



**Modélisation de la pollution de l'air générée par une  
source linéaire  
Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casablanca**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
MASTER  
SPECIALITE GENIE CIVIL – BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS**

Présenté et soutenu publiquement le 24 juillet 2025 par

**Aldric MALGOUBRI (20200280)**

**Encadrant 2iE : Dr Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant chercheur à 2iE**

**Maître de stage : Dr Otman AIT IHIA, Enseignant chercheur à l'EMI**

Structure d'accueil du stage : Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Prof. Daniel YAMEGUEU NGUEWO

Membres et correcteurs : Dr Yasmine Binta TRAORÉ  
Dr Seick Omar SORE

**Promotion 2024/2025**

## DEDICACES

---

Je dédie ce mémoire à Dieu Tout-Puissant, source de toute sagesse et de toute connaissance, qui m'a guidé et soutenu tout au long de ce parcours.

À mes parents, dont le soutien constant et l'encouragement ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours académique. Leur amour et leur confiance m'ont permis de surmonter les défis et d'atteindre mes objectifs.

À mes professeurs et mentors, dont les enseignements et les conseils avisés ont été déterminants dans la réalisation de ce travail. Leur expertise et leur dévouement ont grandement enrichi mon apprentissage.

À mes collègues et amis, pour leur soutien moral et leurs précieux échanges intellectuels. Leur présence et leurs encouragements ont été d'une aide inestimable.

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet. Votre soutien et votre confiance m'ont profondément touché.

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement la Direction Générale de l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers son personnel, pour leur soutien institutionnel et leur engagement dans la réussite de notre formation.

Un merci particulier au département Génie Civil de 2iE, sous le leadership de Dr Césaire HEMA, pour leur soutien et leur expertise.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, Dr Philbert NSHIMIYIMANA, dont les conseils avisés et l'accompagnement rigoureux ont été déterminants pour la réussite de ce travail. Son expertise et sa disponibilité ont grandement enrichi mon expérience académique.

Je tiens également à remercier l'ensemble du corps enseignant de 2iE pour leur dévouement et leur engagement envers l'excellence académique. Leur enseignement et leurs conseils ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours.

Un grand merci à mes camarades pour les moments de réflexion, de collaboration et de soutien mutuel. Leur amitié et leur solidarité ont rendu ce parcours plus agréable et enrichissant.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce projet. Votre aide, vos conseils et votre soutien ont été précieux et m'ont permis de mener à bien cette étude.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Leur présence à mes côtés a été une source inestimable de force et de motivation.

## LISTE DES ACRONYMES

---

**$\mu\text{g}/\text{m}^3$**  : microgrammes par mètre cube d'air

**ADM** : Autoroutes Du Maroc

**AQG** : Air Quality Guideline

**Atm** : Atmosphère

**CCNUCC** : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

**Chiffre d'affaires** correspond aux produits des activités ordinaires de vente de biens et services et des activités.

**CO** : Monoxyde de carbone

**COP 22** : 22ème Conférence Des Parties à la convention-cadre des Nations Unis sur le changement climatique

**COV** : Composé Organique Volatil

**CSS** : Cascading Style Sheets

**DH** : Dirhams

**EEA** : Agence Européenne d'Environnement

**EPA** : Agence américaine de Protection de l'Environnement

**ESG** : Environnement, Social et de Gouvernance

**GES** : Gaz à Effets de Serre

**Gg** : Gigagramme

**GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**HTML** : HyperText Markup Language

**$\text{mg}/\text{m}^3$**  : milligramme par mètre cube d'air

**Mkm** : Mégamètre (1 000 000 m)

**MNT** : Maladies Non Transmissibles

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute  
A1, tronçon Rabat-Casa

---

**NH<sub>3</sub>** : Ammoniac

**NO<sub>2</sub>** : Dioxyde d'azote

**NO<sub>x</sub>** : Oxydes d'azote

**O<sub>3</sub>** : Ozone troposphérique

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**PM** : Particules fines

**ppb** : parties par milliard en volume

**ppm** : parties par million en volume

**SO<sub>2</sub>** : Dioxyde de soufre

**T** : Température

**Tamb** : Température ambiante

**UTM 29N** : Universal Transverse Mercator zone 29 (on a 60 zones numérotées de 1 à 60) dans l'hémisphère Nord

## RESUME

---

La pollution de l'air, notamment celle issue du transport routier, représente un défi environnemental majeur, affectant à la fois l'équilibre écologique et la santé humaine. Ce projet explore les impacts des émissions de polluants tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) et les particules fines (PM), en mettant en lumière les facteurs techniques et météorologiques influençant leur dispersion. À travers une méthodologie basée sur la modélisation gaussienne, intégrant des paramètres comme le volume de trafic et les conditions météorologiques, l'étude a été appliquée au cas de l'autoroute A1 reliant Casablanca et Rabat. Un point spécifique, situé aux coordonnées (1000, 100), a été choisi pour représenter un lieu sensible tel qu'une école, un hôpital ou une zone résidentielle, dans le cadre de cette étude. Les résultats ont révélé des concentrations élevées de polluants près des axes routiers, dépassant largement les normes internationales. Par exemple, pour le CO<sub>2</sub>, au point (1000, 100), la concentration observée était de 180 116,86 µg/m<sup>3</sup>, inférieure à la limite journalière recommandée par l'EPA (1 830 280 µg/m<sup>3</sup>). Ces résultats soulignent l'importance de la modélisation pour anticiper les problèmes d'émissions et guider les stratégies de réduction. En conclusion, des mesures telles que la promotion des technologies vertes, l'amélioration des transports en commun et la sensibilisation du public sont essentielles pour atténuer la pollution et favoriser un développement durable. À l'avenir, il sera crucial de renforcer les politiques de régulation des émissions, d'encourager l'adoption de véhicules électriques ou hybrides, et d'optimiser la gestion du trafic, tout en intégrant des technologies avancées comme les capteurs en temps réel.

### **Mots-clés :**

**Pollution atmosphérique**

**Transport routier**

**Trafic**

**Modélisation**

**Émissions.**

## ABSTRACT

---

Air pollution, particularly from road transport, represents a major environmental challenge, affecting both ecological balance and human health. This project explores the impacts of emissions of pollutants such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and fine particles (PM), highlighting the technical and meteorological factors influencing their dispersion. Using a methodology based on Gaussian modeling, integrating parameters such as traffic volume and meteorological conditions, the study was applied to the case of the A1 freeway linking Casablanca and Rabat. A specific point, located at coordinates (1000, 100), was chosen to represent a sensitive location such as a school, hospital or residential area, as part of this study. The results revealed high concentrations of pollutants near major roads, far exceeding international standards. For example, for CO<sub>2</sub>, at point (1000, 100), the observed concentration was 180 116,86 µg/m<sup>3</sup>, which is below the daily limit recommended by the EPA (1 830 280 µg/m<sup>3</sup>). These results underline the importance of modeling to anticipate emission problems and guide abatement strategies. In conclusion, measures such as promoting green technologies, improving public transport and raising public awareness are essential to mitigating pollution and fostering sustainable development. In the future, it will be crucial to strengthen emission regulation policies, encourage the adoption of electric or hybrid vehicles, and optimize traffic management, while integrating advanced technologies such as real-time sensors.

