

# Rapport SMA

## Impact environnemental du flux aérien

SCIA - Promo 2025

Systèmes Multi-Agents



**Enseignant**

Laurent LUCIEN

**Groupe d'étudiants**

Totally Spies 2x

Assil Achour - Alexandre Bailly - Nael El Janati El Idrissi

Djunice Lumban - Jean-Michel Naud - Florian Tigoulet

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Impact environnemental et psychologique</b>	<b>1</b>
2.1	Facteurs de pollution . . . . .	1
2.2	Impact psychologique . . . . .	1
<b>3</b>	<b>Conception du modèle et des agents</b>	<b>2</b>
3.1	Description . . . . .	2
3.2	Caractéristiques . . . . .	2
3.2.1	Paramètres d'initialisation . . . . .	2
3.2.2	Paramètres de Simulation . . . . .	2
3.2.3	Attributs des avions . . . . .	2
3.2.4	Attributs des <i>circles</i> . . . . .	3
3.2.5	Variables globales . . . . .	3
3.3	Comportements . . . . .	3
3.3.1	Comportements des avions . . . . .	3
3.3.2	Comportements des <i>circles</i> . . . . .	4
3.4	Évolution de la pollution . . . . .	4
3.5	Exécution du modèle . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Choix d'implémentation</b>	<b>5</b>
4.1	Langage de programmation et environnement de simulation . . . . .	5
4.2	Structure du modèle et des agents . . . . .	5
4.3	Initialisation et paramètres de simulation . . . . .	5
4.4	Calcul des émissions et collecte des données . . . . .	6
4.5	Visualisation et analyse des résultats . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>7</b>
5.1	Impact des choix des villes . . . . .	7
5.1.1	Distance entre les villes . . . . .	7
5.1.2	Sélection de plusieurs villes . . . . .	7
5.2	Impact du temps au sol ( <i>time on floor</i> ) . . . . .	7
5.2.1	Délai avant décollage . . . . .	7
5.2.2	Optimisation des opérations au sol . . . . .	7
5.3	Comparaison de la consommation des 4 types d'avions . . . . .	8
5.3.1	Airbus A380 (Fuel Consumption : 11400 litres par heure) . . . . .	8
5.3.2	Boeing 707 (Fuel Consumption : 14400 litres par heure) . . . . .	8
5.3.3	Airbus A320 (Fuel Consumption : 2100 litres par heure) . . . . .	8
5.3.4	Custom (Fuel Consumption : custom-fuel-consumption) . . . . .	8
5.3.5	Comparaison globale et perspectives d'amélioration . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Perspectives</b>	<b>9</b>
6.1	Réalisme de la simulation . . . . .	9
6.2	Extension de la carte géographique . . . . .	9
6.3	Trajets plus réalistes et diversifiés . . . . .	9
6.4	Incorporation de nouveaux facteurs . . . . .	10
6.5	Optimisation des vols et des routes aériennes . . . . .	10

7	Comparaison avec d'autres moyens de transports	10
8	Conclusion	11
9	Ressources	11
10	Annexe	12

# 1 Introduction

Un être humain ne devrait émettre qu'environ 2 tonnes de CO<sub>2</sub> par an pour être considéré comme "écologique". Cependant, un seul aller-retour en avion pour un voyage long-courrier comme Paris-Tokyo émet environ 4 tonnes de CO<sub>2</sub>, dépassant largement ce seuil. Avec plus de 15 mille vols intérieurs en France en 2021 et une moyenne de 3 vols par personne, il est clair que les émissions des transports aériens représentent un défi environnemental majeur.

Cette situation soulève une problématique essentielle :

Quels sont les principaux leviers pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur de l'aviation commerciale ?

## 2 Impact environnemental et psychologique

### 2.1 Facteurs de pollution

Pour calculer les émissions de CO<sub>2</sub> d'un avion selon son type, plusieurs facteurs entrent en jeu. Voici les principaux éléments à prendre en compte et la méthode de calcul :

**Facteurs :**

- Type d'avion et modèle précis (A320, B737, etc.)
- Consommation de carburant par heure de vol (variable selon l'avion)
- Type de carburant (généralement du kérosène)
- Facteur d'émission du carburant (quantité de CO<sub>2</sub> émise par litre de carburant brûlé)
- Distance du vol
- Nombre de passagers à bord
- Classe de voyage (économique, affaires, première)

**Explication du calcul :**

1. Calculer la consommation totale de carburant du vol.
2. Déterminer les émissions totales de CO<sub>2</sub> en utilisant un facteur d'émission pour le kérosène.
3. Ajuster les émissions par passager selon la classe - économique, affaires (facteur 2) ou première (facteur 3/4) - en divisant les émissions totales par le nombre de sièges occupés dans chaque classe. Un vol Paris-New York en A380 à 80% de remplissage émettra environ 124 kgCO<sub>2</sub> par passager en éco, 348 en affaires et 1238 en première, illustrant l'impact important de la classe de voyage sur les émissions individuelles.

### 2.2 Impact psychologique

Au-delà de l'impact environnemental, les émissions des transports peuvent avoir un impact psychologique non négligeable. Les passagers conscients de leur empreinte carbone peuvent ressentir de la culpabilité, tandis que d'autres peuvent minimiser les conséquences ou se sentir impuissants face à un problème si vaste.

La connaissance des émissions de CO<sub>2</sub> d'un trajet en avion peut influencer les individus de diverses manières :

- **Culpabilité** : Conscience accrue des contributions à la crise climatique, surtout chez les sensibilisés.

- **Anxiété Écologique** : Intensification des préoccupations environnementales et détresse psychologique.
- **Motivation au Changement** : Encouragement à réduire les voyages en avion, compenser les émissions, ou choisir des transports durables.
- **Conflits Internes** : Tensions entre le désir de voyager et la réduction de l'empreinte carbone.
- **Satisfaction et Responsabilité** : Sentiment positif pour ceux qui prennent des mesures écologiques.
- **Scepticisme et Dissonance Cognitive** : Rejet ou minimisation des données sur les émissions, créant des conflits cognitifs.

## 3 Conception du modèle et des agents

### 3.1 Description

Un agent dans ce modèle représente un avion, identifié par un certain type (1, 2, 3 ou 4), chacun ayant des caractéristiques distinctes en termes d'émissions de gaz. L'environnement est une carte de la France avec plusieurs points marquant des villes connues telles que Paris, Lyon, Marseille, Toulouse et Bordeaux. Ces villes servent de points de départ et d'arrivée pour les vols des avions.

