



Vitesse des véhicules et émissions de CO2

par Sara Bisbe (1), Damien Raffanel (2) et Bernard Beauzamy (2)

(1) *Elève à l'Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris, Département Informatique et Technologies Urbaines, en stage à la SCM*

(2) *Société de Calcul Mathématique SA*

Août 2013

Résumé

Les émissions de CO2 dues aux véhicules particuliers (et, plus généralement, aux transports) sont devenues une préoccupation pour de nombreuses municipalités ; le remède proposé passe souvent par une réduction de la vitesse autorisée. Cette façon de voir est en apparence légitime : moins un moteur tourne vite, moins il consomme de carburant et donc moins il émet de CO2.

Mais, en réalité, elle recèle une faute de logique : si les véhicules vont moins vite, ils restent plus longtemps dans chaque artère. Or ce sont les émissions par artère qui intéressent les riverains et la municipalité ; elles ne diminuent nullement avec la vitesse. Nous prenons ici l'exemple de la Voie Georges Pompidou à Paris : à 50 km/h, pour un trafic régulier, les émissions sont de l'ordre de 7,2 tonnes de CO2 par heure ; à 40 km/h, elles seraient de 8 tonnes de CO2 par heure : *cette réduction de vitesse se traduit, pour une artère donnée, par une augmentation de plus de 10 % des émissions.*

Le présent travail utilise la version 2 d'un logiciel développé en collaboration avec l'Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris, Département Informatique et Technologies Urbaines (version 1 : Toubiana-Vanhée, en 2012, version 2 : Bisbe-Lopez, en 2013). Les hypothèses de modèle sont standard et sont présentées en Annexe.

L'objectif de cette collaboration est de se doter d'outils d'aide à la décision pour la gestion des transports.

English summary

Reducing CO₂ emissions from cars (and more generally from traffic) has become a major concern for most cities; it is widely thought that such a reduction will be obtained by limitations of speed. This, at first sight, looks reasonable: the slower the rotation of the engine is, the smaller the emissions are. But, in fact, there is a logical mistake. What should be taken into account is the total emissions in a given street: this is the concern of the residents and of the city. And, if the cars move more slowly, they stay longer in a given street.

We take here the example of the "Voie Georges Pompidou" in Paris (13 km long, near the river Seine): at 50 km/h, for a regular traffic, the CO₂ emissions are 7.2 tons per hour; at 40 km/h, they would be 8 tons per hour. *Such a limitation of the speed induces, for this street, an increase by more than 10% of the emissions.*

The present work uses a software developed jointly with the "Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris, Département Informatique et Technologies Urbaines" (version 1 : Toubiana-Vanhée, 2012 ; version 2 : Bisbe-Lopez, 2013). The assumptions of the model are standard and are given in the Annex below. The collaboration with EIVP aims at creating robust decision tools for the management of transportation.

Resumen en español

Las emisiones de CO₂ de los vehículos particulares han llegado a ser una gran preocupación en muchos municipios. La solución propuesta se basa frecuentemente en una reducción de la velocidad permitida. El razonamiento planteado es aparentemente legítimo: a menor velocidad de rotación del motor, menor será el consumo de carburante y, por lo tanto, menores serán también las emisiones de CO₂.

Pero, en realidad, este enfoque del problema conlleva un error de lógica. Las unidades apropiadas para estudiar el impacto sobre los ciudadanos y el municipio son las emisiones por arteria, es decir, por unidad de longitud. Si los vehículos van más lentos, permanecen más tiempo en cada arteria. En este contexto, la relación entre las emisiones y la velocidad no es tan evidente.