### **Keywords :**

**Air Pollution**

**Road Transportation**

**Traffic**

**Modeling**

**Emissions.**

## TABLE DES MATIERES

---

DEDICACES .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES ACRONYMES.....	iii
RESUME.....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIERES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES ANNEXES .....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	3
1.1. Pollution atmosphérique et polluants .....	3
1.2. Règlementation et limites.....	3
1.2.1. Recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé .....	3
1.2.2. Recommandation de l'Agence américaine de Protection de l'Environnement.....	4
1.3. Modèle de dispersion : types de modèles.....	4
1.4. Modèle de dispersion Gaussien.....	5
1.4.1. Définition .....	5
1.4.2. Avantages.....	6
1.4.3. Paramètres contribuant à la pollution de l'air.....	6
1.4.4. Paramètres de dispersion.....	7
1.4.5. Hypothèses pour une source linéaire.....	7
1.4.6. Formulation mathématique .....	8
1.4.7. Limitations du modèle Gaussien .....	10
1.5. Secteur du Transport au Maroc .....	10
1.5.1. Généralités.....	10
1.5.2. Transport routier.....	10
1.5.3. Développement économique et social.....	11
1.5.4. Enjeux environnementaux.....	12
1.5.5. Impacts sur la santé humaine .....	13
Conclusion partielle.....	14
CHAPITRE 2. METHODOLOGIE .....	15

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute  
A1, tronçon Rabat-Casa

---

2.1. Modèle de Gauss .....	15
2.1.1. Paramètres d'entrée .....	15
2.1.2. Démarche .....	17
2.2. Solution numérique .....	17
2.2.1. Utilisation de SIG (Systèmes d'Information Géographique).....	17
2.2.2. Programmation en Python .....	18
2.2.3. Création d'application web .....	18
2.2.4. Technologies Utilisées.....	19
2.3. Présentation de l'Autoroute A1 .....	19
2.3.1. Présentation des régions concernées .....	19
2.3.2. Longueur du tronçon .....	19
2.3.3. Données météorologiques de la zone .....	19
2.3.4. Taux d'émission de la zone .....	20
2.4. Limite journalière : OMS et EPA .....	21
Conclusion partielle.....	22
CHAPITRE 3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	23
3.1. Application au cas du CO <sub>2</sub> .....	23
3.1.1. Calculs .....	23
3.1.2 Discussion .....	23
3.2. Application au cas du CO .....	24
3.2.1. Calculs .....	24
3.2.2 Discussion .....	24
3.3. Application au cas du NO <sub>x</sub> .....	25
3.3.1. Calculs .....	25
3.3.2 Discussion .....	25
3.4. Application au cas du PM.....	26
3.4.1. Calculs .....	26
3.4.2 Discussion .....	27
3.5. Application au cas du SO <sub>2</sub> .....	27
3.5.1. Calculs .....	27
3.5.2 Discussion .....	28
3.6. Etude de sensibilité en un point : Cas de CO <sub>2</sub> .....	28
3.6.1. Influence de la zone.....	28
3.6.2. Influence de la direction du vent .....	29
3.6.3. Influence de la vitesse du vent .....	30

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute  
A1, tronçon Rabat-Casa

---

3.6.4. Influence de la stabilité de l'atmosphère.....	30
3.6.5. Influence du trafic .....	31
3.7. Solutions.....	32
3.8. Recommandations .....	32
3.8.1. Promotion des transports alternatifs.....	32
3.8.2. Sensibilisation du public .....	33
Conclusion partielle.....	33
CONCLUSION GENERALE .....	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	36
ANNEXE 1 : MODELISATION DE CO2.....	40
Variation de la zone .....	40
Zone rurale .....	40
Variation de la direction du vent .....	41
Direction Nord.....	41
Direction vent NE.....	42
Direction E .....	43
Direction SE .....	43
Direction S.....	44
Direction SO.....	45
Direction O.....	45
Direction NO .....	46
Variation de la vitesse du vent.....	47
V/4.....	47
V/3 .....	47
V/2 .....	48
Vx2 .....	49
Vx3 .....	49
Vx4 .....	50
Variation de la stabilité de l'atmosphère .....	51
Classe A : Très instable .....	51
Classe B : Instable .....	51
Classe C : Peu Instable .....	52
Classe E : Stable.....	53
Classe F : Très stable.....	53
Variation du trafic routier : taux d'émissions .....	54

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute  
A1, tronçon Rabat-Casa

---

T/4 .....	54
T/3 .....	55
T/2 .....	55
Tx2 .....	56
Tx3 .....	57
Tx4 .....	57

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau I : Recommandation de l'OMS [3].....	3
Tableau II : Recommandation de l'EPA [4] .....	4
Tableau III : Chiffre clé sur les autoroutes au Maroc [28] .....	12
Tableau IV : Classe de stabilité de Pasquill-Gifford : Pasquill 1961 .....	15
Tableau V : Classification de la stabilité de Pasquill [15].....	16
Tableau VI : Facteur d'émission.....	16
Tableau VII : Données sur l'autoroute A1 [29].....	20
Tableau VIII : Facteur d'émission par type de véhicule.....	21
Tableau IX Facteur d'émission en considérant le nombre total de véhicule par type .....	21
Tableau X : Taux d'émission par polluant.....	21
Tableau XI : Conversion des recommandations de l'EPA et l'OMS en condition réelle.....	22
Tableau XII Concentration des différents polluants au niveau d'un point d'intérêt (1000,100)28	
Tableau XIII : Sensibilité liée à la zone .....	29
Tableau XIV : Sensibilité liée à la direction du vent.....	29
Tableau XV : Sensibilité liée à la vitesse .....	30
Tableau XVI : Sensibilité liée à la classe de stabilité.....	31
Tableau XVII : Sensibilité liée au trafic .....	32

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Représentation schématique de la dispersion d'une source linéaire [17] .....	5
Figure 2 : Système de coordonnées utilisé [25] .....	7
Figure 3 : Circulation des véhicules sur le réseau routier du Maroc [29] .....	11
Figure 4 : Maillage autoroutier du Maroc [30] .....	11
Figure 5 : Types de moteurs des voitures au Maroc [37] .....	13
Figure 6 : Méthodologie à suivre pour la modélisation .....	17
Figure 7 : Tronçon Rabat-Casablanca de 59,5 km .....	19
Figure 8 : Rose des vents en général [47] .....	20
Figure 9 : Modélisation des émissions CO <sub>2</sub> dans le cas initial .....	23
Figure 10 : Modélisation des émissions CO dans le cas initial .....	24
Figure 11 : Modélisation des émissions NO <sub>x</sub> dans le cas initial .....	25
Figure 12 : Modélisation des émissions PM dans le cas initial .....	26
Figure 13 : Modélisation des émissions SO <sub>2</sub> dans le cas initial .....	27

## LISTE DES ANNEXES

---

Annexe 1 : MODELISATION DE CO2.....	40
-------------------------------------	----

## INTRODUCTION GENERALE

---

Le secteur du transport joue un rôle central dans le développement économique et social du Maroc, avec le mode routier comme principal pilier. Représentant 90 % des déplacements individuels et 75 % du transport de marchandises, ce mode de transport est indispensable pour la mobilité des personnes et des biens à travers le pays. Cependant, cette prédominance s'accompagne d'une forte consommation d'énergie et d'émissions significatives de gaz à effet de serre, faisant du transport routier le secteur le plus polluant au Maroc [1]. Cette problématique soulève des enjeux environnementaux majeurs, notamment en termes de qualité de l'air et de changement climatique.

La croissance durable vise à concilier progrès économique, inclusion sociale et préservation de l'environnement. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel d'adopter des stratégies à long terme intégrant les dimensions sociales, environnementales et économiques dans les processus de prise de décision. À l'heure actuelle, l'action climatique est centrée sur l'objectif de l'Accord de Paris, qui vise à maintenir la hausse mondiale de la température bien en dessous de 2 °C. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a averti que le non-respect de ces objectifs pourrait entraîner de graves répercussions, telles que des sécheresses et des inondations plus fréquentes et intenses.

Il est donc impératif de se pencher sur le secteur routier pour identifier des solutions durables permettant de concilier les besoins économiques et les impératifs environnementaux, assurant ainsi un avenir plus vert pour le Maroc. Dans cette optique, notre projet de recherche se concentre sur le développement d'une solution numérique visant à limiter la pollution dans le secteur du transport. Nous avons choisi de nous focaliser sur le secteur routier, en particulier sur le segment le plus fréquenté du Maroc, celui reliant les capitales économique et politique : le tronçon Rabat-Casablanca de l'autoroute A1.