Un autre type d'agent, appelé *circle*, représente visuellement les niveaux de pollution dans chaque ville en temps réel. Ces agents sont positionnés sur les coordonnées des villes et changent de couleur en fonction du niveau de gaz émis par les avions qui décollent dans ces villes.

### 3.2 Caractéristiques

Les caractéristiques incluent toutes les variables importantes utilisées dans le modèle. Voici les principales :

#### 3.2.1 Paramètres d'initialisation

- **count-plane-type** : Nombre d'avions de chaque type au début de la simulation.
- **custom-fuel-consumption** : Consommation de carburant personnalisée pour un type d'avion spécifique.

#### 3.2.2 Paramètres de Simulation

- **time-on-floor** : Temps passé par les avions au sol avant le décollage.
- **selected-plane-type** : Type d'avion actuellement sélectionné pour les opérations de départ et d'arrivée.
- **selected-departure-cities** : Villes sélectionnées comme points de départ pour les avions.
- **selected-arrival-cities** : Villes sélectionnées comme points d'arrivée pour les avions.

#### 3.2.3 Attributs des avions

- **fuel-consumption** : Consommation de carburant d'un avion pendant le vol.
- **departure-city** : Ville de départ de l'avion.
- **arrival-city** : Ville d'arrivée de l'avion.
- **gas-emitted** : Quantité de gaz émis par l'avion pendant le vol.
- **plane-type** : Type d'avion (par exemple, Airbus A380, Boeing 707, etc.).
- **arrival-coordinates** : Coordonnées de la ville d'arrivée.

- **total-time** : Temps total de vol entre le départ et l'arrivée en ticks.
- **departure-time** : Ticks de départ de l'avion.

### 3.2.4 Attributs des *circles*

- **city-represented** : Ville représentée par le *circle*.
- **gas-counter** : Compteur de gaz émis enregistré par le *circle*.

### 3.2.5 Variables globales

- **total-gas-emitted** : Quantité totale de gaz émis par tous les avions.
- **plane-counts** : Liste contenant le nombre d'avions de chaque type.
- **city-coordinates** : Liste des coordonnées des villes disponibles pour le départ et l'arrivée.
- **max-planes-flying** : Nombre maximum d'avions autorisés en vol simultanément.
- **city-names** : Liste des noms des villes disponibles.
- **selected-departure-cities1, selected-departure-cities2, selected-departure-cities3, selected-departure-cities4** : Villes de départ sélectionnées pour les types d'avions 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- **selected-arrival-cities1, selected-arrival-cities2, selected-arrival-cities3, selected-arrival-cities4** : Villes d'arrivée sélectionnées pour les types d'avions 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- **report-departure-cities1, report-departure-cities2, report-departure-cities3, report-departure-cities4** : Rapport des villes de départ pour les types d'avions 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- **report-arrival-cities1, report-arrival-cities2, report-arrival-cities3, report-arrival-cities4** : Rapport des villes d'arrivée pour les types d'avions 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- **departure-delay** : Délai de départ pour les avions.
- **total-gas-emitted-type1, total-gas-emitted-type2, total-gas-emitted-type3, total-gas-emitted-type4** : Quantité totale de gaz émis par les avions de types 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- **pollution-max-threshold** : Seuil maximum de pollution pour changer la couleur des *circles*.

## 3.3 Comportements

Les comportements des agents définissent la manière dont les avions et les *circles* interagissent dans l'environnement.

### 3.3.1 Comportements des avions

- Les avions sont créés avec des caractéristiques spécifiques à leur type, telles que la consommation de carburant.
- Les villes de départ et d'arrivée sont choisies aléatoirement parmi les options disponibles.
- Les avions se déplacent du point de départ au point d'arrivée, émettant du gaz en fonction de leur consommation de carburant, du temps de vol et du temps passé au sol.
- Les émissions de gaz sont calculées en temps réel et ajoutées au total des émissions globales.
- Les avions sont supprimés de l'environnement une fois qu'ils atteignent leur destination.

### 3.3.2 Comportements des *circles*

- Les *circles* sont créés pour représenter chaque ville avec une couleur initiale verte.
- À chaque émission de gaz par un avion, le *circle* correspondant à la ville de départ ou d'arrivée incrémente son compteur de gaz.
- La couleur des *circles* change en fonction du niveau de gaz émis enregistré, passant de vert à jaune, orange, rouge, et finalement noir.

## 3.4 Évolution de la pollution

Un graphique est maintenu pour suivre l'évolution des émissions de gaz totales ainsi que celles des différents types d'avions. Chaque *circle* met à jour sa couleur en temps réel pour refléter les niveaux de pollution dans les villes représentées, offrant ainsi une visualisation dynamique de l'impact environnemental des vols simulés.

## 3.5 Exécution du modèle

Le modèle est initialisé en définissant les coordonnées des villes, la consommation de carburant des avions, et les autres paramètres globaux. Les avions sont ensuite créés et se déplacent selon les comportements définis, tandis que les *circles* surveillent et affichent les niveaux de pollution. Le modèle est exécuté jusqu'à ce que toutes les destinations soient atteintes ou qu'un seuil de pollution soit dépassé, fournissant des informations précieuses sur les impacts environnementaux des trajets aériens simulés.

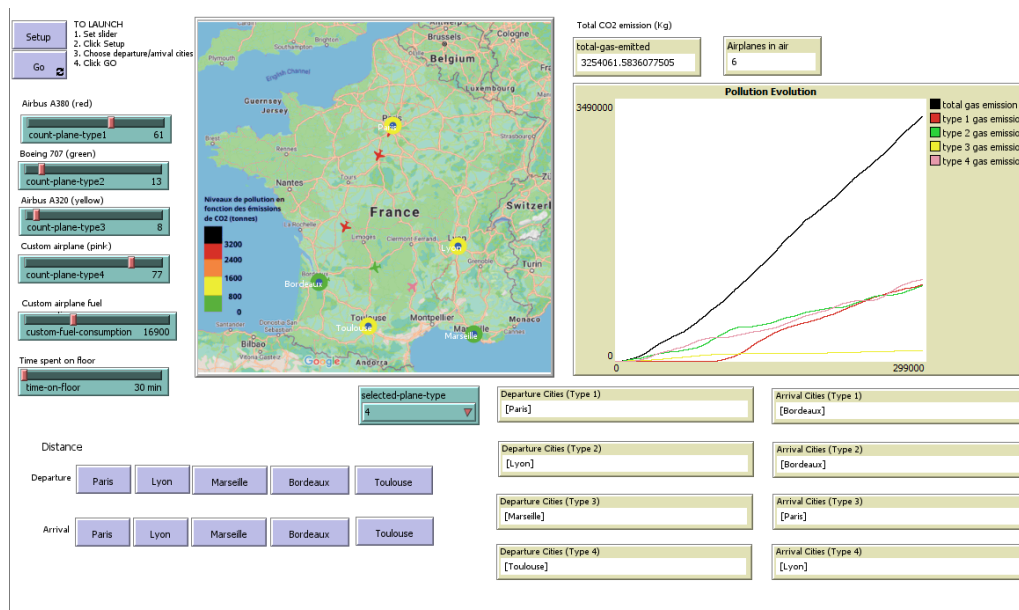


FIGURE 1 – Vue d'ensemble

## 4 Choix d'implémentation

L'implémentation de notre modèle de simulation s'est articulée autour de plusieurs choix techniques et méthodologiques pour assurer la précision et l'efficacité de la simulation des flux aériens et de leurs impacts environnementaux. Voici un aperçu des principaux choix effectués et des justifications associées.