Consideramos el ejemplo de la "Voie Georges Pompidou" en París (es una vía rápida de 13 km de longitud a lo largo del Sena) : a 50 km/h, con un tráfico regular, las emisiones de CO₂ son del orden de 7.2 toneladas por hora ; a 40 km/h, serían de 8 toneladas por hora. *Esta reducción de la velocidad se traduce, para una arteria dada, en un aumento de más del 10% de las emisiones.*

El presente documento utiliza la versión 2 de un programa desarrollado en colaboración con l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Département Informatique et Technologies Urbaines (versión 1 : Toubiana-Vanhée en 2012, versión 2 : Bisbe-López, en 2013). Las hipótesis del modelo son estándar y son presentadas en el Anejo.

El objetivo de esta colaboración es crear herramientas robustas de decisión para la gestión de los transportes.

I. Introduction

Nous analysons l'influence de la vitesse des véhicules sur les émissions de CO₂ à l'échelle d'une artère urbaine : la voie Georges Pompidou à Paris. La longueur de cette voie est d'environ 13 km et elle comporte deux voies de circulation (dans le même sens). On ne tient pas compte des feux rouges récemment installés et on suppose que le trafic a une intensité maximale, à vitesse constante. Ces conditions ne sont pas toujours réalisées, mais l'approche ainsi définie a une valeur d'analyse suffisante.

Le logiciel (dont le modèle de base est décrit en Annexe) admet pour variable d'entrée la vitesse sur l'artère (vitesse supposée constante tout au long de l'artère). Il en déduit, par des formules mathématiques appropriées, l'état du trafic, c'est-à-dire la distance entre véhicules et le nombre de véhicules dans l'artère, par unité de temps (ici par heure).

II. Données de base

A. Emissions de CO₂

Les émissions de CO₂ par type de véhicule sont données dans le tableau ci-dessous :

Vitesse	g CO ₂ /km deux roues	g CO ₂ /km quatre roues essence	g CO ₂ /km quatre roues diesel	g CO ₂ /km poids lourds
40 km/h	90,0	187,5	153,5	861,3
50 km/h	85,0	173,1	140,7	789,1

Tableau 1 : Valeurs à 40 et 50 km/h des grammes de CO₂ émis par un véhicule d'un type par kilomètre

Source : SETRA, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, des Transports et du Logement.

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0958w_NI_EEC_92_Emissions.pdf

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chiffres-cles-du-transport-Edition.27305.html>

B. Composition du parc automobile

Nous considérerons deux situations :

- Uniquement des véhicules légers, avec la répartition suivante : 40% de moteurs à essence et 60% de diesel ;
- Un parc automobile représentatif des valeurs actuelles de Paris : 23% de deux roues, 28% de quatre roues essence, 42% de quatre roues diesel et 7% de poids lourds.

Source : Mairie de Paris, Ministère de l'Economie et des Finances

<http://www.paris.fr/viewmultimediacdocument?multimediacdocument-id=12305>

<http://www.economie.gouv.fr/files/rapport-prix-marges-consommation-carburants.pdf>

C. Distance entre véhicules

On suppose que la distance entre véhicules obéit à des formules empiriques, qui sont détaillées en Annexe (A.1.1) ; compte-tenu de la vitesse, elle vaut 21 m à 40 km/h et 28 m à 50 km/h.

III. Les calculs

Les émissions de CO₂ sont fonction croissante de la vitesse (puisque le moteur tourne plus vite), mais le temps mis pour parcourir un km est une fonction décroissante de la vitesse. Il en résulte que la quantité de CO₂ émise pour chaque km parcouru est une fonction parabolique de la vitesse. Voici le graphe, pour chaque type de véhicule :