L'objectif de cette étude est de développer un modèle prédictif des émissions de polluants générées par le trafic routier sur l'autoroute A1 (tronçon Rabat-Casablanca) et de cartographier leur dispersion afin d'identifier les zones critiques. Les objectifs spécifiques sont entre autre la quantification des émissions à l'aide d'une modélisation programmée, la création d'un outils numérique pour visualiser la dispersion de ces émission et appliquer cet outils, après l'avoir testé, sur le réseau routier Marocain Cette approche permettra de proposer des solutions

## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

---

concrètes pour réduire l'impact environnemental du transport routier, tout en répondant aux exigences économiques et pratiques.

Pour traiter ce sujet, le rapport s'articulera autour des axes suivants : une synthèse bibliographique pour situer le problème dans son contexte, une partie consacrée à l'application du modèle de Gauss pour modéliser les émissions, une section détaillant la création de l'outil numérique basé sur ce modèle (application web), un chapitre sur l'application de ce modèle au tronçon de l'autoroute A1, une analyse de sensibilité, un chapitre présentant les solutions proposées et une conclusion pour résumer les résultats.

---

## CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

### 1.1. Pollution atmosphérique et polluants

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit la pollution atmosphérique comme la présence dans l'atmosphère intérieure ou extérieure d'un ou plusieurs contaminants (tels que poussières, fumées, gaz, brouillards, odeurs ou vapeurs) en quantité, avec des caractéristiques et une durée telles qu'ils sont nocifs pour la vie humaine, végétale ou animale et les activités environnementales [2]. Les polluants atmosphériques classiques sont classés en primaires (émis directement par une source identifiée dans l'atmosphère) et secondaires (formés dans l'atmosphère par des réactions chimiques avec d'autres polluants). Les polluants primaires sont les particules fines (PM), les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et le monoxyde de carbone (CO). Les polluants secondaires sont l'ozone troposphérique ( $\text{O}_3$ ), le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ). Les polluants pour lesquels les preuves les plus solides de préoccupation pour la santé publique sont les PM, le CO, l' $\text{O}_3$ , le  $\text{NO}_2$  et le  $\text{SO}_2$  [2]. Dans notre cas d'étude, nous nous focaliserons sur les polluants suivants : CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , PM et  $\text{SO}_2$ .

### 1.2. Règlementation et limites

#### 1.2.1. Recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé

L'OMS intègre régulièrement des données scientifiques sur les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et surveille les progrès réalisés par les pays en matière de qualité de l'air. Les recommandations figurant dans les lignes directrices de l'OMS sur la qualité de l'air sont fondées sur des analyses documentaires systématiques et des méthodes d'évaluation rigoureuses, ainsi que sur des consultations approfondies d'experts et des utilisateurs finaux de ces lignes directrices dans toutes les régions du monde.

Tableau I : Recommandation de l'OMS [3]

Polluants	Temps moyen	AQG 2021
CO	24 heures	4 $\text{mg}/\text{m}^3$
$\text{NO}_2$	24 heures	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\text{PM}_{2.5}$	24 heures	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\text{PM}_{10}$	24 heures	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\text{SO}_2$	24 heures	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

### 1.2.2. Recommandation de l'Agence américaine de Protection de l'Environnement

La loi sur la qualité de l'air (Clean Air Act), dont la dernière modification remonte à 1990, impose à l'EPA de fixer des normes nationales de qualité de l'air ambiant (40 CFR part 50) pour six polluants principaux (polluants atmosphériques "de référence") susceptibles de nuire à la santé publique et à l'environnement. Les normes les plus récentes sont énumérées dans le tableau 2.

Tableau II : Recommandation de l'EPA [4]

Polluants	Primaire/Secondaire	Temps moyen	Niveau	Formulaire	
CO <sub>2</sub>	Primaire	-	1 000 ppm	-	
CO	Primaire	8 heures	9 ppm	Ne pas dépasser plus d'une fois par an	
		1 heure	35 ppm		
NO <sub>2</sub>	Primaire	1 heure	100 ppb	98% des concentrations maximales quotidiennes sur 1 heure, en moyenne sur 3 ans	
	Primaire et Secondaire	1 an	53 ppb	Moyenne annuelle	
PM	PM <sub>2.5</sub>	Primaire	1 an	9 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle sur 3 ans
		Secondaire	1 an	15 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle sur 3 ans
		Primaire et Secondaire	24 heures	35 µg/m <sup>3</sup>	98% moyenne sur 3 ans
	PM <sub>10</sub>	Primaire et Secondaire	24 heures	150 µg/m <sup>3</sup>	Ne pas dépasser plus d'une fois par an en moyenne sur 3 ans
SO <sub>2</sub>	Primaire	1 heure	75 ppb	99% des concentrations maximales quotidiennes sur 1 heure, en moyenne sur 3 ans	
	Secondaire	1 an	10 ppb	Moyenne annuelle sur 3 ans	

### 1.3. Modèle de dispersion : types de modèles

En général, la modélisation a pour objectif de développer des outils mathématiques permettant d'intégrer les connaissances aux phénomènes, mais aussi de déterminer la direction de la conception expérimentale, d'évaluer les résultats expérimentaux, de tester des hypothèses, de révéler les relations entre les variables, de prédire le développement du système et de concevoir des processus et des stratégies de gestion [5] [6].

Ainsi, il est essentiel de développer des modèles mathématiques reliant les émissions polluantes aux niveaux de concentration afin de prédire les tendances futures de la qualité de l'air ou d'évaluer l'efficacité des stratégies d'atténuation [7]. À cet égard, une variété de modèles de dispersion atmosphérique est disponible pour simuler les concentrations de polluants en fonction du temps et de l'espace. Notamment, les modèles eulériens et lagrangiens sont adaptés

aux grands domaines, tandis que les modèles gaussiens conviennent mieux aux échelles locales, en particulier pour les cas sans obstacles ou avec des obstacles de géométrie simple [8].

Par ailleurs, l'Agence américaine de Protection de l'Environnement propose gratuitement une gamme de modèles adaptés à des objectifs spécifiques, tels que AERMOD, CALPUFF, CALINE et CAL3QHCR [9] [10]. Grâce à ces modèles, il est possible d'évaluer la conformité aux directives de qualité de l'air, de gérer les émissions existantes, de concevoir des réseaux de surveillance et d'identifier les principaux contributeurs à la pollution. De plus, ils permettent d'évaluer les politiques d'atténuation, de prévoir les épisodes de pollution, d'estimer l'influence des facteurs géophysiques sur la dispersion, et enfin, d'optimiser le temps et les coûts par rapport à la surveillance [11] [12] [13].

## 1.4. Modèle de dispersion Gaussien

### 1.4.1. Définition

Les modèles d'émission jouent un rôle croissant dans les études environnementales [14]. Celui de Gauss est utilisé pour simuler l'impact de la dispersion atmosphérique sur les concentrations de polluants en fonction du taux d'émission d'une route, particulièrement en terrain découvert [15]. Ce modèle de panache gaussien, largement accepté pour estimer les concentrations de polluants dans le sens du vent [16], est un outil mathématique jouant un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité de l'air et la gestion environnementale.