### 4.1 Langage de programmation et environnement de simulation

Nous avons opté pour l'utilisation de NetLogo, un environnement de programmation conçu spécifiquement pour la modélisation des systèmes complexes et les simulations multi-agents. Ce choix s'est avéré pertinent pour plusieurs raisons :

- **Simplicité et accessibilité** : NetLogo est reconnu pour sa facilité d'utilisation et sa courbe d'apprentissage douce, ce qui nous a permis de développer rapidement des prototypes et d'itérer efficacement sur le modèle. Nous avons choisi NetLogo pour simplifier le processus de développement.
- **Fonctionnalités adaptées** : Les bibliothèques et les fonctionnalités intégrées de NetLogo, telles que la gestion des agents, la visualisation des données et la simulation des dynamiques spatiales, correspondent parfaitement à nos besoins. NetLogo offre des outils essentiels pour notre simulation.

### 4.2 Structure du modèle et des agents

Notre modèle repose sur une représentation simplifiée mais suffisamment détaillée des avions, de l'environnement, et des points de pollution :

- **Agents avions** : Chaque agent représente un avion et possède des caractéristiques spécifiques (type, consommation de carburant, émissions de gaz, etc.). Ces agents sont dotés de comportements déterministes et stochastiques pour simuler le choix des trajets, les mouvements, et les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous avons inclus des agents avions pour représenter les différents types de vol.
- **Agents circles** : Chaque agent circle représente une ville dans notre environnement. Les agents circles possèdent des attributs tels que la ville qu'ils représentent et un compteur de gaz (gas-counter) qui enregistre la quantité totale de gaz émis par les avions lors des départs et des arrivées dans cette ville. Les agents circles changent de couleur en fonction du niveau de pollution, fournissant une visualisation immédiate de l'impact environnemental sur chaque ville.
- **Environnement** : La carte de la France a été utilisée comme base pour simuler les trajets entre les principales villes (Paris, Lyon, Marseille, Toulouse, Bordeaux). Les coordonnées géographiques et les distances entre les villes sont intégrées pour calculer les temps de vol et les émissions. L'utilisation d'une carte réelle de la France permet une simulation plus précise.

### 4.3 Initialisation et paramètres de simulation

Pour garantir la flexibilité et la pertinence de notre simulation, nous avons inclus plusieurs paramètres d'initialisation et de simulation :

- **Nombre d'avions** : Paramétré pour chaque type d'avion, permettant de tester différents scénarios en termes de densité de trafic. Nous avons paramétré le nombre d'avions pour ajuster le trafic aérien simulé.



- **Consommation de carburant** : Ajustable individuellement pour chaque type d'avion, offrant la possibilité de simuler des avions avec différentes efficacités énergétiques. La consommation de carburant est ajustable pour tester différents niveaux d'efficacité énergétique.
- **Villes de départ et d'arrivée** : Sélectionnées aléatoirement parmi une liste préétablie, avec la possibilité de spécifier des préférences pour certains types d'avions. Les villes de départ et d'arrivée aléatoires permettent de diversifier les scénarios simulés. Si les villes de départ et d'arrivée sélectionnées ne sont pas valides (par exemple, si elles sont identiques), un message d'erreur est affiché pour demander à l'utilisateur de sélectionner des villes valides.

#### 4.4 Calcul des émissions et collecte des données

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont calculées en temps réel en fonction de la consommation de carburant des avions et de la durée des vols. Pour chaque vol, les données suivantes sont collectées :

- **Quantité de carburant consommée** : Basée sur la durée du vol, le temps passé au sol avant le décollage et la consommation horaire spécifique à chaque type d'avion. Nous collectons la quantité de carburant pour mesurer les émissions avec précision.
- **Émissions de gaz** : Calculées en multipliant la consommation de carburant par un facteur d'émission spécifique au type de carburant utilisé. La consommation de carburant est utilisée car elle représente directement la quantité de carburant brûlé, ce qui est proportionnel à la quantité de gaz émis. Cela permet d'estimer avec précision les émissions de gaz en fonction de l'activité de l'avion. De plus, les avions consomment plus de carburant au décollage et moins à l'atterrissage, ce qui est pris en compte dans les calculs d'émissions.
- **Temps de vol et distances parcourues** : Utilisés pour analyser l'efficacité des trajets et les performances des avions. Nous analysons le temps de vol et les distances pour évaluer l'efficacité des trajets.

#### 4.5 Visualisation et analyse des résultats

L'un des avantages de NetLogo est sa capacité à fournir des visualisations en temps réel des simulations :

- **Cartes et trajectoires** : Les déplacements des avions entre les villes sont affichés, permettant une visualisation claire des flux aériens. Les cartes et trajectoires offrent une visualisation claire des flux aériens.
- **Graphiques et statistiques** : Des graphiques en temps réel montrent les émissions totales de CO<sub>2</sub>, le nombre d'avions en vol, et d'autres indicateurs clés de performance.

## 5 Analyse de sensibilité

Dans cette section, nous examinerons en détail l'impact de différents paramètres sur les émissions de gaz à effet de serre dans notre simulation. Nous nous concentrerons sur trois aspects clés : le choix des villes, le temps d'attente au sol et la consommation de carburant des différents types d'avions. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les facteurs qui influencent les émissions et d'identifier les leviers potentiels pour réduire l'impact environnemental du trafic aérien.

