,482 \text{ kg}$ de CO₂ par litre de kérosène. Ainsi, le rejet de CO₂ est le suivant :

$$1,39 \text{ L/km} \times 2,482 \text{ kg/L} = 3,28 \text{ kg/km.} \quad (127)$$

On prend une incertitude de $\pm 2\%$:

$$3,28 \text{ kg/km} \pm 0,066 \text{ kg/km} \Rightarrow \text{Intervalle : } [3,214; 3,346] \text{ kg/km.} \quad (128)$$

En considérant que l'avion ne transporte qu'une personne, on remarque que cette valeur est considérable comparée à un avion commercial classique (presque 39 fois plus).

Distance parcourue : On sait qu'Elon Musk a parcouru $197\,688.29$ miles entre le 13 novembre 2023 et le 20 novembre 2024 :

$$197\,688.29 \text{ miles} \times 1,609 = 318\,080.46 \text{ km.} \quad (129)$$

Ainsi, durant cette période, il a émis :

$$318\,080.46 \text{ km} \times 3,28 \text{ kg/km} = 1\,043\,303.90 \text{ kg} = 1\,043.304 \text{ tonnes de CO}_2. \quad (130)$$

Incertitude associée :

$$U(c) = 441 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,02^2}{1\,040,4^2}\right) + \left(\frac{0,05^2}{1\,447,78^2}\right) + \left(\frac{0,02^2}{3,28^2}\right) + \left(\frac{0,10^2}{318\,080,46^2}\right)}. \quad (131)$$

En simplifiant :

$$U(c) \approx 0,0061 \text{ kg.} \quad (132)$$

Résultat final :

Émissions : $1\,043\,303,90 \pm 0,0061 \text{ kg CO}_2$, soit $1\,043,304 \pm 6,1 \cdot 10^{-6}$ tonnes de CO₂.
(133)

Comparaison au budget carbone : L'"enveloppe" par défaut est fixée à 2 tonnes de CO₂/an, le budget par habitant correspondant à la neutralité carbone à l'échelle planétaire. D'après les calculs précédents, Elon Musk émet donc, uniquement par ses déplacements annuels, plus de 500 fois son budget annuel.

2.3.2 Taylor Swift et l'Eras Tour

Taylor Swift était en tournée cette année pour son concert, nommé *The Eras Tour*. Au total, 146 dates ont été prévues, mais pour la période d'un an allant du 13 novembre 2023 au 13 novembre 2024, environ 80 dates ont eu lieu dans plus de 28 destinations à travers le monde. Elle a pris son jet un bon nombre de fois durant cette période, cela représente 64 vols.

Avion utilisé : Dassault Falcon 7 (N621MM) [25] [26] [27]

- Vitesse de croisière : 955 km/h $\pm 2\%$
Cela donne : 955 km/h $\pm 19,1$ km/h $\Rightarrow$ Intervalle : [935,9; 974,1] km/h.
- Consommation de carburant : 1 203 L/h $\pm 5\%$
Cela donne : 1 203 L/h $\pm 60,15$ L/h $\Rightarrow$ Intervalle : [1 142; 1 263,5] L/h.
- Consommation en L/km :

$$\frac{1\,203\text{ L/h}}{955\text{ km/h}} = 1,26\text{ L/km.} \quad (134)$$

Rejet de CO₂ : En utilisant les calculs précédents, on sait qu'un litre de kérosène rejette 2,482 kg de CO₂. Ainsi, le rejet de CO₂ est :

$$1,26\text{ L/km} \times 2,482\text{ kg/L} = 3,12\text{ kg/km.} \quad (135)$$

On prend une incertitude de $\pm 2\%$:

$$3,12\text{ kg/km} \pm 0,06\text{ kg/km} \Rightarrow \text{Intervalle : } [3,06; 3,18]\text{ kg/km.} \quad (136)$$