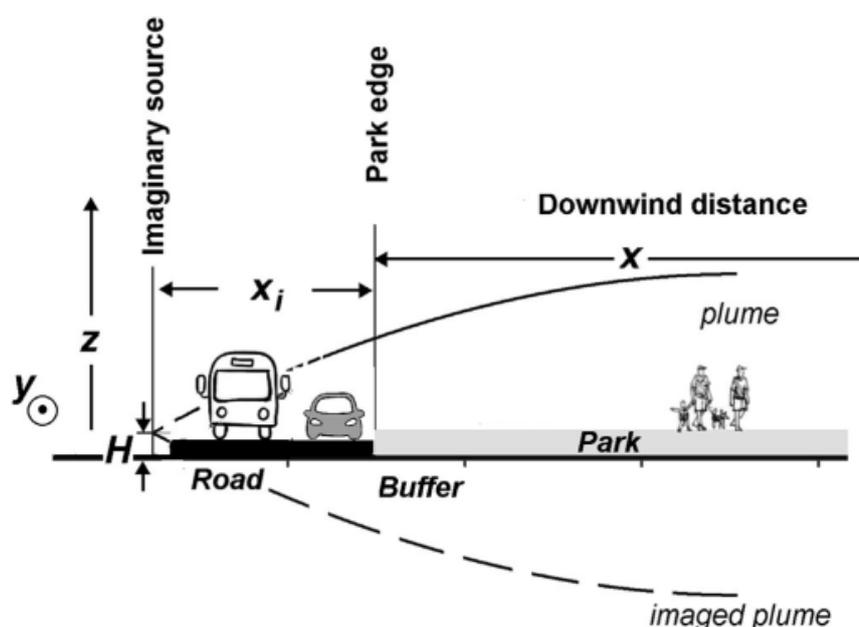


Figure 1 : Représentation schématique de la dispersion d'une source linéaire [17]

### **1.4.2. Avantages**

Le modèle gaussien se distingue par sa simplicité et son efficacité, nécessitant peu de données d'entrée par rapport à d'autres modèles plus complexes. Robuste dans diverses conditions atmosphériques, il est fiable dans des environnements plats et ouverts. Largement accepté et utilisé par les agences environnementales du monde entier pour la réglementation de la qualité de l'air, le modèle gaussien demeure un outil de référence pour l'étude de la diffusion des polluants. En associant chaque condition météorologique (vitesse et direction du vent, température, stabilité atmosphérique) à la forme du panache gaussien, il permet une description précise des émissions dans la zone étudiée. Le respect des conditions d'applicabilité et la qualité des données météorologiques utilisées garantissent des résultats performants, tant en phase de contrôle quantitatif qu'en analyse et interprétation des résultats [18].

### **1.4.3. Paramètres contribuant à la pollution de l'air**

De nombreux facteurs influencent les concentrations de polluants liées au trafic routier, notamment les caractéristiques des sources d'émission, les conditions environnementales, et les facteurs liés à l'environnement urbain et à la météorologie [11]. En effet, le type de véhicule et le carburant utilisé déterminent la nature des polluants et leur concentration : Par exemple, les moteurs diesel génèrent davantage de particules fines et d'oxydes d'azote, tandis que les véhicules à essence produisent davantage de CO et de COV.

De plus, les véhicules anciens ou mal entretenus, en raison d'une combustion inefficace, émettent plus de polluants [19]. Par ailleurs, les conditions météorologiques, telles que la température, la vitesse du vent et l'humidité, influencent la dispersion et la transformation chimique des polluants [11], [12] tandis que le rayonnement solaire favorise les réactions photochimiques, formant ainsi des polluants secondaires comme O<sub>3</sub> issus des NO<sub>x</sub> et COV [20].

En outre, la densité du trafic, la morphologie urbaine et les caractéristiques des routes jouent également un rôle crucial : en particulier, les zones à forte densité de véhicules, surtout aux heures de pointe, présentent des concentrations élevées de polluants [21]. De surcroît, les canyons urbains formés par les rangées de bâtiments limitent la dispersion des polluants [22]. Enfin, les concentrations de polluants sont plus élevées à proximité immédiate des voies de circulation et diminuent exponentiellement avec la distance [23].

De même, les accélérations rapides et les freinages fréquents augmentent les émissions, alors que le trafic avec des arrêts fréquents amplifie les émissions par rapport à un trafic fluide [24].

#### 1.4.4. Paramètres de dispersion

Les conditions météorologiques et la topographie influencent la dispersion atmosphérique et, par conséquent, la concentration environnementale des polluants.

D'une part, les facteurs météorologiques, notamment le vent, jouent un rôle clé dans ce processus. En effet, sa direction détermine le déplacement du panache de pollution et, par extension, les zones affectées, tandis que sa vitesse influence la dilution des polluants : un vent fort disperse rapidement les substances nocives, réduisant ainsi leur concentration locale. De plus, la stabilité atmosphérique impacte la dispersion verticale des polluants. Ainsi, une atmosphère stable retient les polluants près du sol, augmentant les niveaux de pollution localement, alors qu'une atmosphère instable favorise une dispersion plus large et rapide.

D'autre part, la topographie modifie également la dispersion des polluants. Sur un terrain plat, l'air circule librement, permettant une répartition homogène des substances polluantes. En revanche, en présence d'obstacles tels que des bâtiments, des arbres ou un relief accidenté, la dispersion devient plus difficile, car ces barrières perturbent le flux naturel.

Enfin, la dispersion atmosphérique repose sur deux mécanismes principaux : la dilution et la diffusion. D'une part, la dilution se produit lorsque le vent mélange les polluants à l'air ambiant, réduisant leur concentration. D'autre part, la diffusion désigne le déplacement des particules polluantes dans toutes les directions, y compris verticalement, favorisant ainsi leur dispersion.

#### 1.4.5. Hypothèses pour une source linéaire

Zone tampon (buffer) : définie par une distance de 100m de part et d'autre de la source.

Origine de la source linéaire : Le point de départ sera le centre du système d'axes (0 ; 0 ; 0)

Système d'axes : un système cartésien (X, Y, Z) avec l'axe X suivant la direction du vent.

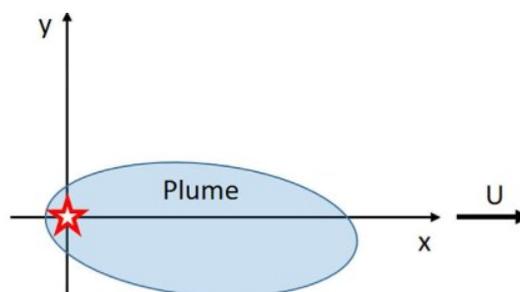


Figure 2 : Système de coordonnées utilisé [25]

Hauteur effective de la source : nulle (source linéaire)

Source linéaire, posé au sol : coordonnée z est nulle

Régime Permanent : Taux des émissions est constant

- Débit massique (flux) : constant
  - Débit volumétrique : constant
  - Vitesse des émissions : constant
- $$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Débit massique (flux) : constant} \\ \bullet \text{ Débit volumétrique : constant} \\ \bullet \text{ Vitesse des émissions : constant} \end{array} \right\} \frac{dc}{dt} = 0$$

Caractéristiques météorologiques :

- Vitesse du vent : constant
- Température ambiante : constant
- Stabilité de l'atmosphère ( $\frac{dT}{dz}$ ) : constant

Conservation de la quantité de matière :

- Pas de réaction chimique
- Pas de décomposition (décroissance) radioactive

Condition aux limites :

- Pas de surface limite en haut (couche d'inversion)
- Présence du sol

Données d'entrée :

- Emissions sources : Taux d'émissions (g/s).
- Conditions météorologiques : Vitesse (m/s) et direction du vent (en degré selon la rose des vents) et la stabilité atmosphérique.
- Topographie : Caractéristiques du terrain (zone rurale ou urbaine)

#### 1.4.6. Formulation mathématique

Pour traiter ce problème de manière générale, il est nécessaire d'intégrer numériquement l'équation stationnaire tridimensionnelle de diffusion turbulente :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  sont les coefficients de diffusion turbulente dans les directions  $Ox$  (sous le vent),  $Oy$  (perpendiculaire au vent) et  $Oz$  (verticale). Les composantes tridimensionnelle du vent moyen sont notées  $u$ ,  $v$  et  $w$  [26].