### 5.1 Impact des choix des villes

#### 5.1.1 Distance entre les villes

La distance entre les villes de départ et d'arrivée est un facteur déterminant dans la quantité de gaz émis par les avions. En effet, plus la distance à parcourir est grande, plus l'avion consommera de carburant et émettra de CO<sub>2</sub>. Par exemple, un vol reliant Paris à Marseille générera davantage de pollution qu'un vol entre Paris et Lyon, en raison de la distance supérieure. Il est donc crucial de prendre en compte la distance entre les villes lors de l'analyse des émissions de gaz à effet de serre liées au trafic aérien. (Voir la différence entre Paris-Marseille, figure 2 et Paris-Lyon, figure 3 en annexe)

#### 5.1.2 Sélection de plusieurs villes

Notre simulation permet de sélectionner plusieurs villes comme points de départ et d'arrivée. Dans ce cas, les avions choisissent aléatoirement une ville de départ et une ville d'arrivée parmi celles spécifiées. La pollution moyenne générée sera alors approximativement équivalente à la moyenne des distances entre toutes les combinaisons possibles de villes de départ et d'arrivée. Cette fonctionnalité offre une flexibilité intéressante pour étudier l'impact de différents scénarios de trafic aérien et évaluer les émissions globales en fonction de la répartition des vols entre les villes. (Voir la figure 4 en annexe)

### 5.2 Impact du temps au sol (*time on floor*)

#### 5.2.1 Délai avant décollage

Le paramètre *time on floor* joue un rôle important dans notre simulation, car il détermine le temps d'attente entre chaque décollage d'avion. Plus ce paramètre est élevé, plus les avions resteront au sol avant de pouvoir décoller. Cela a pour conséquence de réduire la fréquence des vols en cours à un instant donné. En diminuant le nombre d'avions simultanément en vol, on peut observer une baisse temporaire des émissions totales de gaz. Ce paramètre permet donc de simuler différentes situations de trafic aérien et d'étudier leur impact sur les émissions de CO<sub>2</sub>. (Voir la différence entre un temps au sol égal à 30min, figure 5 et 90min, figure 6 en annexe)

#### 5.2.2 Optimisation des opérations au sol

Le temps passé par les avions au sol entre deux vols est un aspect souvent négligé, mais qui peut avoir un impact significatif sur les émissions globales. En effet, pendant ces périodes, les avions continuent à consommer du carburant et à émettre des gaz à effet de serre, même s'ils ne sont pas en vol. Optimiser les opérations au sol, en réduisant le temps d'attente et en améliorant l'efficacité des procédures de maintenance et de préparation des avions, peut contribuer à diminuer les émissions liées à cette phase du cycle de vie des aéronefs.

### 5.3 Comparaison de la consommation des 4 types d'avions

Notre simulation inclut 4 types d'avions différents, chacun ayant ses propres caractéristiques de consommation de carburant. Cette section vise à comparer les performances environnementales de ces différents types d'appareils.

#### 5.3.1 Airbus A380 (Fuel Consumption : 11400 litres par heure)

Le premier type d'avion présente une consommation moyenne de carburant relativement élevée, avec 11400 litres par heure. Cela se traduit par des émissions de CO<sub>2</sub> importantes à chaque trajet effectué par ce type d'appareil. Dans une perspective de réduction de l'impact environnemental, il pourrait être intéressant d'étudier des alternatives plus économes en carburant pour remplacer progressivement ces avions. (Voir la figure 7 en annexe)

#### 5.3.2 Boeing 707 (Fuel Consumption : 14400 litres par heure)

Le deuxième type d'avion consomme encore plus de carburant que le premier, avec 14400 litres par heure. Ses émissions de CO<sub>2</sub> sont donc encore plus conséquentes. Ce type d'appareil est particulièrement polluant et son utilisation devrait être limitée autant que possible dans une optique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. (Voir la figure 8 en annexe)

#### 5.3.3 Airbus A320 (Fuel Consumption : 2100 litres par heure)

Le troisième type d'avion se distingue par sa faible consommation de carburant, avec seulement 2100 litres par heure. C'est le plus économique et le plus écologique des 4 types d'appareils inclus dans notre simulation. Privilégier l'utilisation de ce type d'avion permettrait de réduire significativement les émissions de CO<sub>2</sub> liées au trafic aérien. (Voir la figure 9 en annexe)

#### 5.3.4 Custom (Fuel Consumption : custom-fuel-consumption)

Le quatrième type d'avion présente une particularité intéressante : sa consommation de carburant est personnalisable grâce au paramètre *custom-fuel-consumption*. Cela permet de simuler différents scénarios et d'étudier l'impact de différents niveaux de consommation sur les émissions globales. En ajustant ce paramètre, on peut représenter des avions plus ou moins performants sur le plan environnemental et évaluer les bénéfices potentiels liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique des aéronefs. (Voir la figure 10 en annexe)

#### 5.3.5 Comparaison globale et perspectives d'amélioration

La comparaison des 4 types d'avions met en évidence des écarts significatifs en termes de consommation de carburant et d'émissions de CO<sub>2</sub>. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques de consommation de carburant des différents types d'avions.

Type d'avion	Consommation de carburant par litres par heure
Airbus A380	11400
Boeing 707	14400
Airbus A320	2100
Custom	custom-fuel-consumption

TABLE 1 – Comparaison de la consommation de carburant des différents types d'avions

Le Airbus A320 apparaît comme le plus performant sur le plan environnemental, tandis que les types 1 et 2 sont particulièrement polluants. Cependant, il faut également souligner que certains modèles d'avions, étant plus anciens, émettent davantage de pollution. Par ailleurs, les avions ayant une plus grande capacité de passagers sont plus lourds et consomment plus de carburant, ce qui augmente leur impact environnemental. On ne peut donc pas conclure quel type d'avion pollue le plus en se basant uniquement sur la consommation de carburant. Ces résultats soulignent l'importance de développer et de déployer des technologies plus économes en carburant pour réduire l'impact du trafic aérien sur le climat. Les constructeurs aéronautiques et les compagnies aériennes ont un rôle crucial à jouer dans cette transition vers une aviation plus durable.

Cette analyse de sensibilité met en lumière les principaux facteurs qui influencent les émissions de gaz à effet de serre dans notre simulation du trafic aérien. Le choix des villes, le temps d'attente au sol et les caractéristiques de consommation des différents types d'avions sont autant de leviers sur lesquels il est possible d'agir pour réduire l'impact environnemental de ce mode de transport. Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles pistes de recherche et d'optimisation pour construire un système de transport aérien plus durable et respectueux de l'environnement.

## 6 Perspectives

Dans cette section, nous aborderons les axes d'amélioration potentiels de notre modèle de simulation, en prenant en compte les limitations actuelles et les possibilités d'extension future.