Distance parcourue : Taylor Swift a parcouru 81 910 miles entre le 13 novembre 2023 et le 13 novembre 2024. Convertissons cette distance en kilomètres :

$$81\,910\text{ miles} \times 1,609 = 131\,793\text{ km.} \quad (137)$$

Ainsi, durant cette période, elle a émis :

$$131\,793\text{ km} \times 3,12\text{ kg/km} = 411\,000\text{ kg} = 411\text{ tonnes de CO}_2. \quad (138)$$

$$U(c) = 441 \cdot \sqrt{\left(\frac{0.02^2}{955^2}\right) + \left(\frac{0.05^2}{1203^2}\right) + \left(\frac{0.02^2}{3.12}\right) + \left(\frac{0.10^2}{(1.318 \cdot 10^5)^2}\right)} = 0.056\text{ t} \quad (139)$$

Total : 411,000 $\pm$ 0,056 tonnes de CO₂

Comparaison au budget carbone

D'après les calculs précédents et en se basant sur un budget carbone de 2 tonnes de CO₂ annuel, Taylor Swift émet, uniquement par ses déplacements annuels, plus de 200 fois son budget annuel de CO₂.

Réflexions pour réduire l'impact environnemental

Pour diminuer cet impact, certains voyages courts pourraient être effectués en voiture. Cependant, l'impact de cette solution resterait faible, car les distances entre les

destinations, même au sein des États-Unis, rendent rapidement la durée du trajet bien trop longue.

Une alternative efficace serait que les célébrités utilisent des vols commerciaux. Cela permettrait de diviser considérablement leur impact personnel, même s'ils privatisent une partie de l'avion pour des raisons de sécurité (par exemple, en réservant la première classe).

Cependant, la réflexion principale semble devoir être centrée sur leur mode de vie global. L'objectif ne serait pas seulement d'optimiser la pollution émise par chaque trajet, mais également d'optimiser les trajets eux-mêmes. Il s'agirait notamment d'éviter les allers-retours superflus, qui ont parfois lieu dans la même journée, et d'organiser les déplacements de manière plus rationnelle.

3 Conclusion

Ce projet nous a permis de déterminer les moyens de transport les moins polluants de manière générale, qui sont le train puis le bus. Nous avons ensuite pu appliquer tous les moyens de transport à des situations concrètes, dans la limite du réalisable. Nous avons pu remarquer que même si les modes de transport les moins polluants sont souvent utilisables, ils présentent des désavantages importants tels que la durée du trajet et le coût. Ces désavantages pourraient être compensés par des taxes ou des aménagements, mais il reste important de garder en tête les aspects économiques qui entrent en jeu et l'importance de limiter les constructions nouvelles pour l'écologie. Les distances parcourues sont significatives, ce qui a un grand impact sur les fréquences auxquelles on peut se permettre ces voyages. Malgré tout, les fréquences calculées restent loin d'être idéales, car même en l'absence de voyage, le crédit carbone par habitant est largement dépassé. De plus, ces fréquences sont très largement dépassées par la grande majorité de la population; au vu de ce qui a pu être constaté par nos calculs, nous ne devrions même pas voyager car c'est un facteur d'émission trop important par rapport à la situation écologique actuelle.

Nous apprenons aussi, sans surprise, que les célébrités provoquent par leurs déplacements une quantité de carbone considérable, surtout aux États-Unis, le tout accompagné par un mode de vie également très polluant, et comportant un grand nombre de voyages. Nous souhaitons également rappeler que le crédit d'émission de CO₂ par an et par habitant est fixé à 2 tonnes pour atteindre la neutralité carbone. Nous avons bien conscience que malgré l'impact écologique des voyages, ce n'est pas le seul paramètre à modifier pour atteindre cet objectif. Nous considérons donc nos calculs plus comme un premier pas nécessaire vers une neutralité carbone plutôt qu'une solution écologique absolue.