En supposant que le transport par convection  $u \frac{\partial C}{\partial x}$  domine la diffusion longitudinale, on simplifie l'équation en négligeant ce dernier terme :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

Le vent est uniquement dirigé selon x, avec  $u=\text{constante}$ ,  $v=0$  et  $w=0$ , l'équation devient :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( Ky \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Kz \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dc}{dx} u = Ky \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + Kz \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

En divisant par u, on obtient :

$$\frac{dc}{dx} = \frac{Ky}{u} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{Kz}{u} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5)$$

La solution à l'équation est considérée comme Equation de Base de la dispersion

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (6)$$

Le débit massique du polluant émis par la source est noté Q (g/s). La vitesse moyenne du vent à la hauteur de la source est représentée par u (m/s), tandis que h désigne la hauteur de la source (m). Les paramètres  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  correspondent aux écarts-types de la distribution de la concentration dans les directions latérale (y) et verticale (z), respectivement. Ces valeurs sont déterminées selon la corrélation de Pasquill-Gifford [27]. La concentration C(x,y,z) est exprimée en unité gravimétrique (mg/m<sup>3</sup> ou µg/m<sup>3</sup>).

En présence d'un sol à la surface (z=0), la source émet un polluant et son image se reflète, ce qui donne l'équation suivante :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{h^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (7)$$

Pour une source linéaire (h=0), l'équation devient :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (8)$$

Ce modèle permet ainsi d'évaluer la dispersion des polluants en fonction des paramètres atmosphériques et des caractéristiques de la source.

### **1.4.7. Limitations du modèle Gaussien**

La formule de dispersion gaussienne fournit une solution exacte pour les émissions de polluant provenant d'une source linéaire uniquement dans le cas où le vent est perpendiculaire [15].

La dispersion des polluants atmosphériques à proximité des sources est généralement simulée par des modèles gaussiens en raison de leur compromis efficace entre une précision raisonnable et un temps de calcul gérable. Cependant, la formule de dispersion gaussienne standard s'applique sous le vent d'une source dans des conditions d'advection avec une direction du vent bien définie et ne peut pas calculer les concentrations de polluants atmosphériques dans des conditions calmes avec une direction du vent fluctuante et/ou en amont de la source [8].

## **1.5. Secteur du Transport au Maroc**

### **1.5.1. Généralités**

Au Maroc, sous la tutelle du ministère du Transport, plusieurs modes coexistent. D'une part, le transport routier, largement dominant, regroupe les automobiles, les deux-roues et les camions. D'autre part, le transport ferroviaire, grâce aux trains et tramways, permet des déplacements rapides et massifs sur rails. Par ailleurs, le transport maritime et fluvial joue un rôle clé dans les échanges internationaux et locaux via les navires et bateaux fluviaux, tandis que le transport aérien, assuré par les avions et hélicoptères, facilite les trajets longue distance. En complément, des modes alternatifs, souvent qualifiés de "modes doux", tels que la marche, le vélo ou la trottinette, bien que plus exigeants physiquement, participent activement à la réduction des émissions de GES. Qu'il soit terrestre, maritime ou aérien, le transport représente un pilier stratégique du développement urbain et économique du Maroc. Toutefois, pour répondre aux défis environnementaux et aux besoins croissants de mobilité, son évolution doit s'inscrire dans une perspective durable, conciliant modernisation, accessibilité et transition énergétique.

### **1.5.2. Transport routier**

Le transport routier occupe une place prépondérante sur le plan économique. Le Maroc dispose d'un réseau routier classé, géré et exploité par l'État à travers le Ministère de l'Équipement, du Transport et de la Logistique. Ce réseau s'étend sur 59 000 km, dont environ 44 000 km de routes revêtues, et comprend un parc de 7 500 ouvrages d'art. Il intègre également 960 km de voies express et 1 800 km d'autoroutes en service. Représentant le principal mode de mobilité pour 90 % des personnes et 75 % du transport de marchandises, le réseau routier joue un rôle stratégique dans l'économie nationale. Les autoroutes au Maroc permettent un gain de temps

## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

moyen de 30 minutes par tranche de 100 km, soit des économies annuelles estimées à environ 7 milliards DH, représentant près de 0,8 % du PIB et emploie environ 200 000 personnes [28].

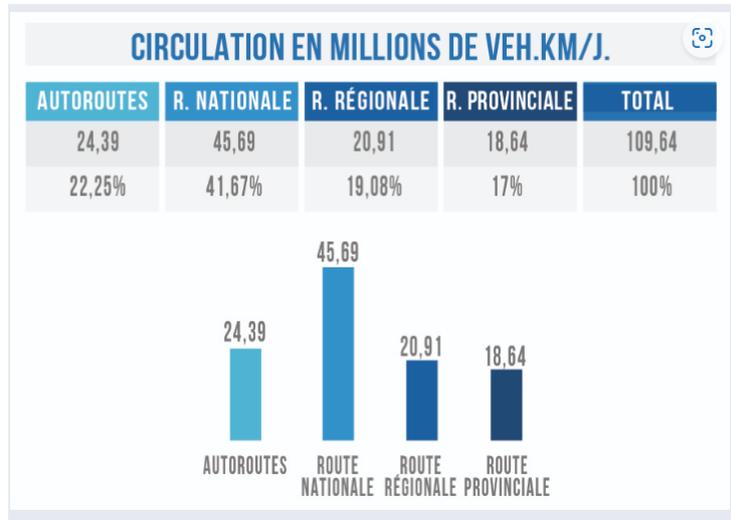


Figure 3 : Circulation des véhicules sur le réseau routier du Maroc [29]



Figure 4 : Maillage autoroutier du Maroc [30]

### 1.5.3. Développement économique et social

Le secteur des transports et de la logistique constitue un pilier essentiel de l'économie marocaine. Il contribue actuellement à hauteur de 6 % au PIB national et représente 9 % de la valeur des activités tertiaires. Employant plus de 500 000 personnes, il englobe ainsi 5 % de la population active, dont 6,6 % dans les zones urbaines [1]. Bien plus qu'un simple moyen de déplacement, le transport s'impose comme un véritable levier de développement socioéconomique à travers plusieurs dimensions.

La société nationale des Autoroutes Du Maroc (ADM), créée en 1989, est chargée de la construction, de l'exploitation et de l'entretien des autoroutes au Maroc. Elle a établi un réseau de 1 800 km, faisant du pays le deuxième plus grand réseau autoroutier d'Afrique. Grâce à ses efforts, 60 % de la population marocaine est directement reliée au réseau autoroutier, 70 % bénéficie d'un accès via autoroutes ou voies express, et 85 % se trouve à moins d'une heure d'une autoroute. Toutes les grandes villes de plus de 400 000 habitants et 22 sur 27 villes de plus de 100 000 habitants sont connectées [31].

Tableau III : Chiffre clé sur les autoroutes au Maroc [28]

COMPOSANTES	NATURE	ANNEE 2023
CA (en DH)	Total	4,09 milliards
	Fret	1,53 milliards
	Voyageur	2,56 milliards
Trafic (2022+7,8%) 25,6 Mkm/jour	2023	14 600
	2022	13 600
	2021	12 800
Type de Véhicule du Trafic	78% de VL	11 388 (2022+8,5%)
	12% de PL1	1 752 (2022+6,4%)
	10% de PL 2	1 460 (2022+4,6%)

#### 1.5.4. Enjeux environnementaux

Le secteur des transports joue un rôle fondamental dans le développement économique d'un pays. Cependant, au Maroc, il demeure l'un des plus grands consommateurs d'énergie, représentant 38 % de la consommation énergétique finale et contribuant à hauteur de 23 % aux émissions de GES, avec une dépendance quasi totale (99 %) aux énergies fossiles [32]. Ainsi, en 2020, le Maroc a rejeté environ 95,5 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> [1], principalement en raison de l'usage intensif des combustibles fossiles. Par conséquent, les émissions de GES liées au transport sont estimées à environ 48 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> [33].