### 6.1 Réalisme de la simulation

Le réalisme de notre simulation pourrait être significativement amélioré. Actuellement, les types d'avions utilisés dans notre modèle ne sont pas représentatifs des trajets courts pour lesquels ils sont simulés. Par exemple, un Boeing 747 ou un Airbus A380, bien qu'ils soient des avions couramment utilisés mondialement, sont rarement utilisés pour des vols domestiques courts comme Paris-Lyon. Ces avions sont principalement employés pour des vols long-courriers intercontinentaux. Cependant, nous avons choisi ces types d'avions pour notre simulation car ils sont parmi les plus utilisés mondialement, ce qui permet de mieux illustrer l'impact global des vols aériens sur l'environnement.

### 6.2 Extension de la carte géographique

Une autre perspective d'amélioration serait d'élargir la carte utilisée dans notre simulation pour couvrir le monde entier. Actuellement, notre simulation se limite à la France, ce qui restreint l'analyse des flux aériens à une échelle nationale. En intégrant une carte mondiale, nous pourrions simuler des trajets plus réalistes et variés, y compris les vols long-courriers entre différents continents. Cela permettrait d'avoir une vision plus globale et précise des émissions de CO<sub>2</sub> générées par le transport aérien.

### 6.3 Trajets plus réalistes et diversifiés

Pour rendre les trajets simulés plus réalistes, il serait bénéfique d'associer chaque type d'avion à des trajets adaptés à leurs usages réels. Par exemple, utiliser des avions de petite capacité pour les trajets courts et des avions de grande capacité pour les vols long-courriers. De plus, nous pourrions inclure une variété de modèles d'avions, chacun avec des caractéristiques spécifiques en termes de consommation de carburant et d'émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui rendrait la simulation plus fidèle à la réalité.

## 6.4 Incorporation de nouveaux facteurs

Actuellement, notre modèle de simulation se base principalement sur la consommation de carburant pour estimer les émissions de CO<sub>2</sub>. Pour améliorer la précision de notre simulation, il serait pertinent d'incorporer d'autres facteurs mentionnés dans notre rapport, tels que :

- Le type de carburant utilisé, en tenant compte des variations entre le kérosène traditionnel et les carburants plus écologiques.
- Le nombre de passagers et la classe de voyage, qui influencent directement les émissions par passager.
- La charge utile et le poids total de l'avion, qui affectent la consommation de carburant.
- Les conditions météorologiques, qui peuvent modifier la consommation de carburant et les temps de vol.

## 6.5 Optimisation des vols et des routes aériennes

Enfin, une perspective intéressante serait de simuler des stratégies d'optimisation des vols et des routes aériennes pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Par exemple, en simulant des trajets directs plutôt que des vols avec escales multiples, ou en utilisant des technologies de gestion de l'espace aérien pour minimiser les temps d'attente et les détours.

En conclusion, bien que notre modèle actuel offre une bonne base pour comprendre l'impact environnemental des flux aériens, il existe de nombreuses perspectives d'amélioration qui permettraient d'augmenter la précision et le réalisme de la simulation. En intégrant ces éléments, nous pourrions fournir des analyses encore plus pertinentes et utiles pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur du transport aérien.

## 7 Comparaison avec d'autres moyens de transports

Mode de Transport	Émissions de CO <sub>2</sub>	Durée (Paris-Marseille)	Coût	Capacité
Avion (A320)	133	1h 20min	150-300€	150
Train (TGV)	14	3h	50-100€	500
Voiture	130	7h	50-100€ (essence)	4

TABLE 2 – Table de comparaison entre moyen de transport sachant que émissions de CO<sub>2</sub> est en kg/km/personne)

Bien que plus rapide, l'avion émet nettement plus de CO<sub>2</sub> que les autres options, même pour des distances relativement courtes. Le train apparaît comme le moyen de transport le plus écologique et économique pour ce type de trajet.

## 8 Conclusion

En conclusion, cette étude a mis en lumière les divers facteurs influençant les émissions de CO<sub>2</sub> dans le trafic aérien et a démontré l'utilité des simulations multi-agents pour évaluer et potentiellement réduire l'impact environnemental des vols. Notre modèle, basé sur NetLogo, a permis de simuler des scénarios variés et d'analyser les émissions en fonction de paramètres tels que le type d'avion, la consommation de carburant, les distances parcourues et le temps passé au sol.

Les résultats de cette simulation révèlent clairement que le type d'avion et la distance des trajets sont des éléments déterminants pour les émissions de CO<sub>2</sub>. En particulier, l'utilisation d'avions plus économes en carburant, comme le Airbus A320 de notre modèle, peut significativement réduire l'empreinte carbone des vols. De plus, l'optimisation des opérations au sol et une gestion efficace des flux aériens peuvent également contribuer à cette réduction.

Les implications de cette recherche sont vastes. D'une part, elle souligne la nécessité pour les compagnies aériennes et les constructeurs d'investir dans des technologies plus durables et des avions moins polluants. D'autre part, elle met en avant l'importance de politiques publiques favorisant des pratiques de vol plus écologiques, telles que la promotion de vols directs pour minimiser les distances parcourues et l'amélioration des infrastructures au sol pour réduire les temps d'attente.

Envisager des perspectives d'amélioration telles que l'intégration de cartes géographiques mondiales, l'utilisation de trajets plus réalistes et diversifiés, et l'incorporation de données en temps réel pourrait rendre la simulation encore plus pertinente et précise. Cela permettrait d'obtenir des insights plus complets et de proposer des solutions concrètes pour une aviation plus respectueuse de l'environnement.

En somme, cette étude propose une base solide pour la modélisation et l'analyse de l'impact environnemental des flux aériens. Elle ouvre la voie à des recherches futures qui pourraient approfondir ces premiers résultats et contribuer à l'élaboration de stratégies efficaces pour atténuer les effets néfastes du transport aérien sur notre planète. Avec la volonté collective des acteurs de l'aviation et des décideurs politiques, il est possible de concilier mobilité aérienne et durabilité écologique.