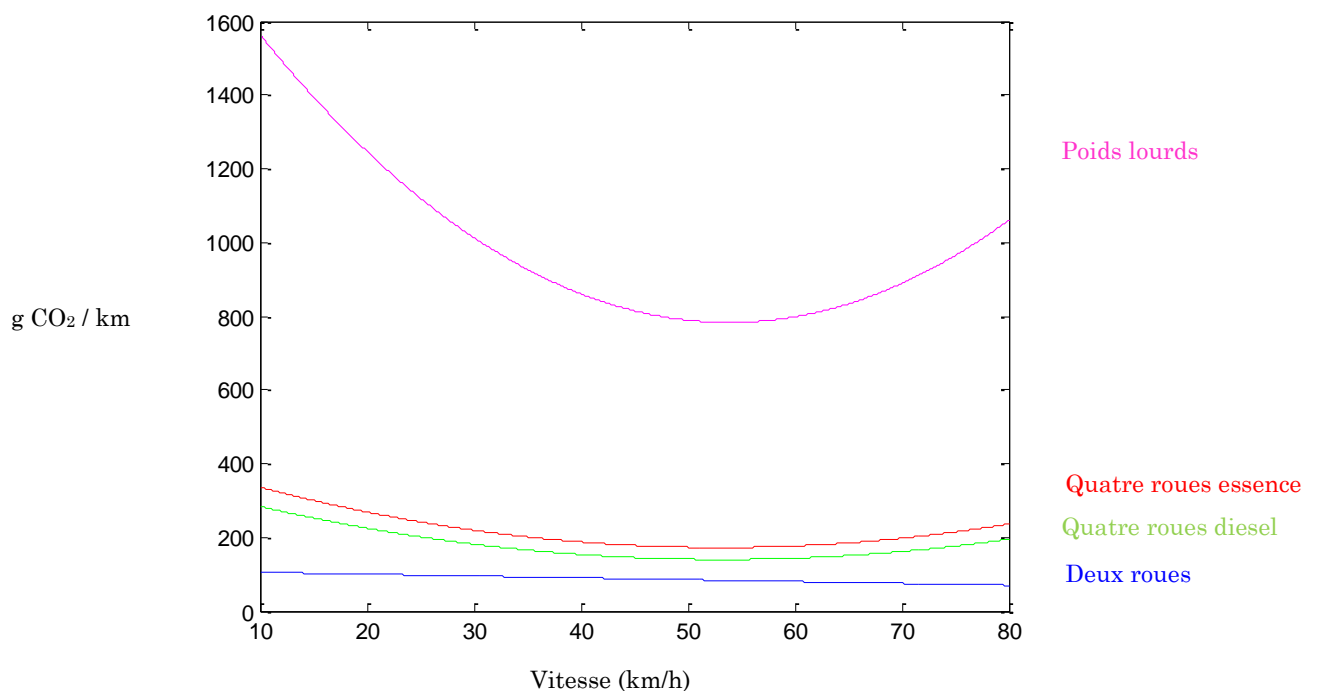


Figure 1 : Grammes de CO₂ émis par un véhicule d'un type par kilomètre parcouru

Les formules reliant la vitesse et les émissions par véhicule sont données en Annexe (voir A.1.4).

IV. Résultats

Nous réalisons deux simulations, à 40 et 50 km/h, en prenant les deux hypothèses ci-dessus pour la distribution du parc automobile.

1. Premier parc automobile : véhicules légers seulement

A 40 km/h, le trafic maximal, par heure, est de 612 quatre roues essence et 919 quatre roues diesel. Il en résulte des émissions de 511,6 kg de CO₂ par heure et par km.

A 50 km/h, le trafic maximal, par heure, est de 606 quatre roues essence et 909 quatre roues diesel. Il en résulte des émissions de 465,6 kg de CO₂ par heure et par km.

Une réduction de vitesse, de 50 km/h à 40 km/h, se traduirait donc par une augmentation des émissions de 10%.