Dans ce contexte, le principal pollueur du secteur des transports au Maroc reste le transport routier, dont l'impact environnemental est particulièrement préoccupant. Le transport routier constitue l'une des principales sources de pollution atmosphérique, contribuant largement aux concentrations élevées d'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>) et de particules fines (PM<sub>2.5</sub>) [34].

En plus de ces polluants, les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), précurseurs de l'ozone, ainsi que le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), participent à la dégradation de la qualité de l'air. Cette pollution est accentuée par un parc automobile vieillissant : en 2018, sur

les 4,3 millions de véhicules recensés, seuls 25 % avaient moins de cinq ans, tandis que 28 % dépassaient les vingt ans. De plus, 6 % du parc national était constitué de véhicules âgés de plus de 35 ans, dont certains atteignaient plus de 50 ans [35]. Par ailleurs, avec 94 % des véhicules fonctionnant aux carburants fossiles (13,5 % à l'essence et 80,5 % au diesel), les émissions polluantes restent une problématique majeure [36]

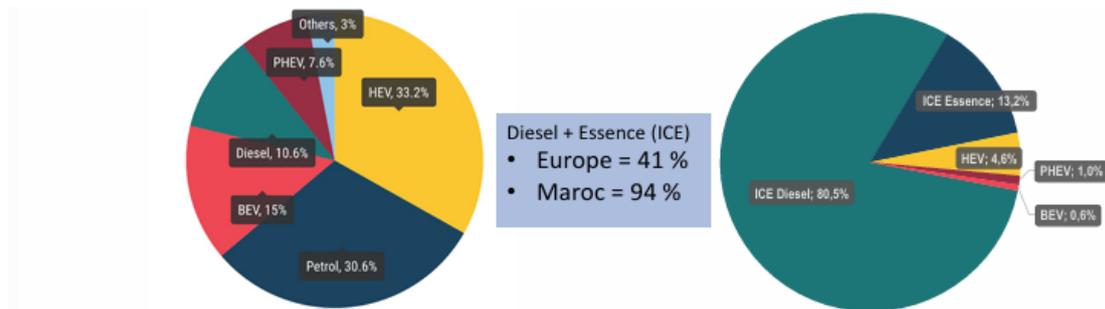


Figure 5 : Types de moteurs des voitures au Maroc [37]

Les moteurs à essence rejettent principalement du monoxyde de carbone, des composés organiques volatils (COV), de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et certains métaux lourds, tandis que les moteurs diesel produisent une grande quantité de particules fines et d'oxydes d'azote [9].

Au-delà des émissions des véhicules, les infrastructures routières contribuent également à la pollution par la destruction d'écosystèmes, la libération de dioxyde de carbone stocké dans la végétation et l'artificialisation des sols. En outre, la poussière routière constitue une source non négligeable de particules atmosphériques par remise en suspension. Elle provient non seulement de sources naturelles, mais aussi de l'usure des pneus, des freins et de l'asphalte, renforçant ainsi l'impact environnemental du transport routier [38].

### 1.5.5. Impacts sur la santé humaine

Selon l'OMS, 7 millions de décès prématurés sont dus chaque année aux effets combinés de la pollution de l'air extérieur et domestique, et des millions d'autres personnes tombent malades après avoir respiré de l'air pollué. [39]. Les particules fines ( $\text{PM}_{2.5}$ ), en raison de leur taille minuscule, s'infiltrant profondément dans le système respiratoire, provoquant inflammations, stress oxydatif et augmentant les risques de maladies respiratoires et cardiovasculaires [40].

Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), en plus d'irriter les voies respiratoires, favorisent la formation d'ozone troposphérique et de particules secondaires, exacerbant des pathologies comme l'asthme et la bronchopneumopathie chronique obstructive [12]. Le monoxyde de carbone (CO), quant à lui, se fixe sur l'hémoglobine pour former de la carboxyhémoglobine, réduisant

l'oxygénation des tissus et augmentant ainsi les risques cardiovasculaires, notamment chez les populations vulnérables [41].

Les composés organiques volatils (COV), en plus de leur implication dans la formation du smog photochimique, possèdent des propriétés toxiques pouvant irriter les muqueuses et s'accumuler dans l'organisme. L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), en réagissant avec d'autres polluants atmosphériques, contribue à la formation de particules fines secondaires, aggravant les affections respiratoires et cardiovasculaires [11], [12], [13]. Enfin, les métaux lourds tels que le plomb et le cadmium, bien que présents en faibles concentrations, s'accumulent dans l'organisme et exercent des effets neurotoxiques, particulièrement chez les enfants [40].

### **Conclusion partielle**

Ce chapitre de synthèse bibliographique a permis de cerner les différentes dimensions du problème de la pollution atmosphérique, en particulier dans le contexte du secteur du transport au Maroc. Nous avons exploré les types de polluants et les normes OMS et EPA pour protéger la santé publique et l'environnement. L'analyse des modèles de dispersion a révélé les avantages et les limitations de ces outils dans l'évaluation de la pollution de l'air. Les paramètres influençant la dispersion et les hypothèses nécessaires ont été examinés en détail, offrant une base solide pour des études plus approfondies. Les impacts négatifs des transports routiers, tant sur l'environnement que sur la santé humaine, ont été discutés, mettant en évidence la nécessité de solutions durables. Cette synthèse pose les bases nécessaires pour aborder les prochaines étapes de cette recherche, visant à proposer des solutions innovantes pour un transport plus durable et respectueux de l'environnement.

## CHAPITRE 2. METHODOLOGIE

### 2.1. Modèle de Gauss

#### 2.1.1. Paramètres d'entrée

**Classe de stabilité :** La classification de Pasquill-Gifford, utilisée pour caractériser la stabilité atmosphérique, repose sur six catégories (A à F) définies en fonction du vent, du rayonnement solaire et de la nébulosité [42]. En effet, le vent favorise le mélange vertical, réduisant la stratification et poussant la stabilité vers une condition neutre (D) [43]. Par ailleurs, le rayonnement solaire joue un rôle déterminant : il accroît l'instabilité de l'air en journée, tandis que le refroidissement radiatif nocturne induit une stabilisation. La nébulosité, quant à elle, atténue les variations thermiques en interceptant le rayonnement solaire durant la journée et en réfléchissant le rayonnement infrarouge la nuit [43]. Selon l'intensité du rayonnement solaire, on a trois niveaux : fort ( $> 700 \text{ W/m}^2$ ), modéré ( $350\text{-}700 \text{ W/m}^2$ ) et faible ( $< 350 \text{ W/m}^2$ ) [43].

Tableau IV : Classe de stabilité de Pasquill-Gifford : Pasquill 1961

Vitesse du vent en surface à 10 mètres du sol [m/s]	Jour (Rayonnement solaire incident)			Nuit	
	Fort	Modéré	Léger	Nébulosité $> 4/8$ à faible hauteur (plafond peu épais)	Nébulosité $\leq 3/8$
2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
6	C	D	D	D	D

**Vitesse et direction du vent :** La vitesse et la direction du vent sont intégrées dans le modèle après avoir été déterminées par des observations ou des prévisions météorologiques [18]. La direction du vent est tout aussi essentielle, car elle oriente la trajectoire des substances.

**Calcul des écarts type :** Le système de classification de la stabilité de Pasquill, initialement développé pour spécifier les paramètres de diffusion horizontale et verticale des polluants dans le modèle de panache gaussien, a été modifié par Gifford (1961), Turner (1967) et Briggs (1973) pour améliorer sa précision et son applicabilité [44]. Briggs (1973) a proposé une paramétrisation améliorée, offrant des formules d'interpolation flexibles pour  $\sigma_y(x)$  et  $\sigma_z(x)$ , étendant ainsi l'échelle de dispersion jusqu'à 100 km [16].