## 9 Ressources

### ÉVOLUTION DU TRAFIC DE TRANSPORT AÉRIEN INTÉRIEUR

Nombre de voyages par classe de distance et part modale en 2008 et 2019

Nombre de vols par personne

Présentation

10 Annexe

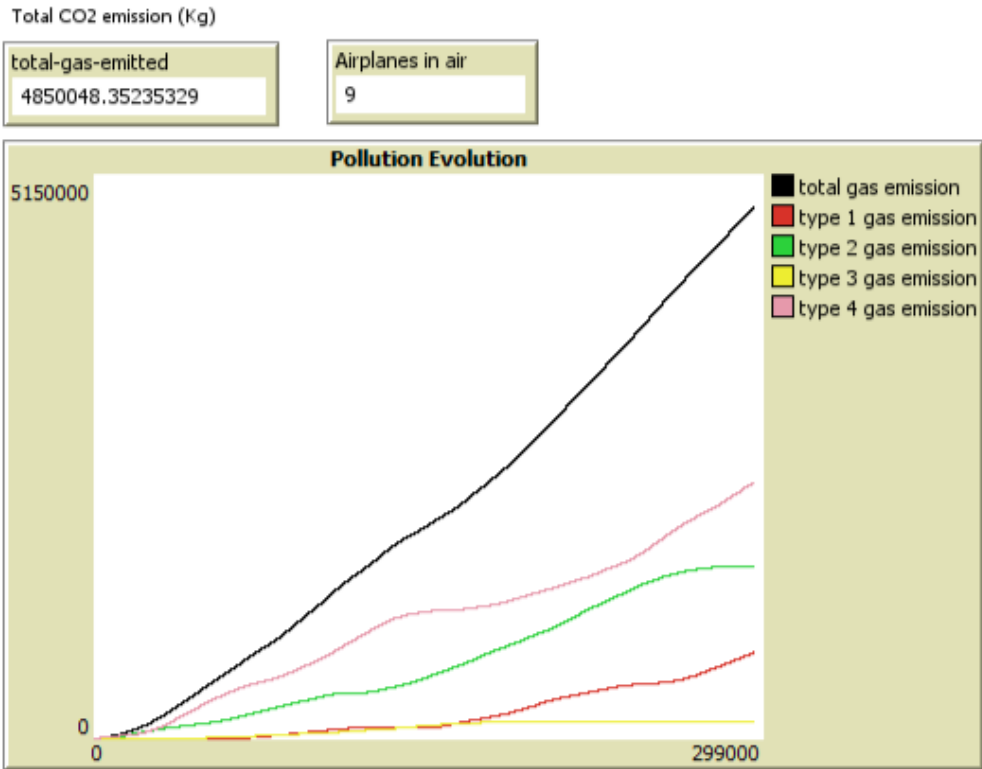


FIGURE 2 – Impact du choix de Paris-Marseille sur les niveaux de pollution.

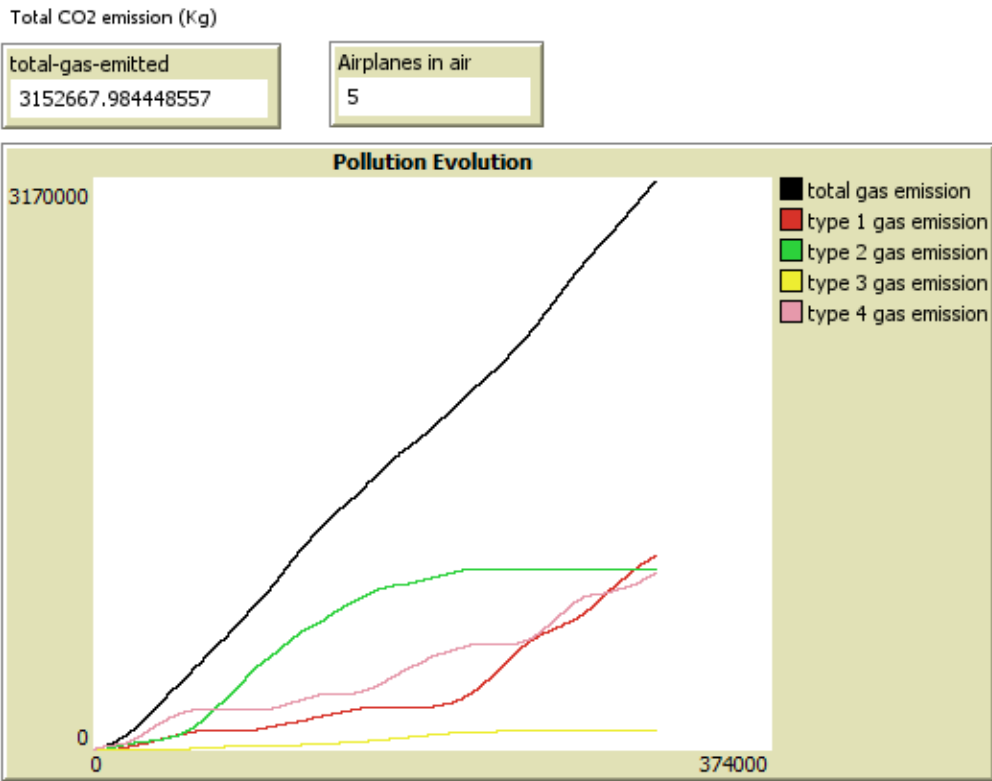


FIGURE 3 – Impact du choix de Paris-Lyon sur les niveaux de pollution.