Voici le graphe des émissions de CO₂ par heure et par km, en fonction de la vitesse, pour un parc automobile composé de voitures seulement :

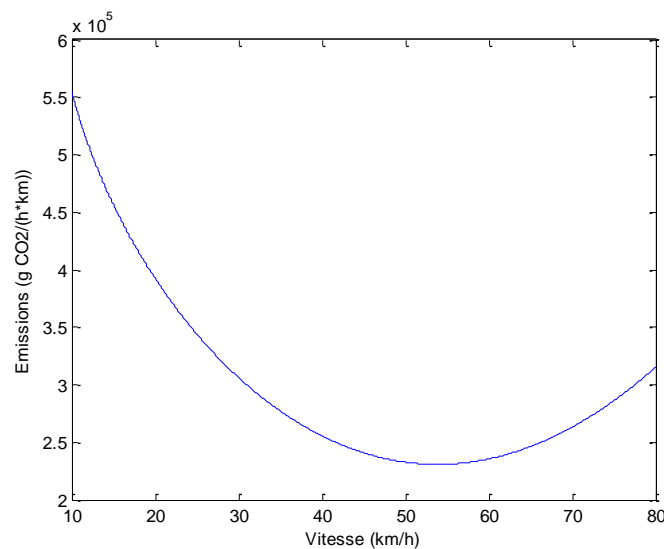


Figure 2 : Graphe des émissions de CO₂ en fonction de la vitesse dans le cas des voitures seules

Avec les hypothèses faites ici, on trouve un minimum aux environs de 54 km/h ; au-delà de cette vitesse, les émissions vont augmenter.

2. Deuxième parc automobile : valeurs actuelles dans Paris

Avec le parc automobile tel qu'il est actuellement dans Paris, incluant deux roues et poids lourds, les résultats sont les suivants :

A 40 km/h, le trafic maximal est composé, par heure, de 354 deux roues, 430 quatre roues essence, 646 quatre roues diesel et 108 poids lourds. Il en résulte des émissions de CO₂ de 609 kg de CO₂ par heure et par km.

A 50 km/h, le trafic maximal est composé, par heure, de 350 deux roues, 426 quatre roues essence, 638 quatre roues diesel et 106 poids lourds. Il en résulte des émissions de CO₂ de 554 kg par heure et par km.

Une réduction de vitesse, de 50 km/h à 40 km/h, se traduit donc, pour ce parc automobile, par une augmentation des émissions de 9,9%, pratiquement identique à la précédente.

Voici le graphe des émissions de CO₂ par heure et par km, en fonction de la vitesse, pour un parc automobile représentatif du parc parisien :

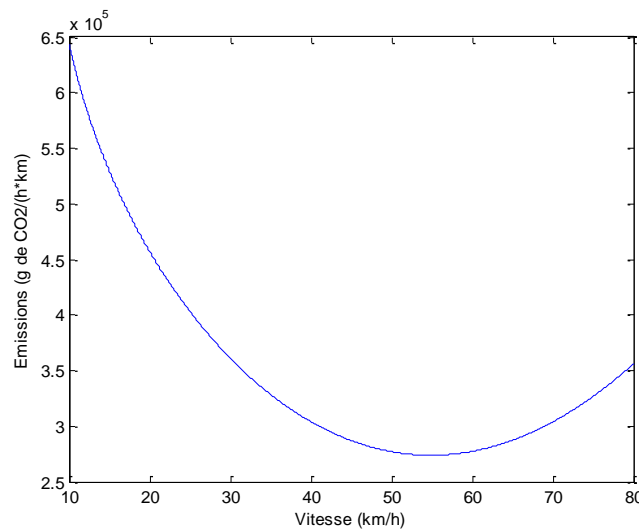


Figure 3 : Graphe des émissions de CO₂ en fonction de la vitesse pour le parc automobile de Paris

La fonction résultante des émissions en fonction de la vitesse est également parabolique : les émissions sont décroissantes jusqu'à 55 km/h et croissent au-delà.

De manière paradoxale, une proportion de poids lourds plus grande implique une vitesse optimale plus élevée. En effet, les grammes de CO₂ par km d'un poids lourd ont leur minimum à une vitesse plus grande que les quatre roues essence et diesel.