Tableau V : Classification de la stabilité de Pasquill [15]

Land category	Stability class	$\sigma_y$	$\sigma_z$
Rural	A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
	B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
	C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
	D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
	E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
	F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Urban	A–B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.001x)^{1/2}$
	C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
	D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
	E–F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1}$

**Calcul du taux d'émission :** Le taux d'émission  $Q$  est estimé à partir des facteurs d'émission composites des véhicules, calculés selon la méthodologie **COPERT** [45]. Les émissions à chaud sont obtenues via l'équation suivante :

$$E_{1jk} = N_j \times VKT_{jk} \times EF_{jk} \quad [46] \quad (9)$$

- $E_{1jk}$  : émissions de l'espèce  $i$ , catégorie de véhicule  $j$ , type de route  $k$ ,
- $N_j$  : nombre de véhicules en circulation (trafic horaire, journalier ou annuel),
- $VKT_{jk}$  : distance parcourue ( $j, k$ ),
- $EF_{jk}$  : facteur d'émission à chaud ( $i, j, k$ ).

Tableau VI : Facteur d'émission [46]

Emission factors ( $g \text{ km}^{-1}$ ) by category employed in this study. Regionally measured EFs are reported on the basis of the median values and accompanied with the lower and upper quartile values in brackets. Uncertainty ranges are not reported for those EFs obtained from international sources (COPERT IV and IPCC emission factors database); for the criteria adopted for these cases, see Section 2.5.

ID	Fuel	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NMVOCs	NO <sub>x</sub>	PM	SO <sub>2</sub>
PC1	G	299	0.184	0.013	53.51 (29.10–88.08)	4.87 (1.28–8.24)	1.43 (0.82–2.12)	0.024	0.1136
PC2	G	299	0.184	0.013	17.23 (9.42–36.66)	1.78 (0.87–2.86)	0.87 (0.39–1.44)	0.024	0.1136
PC3	G	213	0.038	0.032	20.46 (13.74–33.14)	1.55 (0.42–3.42)	1.16 (0.61–1.74)	0.024	0.0810
PC4	G	213	0.043	0.017	2.58 (1.31–23.64)	0.21 (0.02–0.54)	0.19 (0.06–0.98)	0.024	0.0810
PC5	D	213	0.034	0.000	0.82	0.18	0.58	0.306	0.2016
PC6	D	182	0.016	0.002	0.55	0.06	0.67	0.099	0.1720
PC7	D	182	0.009	0.005	0.46	0.04	0.73	0.086	0.1720
PC8	CNG	236	0.709	0.068	6.36 (2.00–18.23)	1.56 (0.24–2.79)	1.74 (1.05–3.70)	0.021	0.0002
PC9	CNG	168	0.709	0.068	6.36 (2.00–18.23)	1.56 (0.24–2.79)	1.74 (1.05–3.70)	0.021	0.0001
TX1	D	213	0.033	0.000	0.82	0.18	0.58	0.306	0.2016
TX2	D	182	0.015	0.002	0.55	0.06	0.67	0.099	0.1720
TX3	D	182	0.008	0.004	0.46	0.04	0.73	0.086	0.1720
TX4	CNG	236	0.709	0.068	6.36 (2.00–18.23)	1.56 (0.24–2.79)	1.74 (1.05–3.70)	0.021	0.0002
TX5	CNG	168	0.709	0.068	6.36 (2.00–18.23)	1.56 (0.24–2.79)	1.74 (1.05–3.70)	0.021	0.0001
SUV1	G	367	0.184	0.013	81.47 (27.46–146.58)	8.74 (5.03–13.16)	2.62 (1.43–3.73)	0.024	0.1392
SUV2	G	367	0.184	0.013	14.84 (9.94–33.14)	1.79 (1.50–6.56)	0.99 (0.65–3.32)	0.024	0.1392
SUV3	G	286	0.038	0.032	15.44 (6.81–22.85)	1.06 (0.28–1.77)	0.94 (0.29–1.59)	0.024	0.1085
SUV4	G	285	0.043	0.017	7.36 (3.21–23.19)	0.44 (0.17–0.70)	0.46 (0.21–0.80)	0.024	0.1082
SUV5	D	213	0.034	0.000	0.82	0.18	0.90	0.306	0.2016
SUV6	D	234	0.016	0.002	0.55	0.10	0.67	0.099	0.2209
SUV7	D	234	0.009	0.005	0.46	0.14	0.73	0.086	0.2209
SUV8	CNG	289	0.709	0.068	10.81 (4.03–19.67)	1.56 (0.24–2.79)	2.51 (1.46–3.92)	0.021	0.0002
SUV9	CNG	225	0.709	0.068	10.81 (4.03–19.67)	1.56 (0.24–2.79)	2.51 (1.46–3.92)	0.021	0.0002
LDT1	G	365	0.184	0.013	33.33 (20.90–53.29)	4.38 (2.85–7.23)	1.23 (0.92–1.43)	0.032	0.1387
LDT2	G	365	0.038	0.044	26.4 (22.89–32.79)	3.07 (0.09–8.07)	1.61 (0.62–2.41)	0.032	0.1387
LDT3	G	365	0.043	0.036	22.48 (19.49–27.92)	2.19 (0.05–5.78)	1.49 (0.58–2.24)	0.032	0.1387
LDT4	D	279	0.034	0.000	1.37	0.15	2.05	0.396	0.2638
LDT5	D	252	0.016	0.002	0.51	0.17	1.26	0.129	0.2378
LDT6	D	252	0.009	0.005	0.51	0.17	1.26	0.129	0.2378
LDT7	CNG	288	0.709	0.068	1.6 (0.60–4.60)	0.09 (/–0.64)	1.85 (0.75–3.50)	0.029	0.0002
LDT8	CNG	288	0.709	0.068	1.6 (0.60–4.60)	0.09 (/–0.64)	1.85 (0.75–3.50)	0.029	0.0002
HDT1	D	837	0.171	0.029	3.88 (2.11–7.13)	3.52 (1.98–8.10)	8.92 (4.37–12.14)	1.151 (0.527–1.977)	0.7906
HDT2	D	837	0.171	0.011	1.83 (1.11–5.84)	0.52 (0.35–1.18)	5.61 (3.50–8.37)	0.267 (0.160–0.583)	0.7906
B	D	771	0.111	0.012	6.09 (4.66–11.02)	1.32 (0.93–1.72)	15.98 (12.98–18.59)	0.287 (0.187–0.570)	0.7283
C	D	893	0.111	0.011	6.09 (4.66–11.02)	1.32 (0.93–1.72)	15.98 (12.98–18.59)	0.287 (0.187–0.570)	0.8437

G = Essence ; D = Diésel ; CNG = Gaz naturel comprimé.

PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6, PC7, PC8, PC9 : Voitures de tourisme

TX1, TX2, TX3, TX4, TX5 : TaXi

SUV1, SUV2, SUV3, SUV4, SUV5, SUV6, SUV7, SUV8, SUV9 : Véhicules utilitaires sport

LDT1, LDT2, LDT3, LDT4, LDT5, LDT6 LDT7, LDT8 : Camions légers

HDT1, HDT2 : Camions lourds ; B : Bus ; C : Autocar interurbain

Les incertitudes (parenthèse) à l'aide de l'approche 1 des lignes directrices 2006 du GIEC [46].