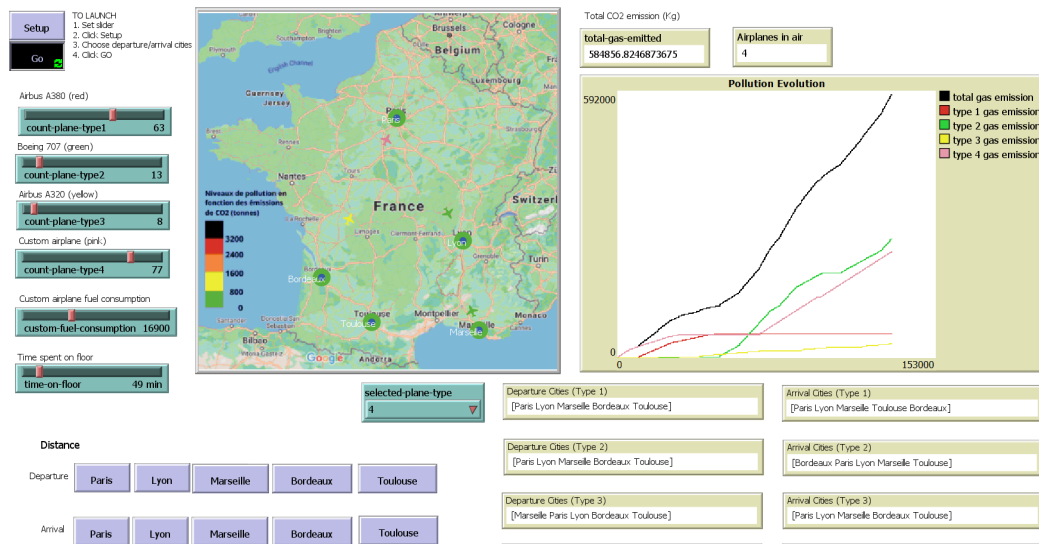


FIGURE 4 – Plusieurs villes sélectionnées

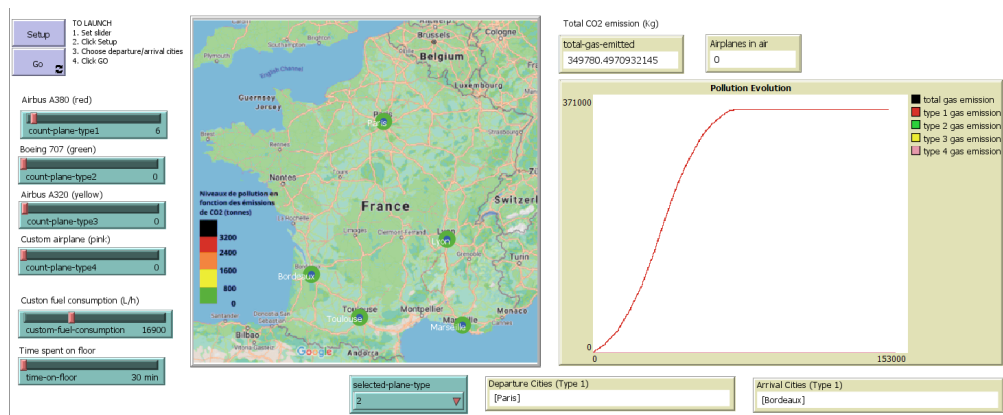


FIGURE 5 – Impact du temps au sol de 30 minutes sur les niveaux de pollution.

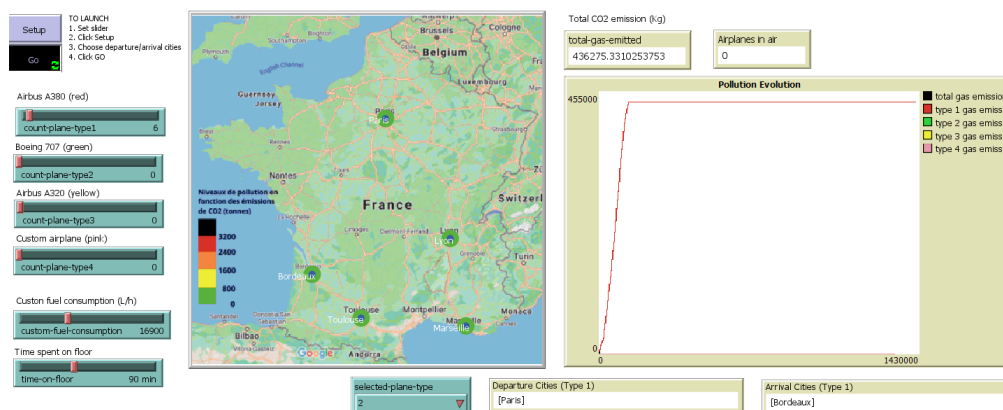


FIGURE 6 – Impact du temps au sol de 90 minutes sur les niveaux de pollution.



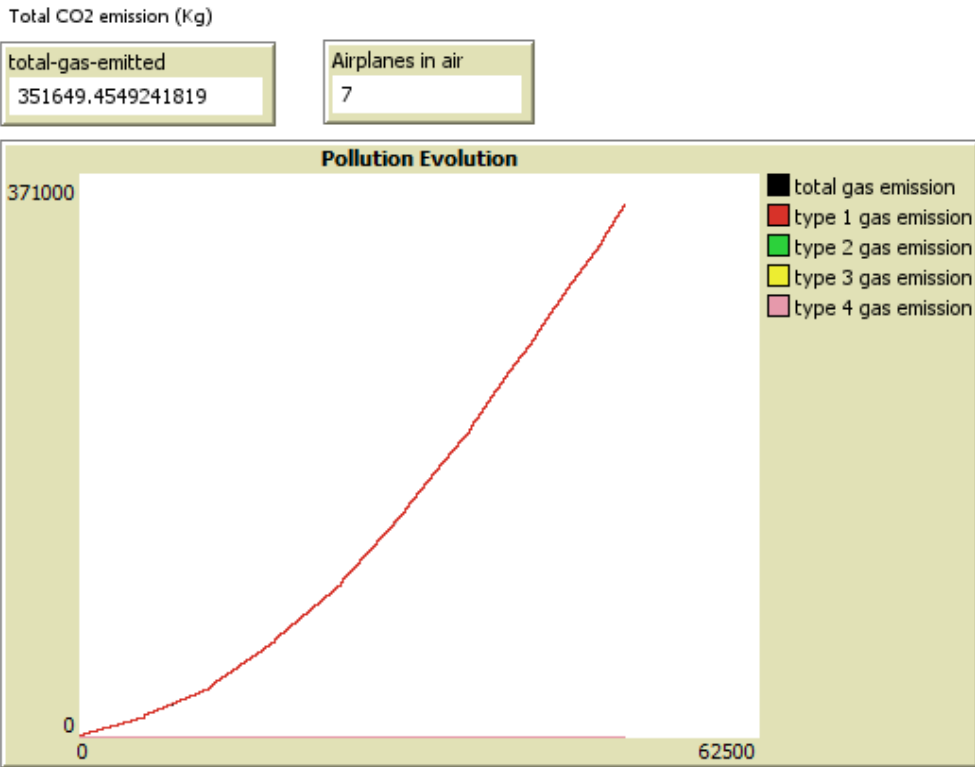


FIGURE 7 – Impact de l’Airbus A380 sur les niveaux de pollution (Paris-Bordeaux)