V. Références

[1] SETRA

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0958w_NI_EEC_92_Emissions.pdf

[2] Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, des Transports et du Logement
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chiffres-cles-du-transport-Edition.27305.html>

[3] Mairie de Paris

<http://www.paris.fr/viewmultimediacdocument?multimediacdocument-id=12305>

[4] Ministère de l'Économie et des Finances <http://www.economie.gouv.fr/files/rapport-prix-marges-consommation-carburants.pdf>

VI. Annexe

Nous donnons ici les formules et hypothèses utilisées par le logiciel de calcul d'émissions de CO₂ (Toubiana-Vanhée, version 1 ; Bisbe-Lopez, version 2).

1. Calcul de la distance de séparation entre véhicules

Il existe plusieurs modèles de calcul de distances de séparation entre véhicules. Ici, afin de simplifier le problème, nous considérons que tous les véhicules vont à la même vitesse et que celle-ci est constante sur toute l'artère. La distance de séparation entre véhicules est donc également constante.

Soient deux véhicules n et $n+1$ parcourant l'artère. La distance de séparation entre véhicules circulant en mouvement uniforme est :

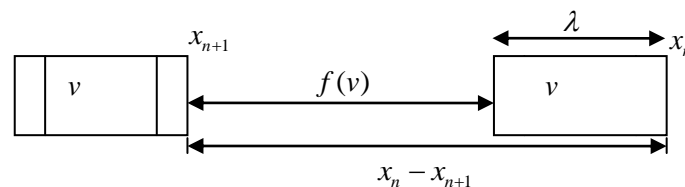


Figure 1 : Distance entre véhicules en mouvement uniforme.

On a la formule :

$$d = x_n - x_{n+1} = f(v) + \lambda \quad (1)$$

où l'on note :

d : distance entre les parties frontales de deux véhicules consécutifs

x_n : position du n -ème véhicule

x_{n+1} : position du $n + 1$ -ème véhicule

$f(v)$: espace entre véhicules, fonction dépendante de la vitesse

v : vitesse des véhicules

λ : longueur moyenne des véhicules.

On pondère la longueur moyenne de chaque type de véhicule par le pourcentage de ce type dans le parc automobile.

$$\lambda = \%_{\text{deux roues}} \times \lambda_{\text{deux roues}} + \%_{\text{quatre roues}} \times \lambda_{\text{quatre roues}} + \%_{\text{poids lourds}} \times \lambda_{\text{poids lourds}}$$

Les longueurs moyennes des véhicules sont considérées comme constantes et leurs valeurs sont les suivantes :

Longueur moyenne des deux roues	1,5 m
Longueur moyenne des quatre roues	5 m
Longueur moyenne des poids lourds	15 m

Tableau 1: Longueurs moyennes des véhicules

On suppose une relation affine entre la distance entre véhicules $f(v)$ et la vitesse, du fait de l'hypothèse de mouvement uniforme.

Les coefficients de la fonction affine $f(v)$ sont obtenus à partir des deux valeurs empiriques plausibles : l'espace entre véhicules à une vitesse de 10 km/h est de 0.5 m et à 50 km/h elle est de 28 m.

A partir de la formule $f(v) = a \cdot v + b$ et des données $f(10) = 0.5 \text{ m}$, $f(50) = 28 \text{ m}$, on obtient :

$$a = 0.6875 ; b = -6.375$$

Il en résulte :

$$d = a \cdot v + b + \lambda = 0.6875 \cdot v - 6.375 + \lambda \quad (2)$$

Cette formule est valable seulement pour des valeurs de la vitesse entre 10 et 50 km/h.