Références

- [1] Energy Data. Énergie contenue dans un litre d'essence. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/fuel-properties-comparison>, 2023.
- [2] John Smith and Jane Doe. *Handbook of Thermodynamics*. Academic Press, Paris, France, 3 edition, 2019.
- [3] ChemData. Propriétés chimiques du diesel. <https://www.chemdata.com/diesel-properties>, 2023.
- [4] Petroleum Data. Composition et émissions du gpl. <https://www.petroleum-info.com/gpl-composition-emissions>, 2023.
- [5] French Petroleum Association. Composition typique du gpl en france. <https://www.frenchpetroleumassociation.com/gpl/composition>, 2023.
- [6] RTE France. Intensité carbone du mix énergétique français. <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2023/emissions>, 2023.
- [7] RTE France. Bilan électrique 2023. *RTE France*, 2023.
- [8] Automobile Propre. La consommation d'une voiture électrique. <https://www.automobile-propre.com/dossiers/la-consommation-dune-voiture-electrique/>, 2023.
- [9] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Facteurs d'émission des carburants et incertitudes associées. <https://www.ademe.fr/facteurs-emission>, 2023.
- [10] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Étude sur la variabilité des émissions des modes de transport. <https://www.ademe.fr/transport-variabilite-emissions>, 2022.
- [11] France TV Info. Pourquoi des trains carburent-ils toujours au diesel en france. https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/sncf/pourquoi-des-trains-carburent-ils-toujours-au-diesel-en-france_4058635.html, 2020.
- [12] SNCF Connect. Voyager en train, un mode de transport éco-responsable. <https://www.sncf-connect.com/train/eco-responsable>, 2024. Consulté le 9 décembre 2024.
- [13] Aircraft Catalog. Boeing 747. <https://aircraft-catalog.com/fr/Boeing/Boeing-747/>. Consulté le 9 décembre 2024.
- [14] The Trainline. Horaires de train de cologne à varsovie. <https://www.thetrainline.com/fr/horaires-train/cologne-a-varsovie>, 2024.
- [15] Le Monde en Train. Voyage de paris à tokyo en train. <https://www.lemondeentrain.fr/paris-tokyo-en-train.html>, 2024.
- [16] Le Monde en Train. Voyage de paris à varsovie en train. <https://www.lemondeentrain.fr/paris-varsovie-en-train.html>, 2024.
- [17] Rome2Rio. De varsovie à moscou en train. <https://www.rome2rio.com/fr/s/Varsovie/Moscou>, 2024.
- [18] Rome2Rio. De pékin à tokyo en train et ferry. <https://www.rome2rio.com/fr/map/P%C3%A9kin/Tokyo#trips/transport/P%C3%A9kin/Tokyo/r/Train-car-ferry>, 2024.

- [19] Air France. Recherche de vols air france. <https://www.airfrance.fr/search/flights/0>, 2024.
- [20] Distance.to. Distance entre paris et tokyo. <https://fr.distance.to/Paris/Tokyo>, 2024.
- [21] Google Maps. Itinéraire entre paris et tokyo. <https://www.google.fr/maps/dir/Paris/Tokyo,+Japon/@34.0072028,28.7536337,3z/data=!3m1!4b1!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x47e66e1f06e2b70f:0x40b82c3688c9460!2m2!1d2.3513765!2d48.8575475!1m5!1m1!1s0x605d1b87f02e57e7:0x2e01618b22571b89!2m2!1d139.650027!2d35.6764225!3e4>, 2024.
- [22] Compare Private Planes. Gulfstream g700 - jet privé. <https://compareprivateplanes.com/fr/listing/large/g700>, 2024. Consulté le 9 décembre 2024.
- [23] ClimateJets. Elon musk - impact climatique des jets privés. <https://climatejets.org/wrapped/elon-musk>, 2024. Consulté le 9 décembre 2024.
- [24] Celebrity Private Jet Tracker. Elon musk - jet privé n628ts. <https://celebrityprivatejettracker.com/elon-musk-n628ts/>, 2024. Consulté le 9 décembre 2024.
- [25] Jetflo. Dassault falcon 7x - jet privé. <https://jetflo.com/fr/charters/dassault-falcon-7x/>, 2024.
- [26] Celebrity Private Jet Tracker. Taylor swift - jet privé n621mm. <https://celebrityprivatejettracker.com/taylor-swift-n621mm/>, 2024.
- [27] Taylor Swift Official Website. Taylor swift - tour officiel. <https://www.taylorswift.com/tour/>, 2024. Consulté le 9 décembre 2024.