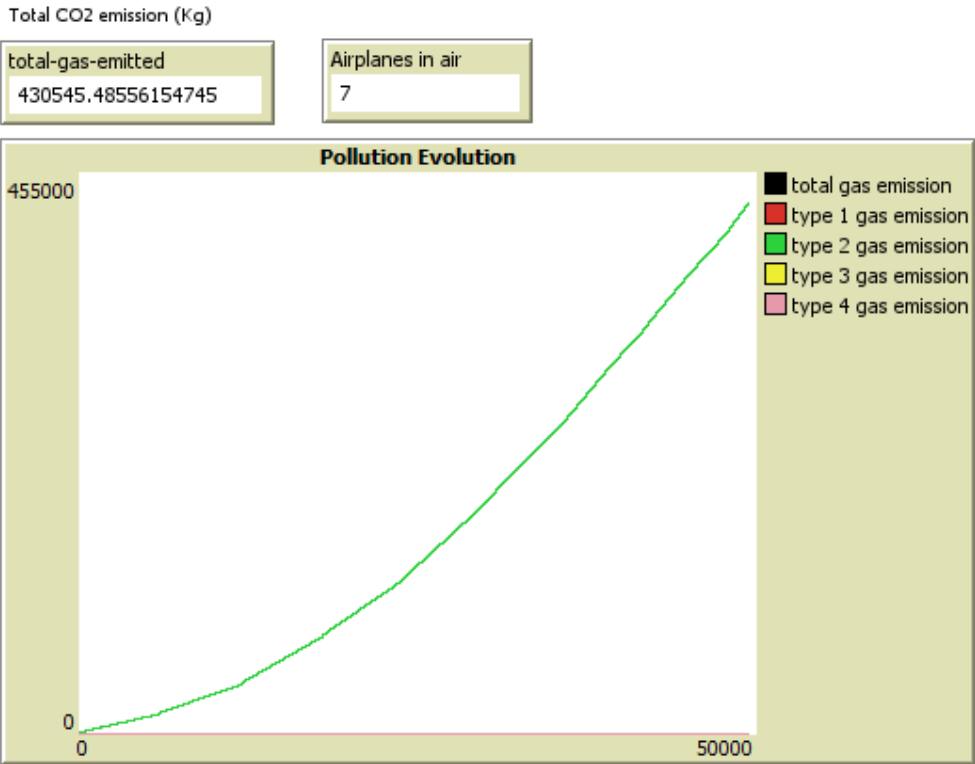


FIGURE 8 – Impact du Boeing 707 sur les niveaux de pollution (Paris-Bordeaux)

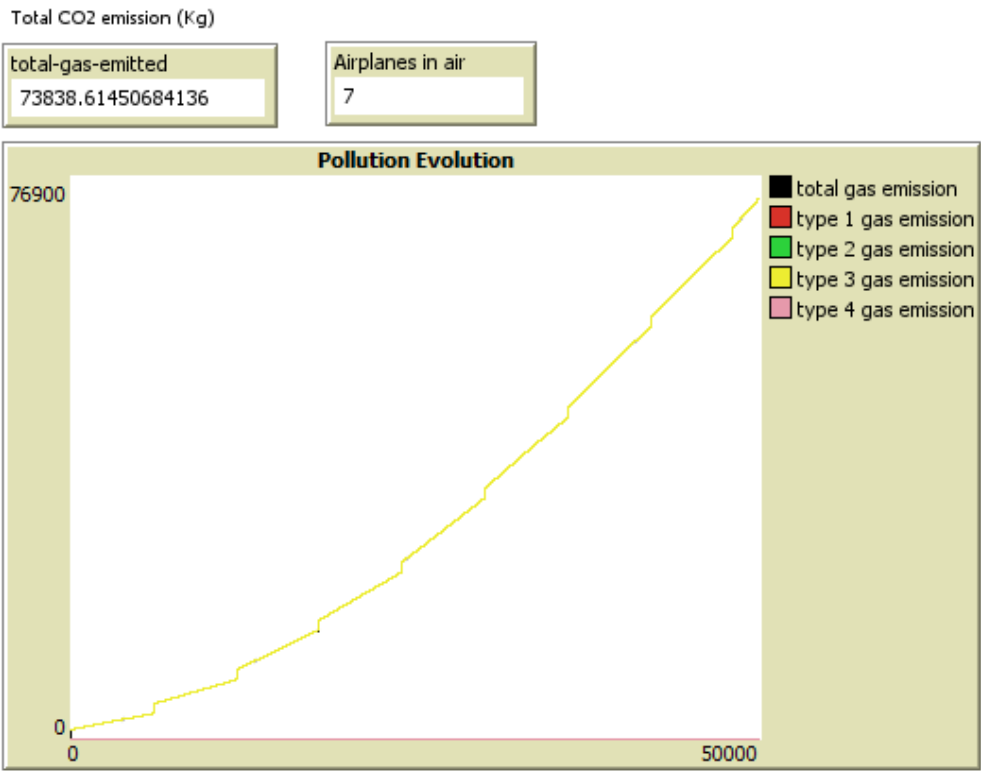


FIGURE 9 – Impact de l’Airbus A320 sur les niveaux de pollution (Paris-Bordeaux)

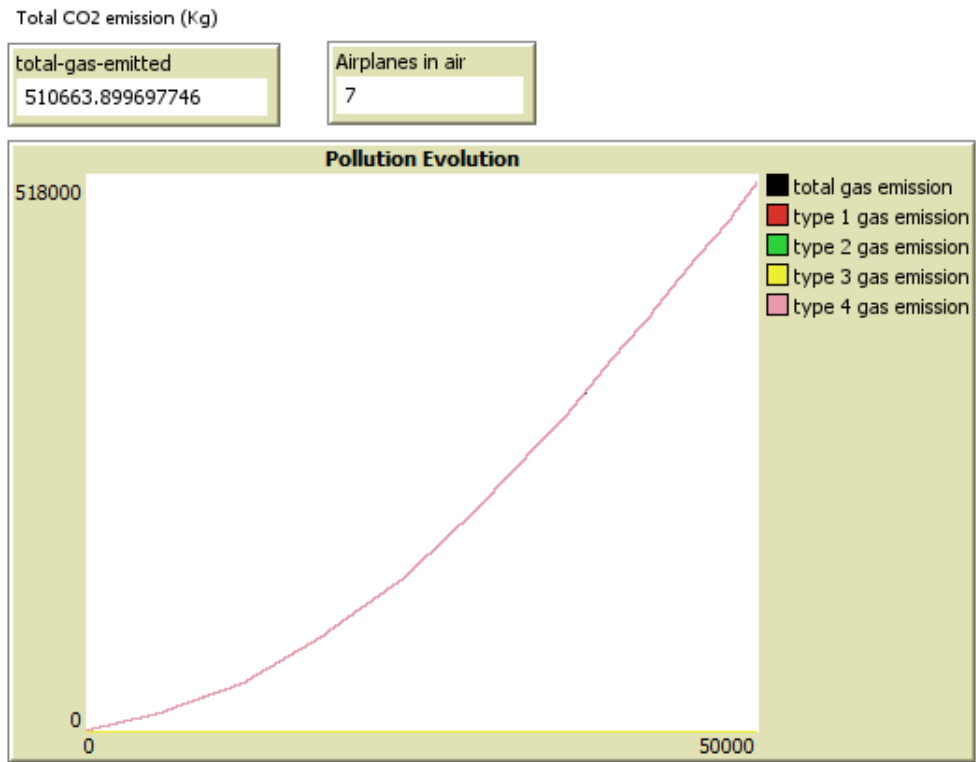


FIGURE 10 – Impact de l’avion personnalisé sur les niveaux de pollution avec un consommation de fuel de 16900 L/h (Paris-Bordeaux)