2. Calcul du nombre de véhicules par heure

Le nombre de véhicules par heure (appelé aussi "intensité de l'artère") est :

$$\text{Intensité (véh / h)} = \text{Densité (véh / km)} \times \text{Vitesse (km / h)}$$

Une fois la vitesse définie, nous calculons la densité. Elle est l'inverse de la distance de séparation :

$$\text{Densité} = \frac{1}{\text{Distance de séparation}} = \frac{1}{f(v) + \lambda} = \frac{1}{a \cdot v + b + \lambda}$$

L'intensité peut alors s'exprimer comme suit:

$$I(\text{véh / h}) = D(\text{véh / km}) \times V(\text{km / h}) = \frac{1}{a \cdot v + b + \lambda} \cdot v = \frac{1}{a + \frac{(b + \lambda)}{v}} = \frac{1}{0.6875 + \frac{(\lambda - 6.375)}{v}} \quad (3)$$

3. Calcul du nombre de véhicules de chaque type par heure

On multiplie l'intensité totale de l'artère par la proportion de chaque type de véhicule :

$$\begin{aligned} \text{Intensité}_{\text{Deux Roues}} &= \text{Intensité} \times \%_{\text{Deux Roues}} \\ \text{Intensité}_{\text{Quatre Roues Essence}} &= \text{Intensité} \times \%_{\text{Quatre Roues Essence}} \\ \text{Intensité}_{\text{Quatre Roues Diesel}} &= \text{Intensité} \times \%_{\text{Quatre Roues Diesel}} \\ \text{Intensité}_{\text{Poids Lourds}} &= \text{Intensité} \times \%_{\text{Poids Lourds}} \end{aligned}$$

4. Calcul des grammes de CO₂ par km émis par les véhicules de chaque type

Pour les véhicules à quatre roues, à partir des valeurs de la vitesse et des émissions de CO₂ par km, nous utilisons un ajustement quadratique $y = ax^2 + bx + c$ pour les émissions. Le coefficient de corrélation est toujours supérieur à 98 %.

En revanche, en ce qui concerne les deux roues, on ne dispose pas de données suffisamment précises pour effectuer un ajustement quadratique. On se contente d'un ajustement linéaire plus grossier.

Voici les expressions obtenues :

$$\begin{aligned} \frac{\text{g de CO}_2}{\text{km}}_{\text{Deux Roues}} &= -0.5 \cdot v + 110 \\ \frac{\text{g de CO}_2}{\text{km}}_{\text{Quatre Roues Essence}} &= 0.0882 \cdot v^2 - 9.3756 \cdot v + 421.41 \\ \frac{\text{g de CO}_2}{\text{km}}_{\text{Quatre Roues Diesel}} &= 0.0769 \cdot v^2 - 8.2006 \cdot v + 358.45 \\ \frac{\text{g de CO}_2}{\text{km}}_{\text{Poids Lourds}} &= 0.4055 \cdot v^2 - 43.719 \cdot v + 1961.3 \end{aligned}$$

5. Calcul des émissions totales en grammes de CO₂ par km et par heure

Pour obtenir les grammes de CO₂ par heure et par km émis par chaque véhicule, on multiplie :

$$\frac{\text{g de CO}_2}{h \cdot \text{km}}_{\text{véhicule type } i} = \frac{\text{g de CO}_2}{\text{km}}_{\text{véhicule type } i} \cdot \frac{\text{Nombre de véhicules de type } i}{h}$$

On obtient alors les émissions totales comme la somme des grammes de CO₂ par heure et par km pour chaque véhicule :

$$\frac{\text{g de CO}_2}{h \cdot \text{km}}_{\text{TOTALES}} = \sum \frac{\text{g de CO}_2}{h \cdot \text{km}}_{\text{véhicule } i}$$

6. Calcul des grammes totaux de CO₂ par heure

On multiplie le résultat précédent par la longueur de l'artère, obtenant ainsi les grammes de CO₂ par heure émis sur la totalité de l'artère :

$$\frac{\text{g de CO}_2}{h}_{\text{TOTALES}} = \frac{\text{g de CO}_2}{h \cdot \text{km}}_{\text{TOTALES}} \cdot L \text{ (km)}$$