### 2.1.2. Démarche

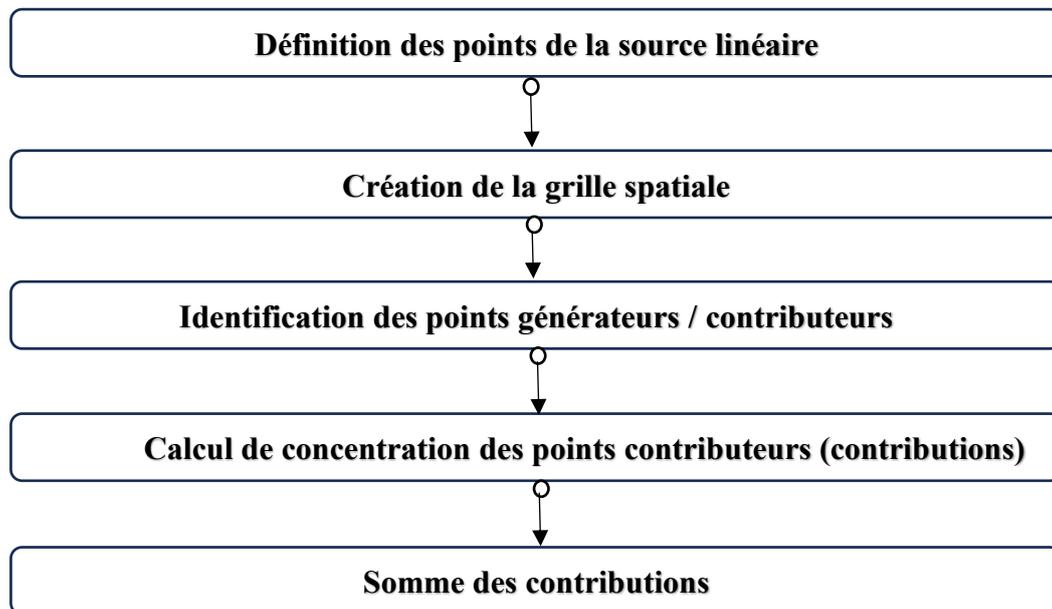


Figure 6 : Méthodologie à suivre pour la modélisation

## 2.2. Solution numérique

### 2.2.1. Utilisation de SIG (Systèmes d'Information Géographique)

Pour notre projet, nous avons besoin de données spatiales précises pour modéliser notre infrastructure routière sous forme de points. Afin d'obtenir un maillage optimal, nous utilisons un Système d'Information Géographique (SIG) pour extraire un maximum de points, puis nous appliquons une interpolation linéaire afin d'atteindre le nombre souhaité. Cette démarche nous permet d'évaluer avec précision la concentration de polluants en différents points de la route. Le choix du nombre de points repose sur un équilibre entre précision et temps de calcul.

Un nombre élevé de points améliore la finesse des résultats, mais accroît le temps de traitement. Pour modéliser notre réseau routier, nous créons une couche multipoints dans QGIS, en

définissant le système de coordonnées UTM 29N et en ajoutant un champ "nom". Ensuite, en activant les outils de numérisation, nous plaçons manuellement les points le long de l'autoroute. Toutefois, bien que les points apparaissent à l'écran, leurs coordonnées (X, Y) ne sont pas immédiatement visibles. Nous les rendons accessibles via la calculatrice de champ, en créant les attributs "Coord X" et "Coord Y" avec les fonctions \$x et \$y. Une fois ces données obtenues, nous exportons la table attributaire en CSV à l'aide de l'extension mmqgis.

### 2.2.2. Programmation en Python

Pour modéliser et analyser les concentrations de polluants le long d'une infrastructure routière, nous avons développé un script Python en utilisant plusieurs bibliothèques essentielles telles que pandas, numpy, scipy, et matplotlib. Ce script se divise en quatre parties principales : l'interpolation des points, la transformation des coordonnées, le calcul des concentrations de polluants, et enfin la visualisation des résultats.

### 2.2.3. Création d'application web

#### *Dossier Principal de l'Application*

**app.py** : Le fichier principal de l'application Flask. Il contient la configuration de l'application, les routes, et les fonctions de traitement des données.

**templates/** : Ce dossier contient les fichiers HTML qui définissent l'interface utilisateur.

- index.html : La page principale et voir les résultats.
- about.html : Une page d'information sur l'application.

**static/** : Ce dossier contient les fichiers de style CSS, les scripts JavaScript, et les images.

- css/ : Dossier pour les fichiers CSS.
- js/ : Dossier pour les fichiers JavaScript.

**uploads/** : Dossier où les fichiers téléchargés par les utilisateurs sont stockés.

#### *Configuration de PyCharm*

Création du Projet :

- Ouvrez PyCharm et créez un nouveau projet avec les bibliothèques nécessaires.
- Sélectionnez un environnement virtuel pour isoler les dépendances du projet.

Configuration du Serveur Flask :

- Dans PyCharm, allez dans Run > Edit Configurations.
- Ajoutez une nouvelle configuration Flask et pointez-la vers le fichier app.py.

Exécution de l'Application :

- Lancez l'application en cliquant sur le bouton de lecture dans PyCharm
- Accédez à l'application via un navigateur web à l'adresse <http://127.0.0.1:5000/>.

## 2.2.4. Technologies Utilisées

- Flask : permettant une interaction simple et efficace avec les utilisateurs.
- Pandas et NumPy : Pour la manipulation et l'analyse des données géographiques.
- SciPy : Pour les calculs d'interpolation et de dispersion.
- Matplotlib : visualisation des données et la de cartes des concentrations de polluants.

## 2.3. Présentation de l'Autoroute A1

### 2.3.1. Présentation des régions concernées

La région de Casablanca-Settat constitue le principal moteur économique du Maroc, avec une contribution de 26,5 % au PIB national en 2016 [1]. Pour sa part, la région de Rabat-Salé-Kénitra constitue le deuxième pôle économique du Royaume, assurant 15,2 % de la création de richesse nationale en 2017 [1].

### 2.3.2. Longueur du tronçon

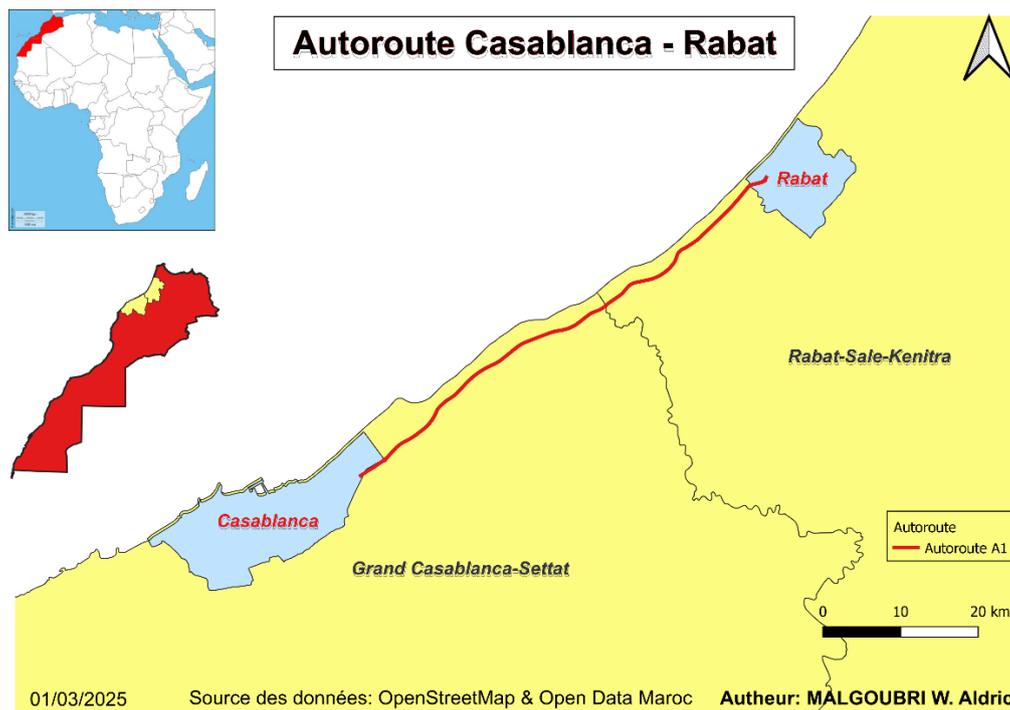


Figure 7 : Tronçon Rabat-Casablanca de 59,5 km

### 2.3.3. Données météorologiques de la zone

Vitesse du vent : Pour la vitesse moyenne, supposons une valeur de **4 m/s**.

## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

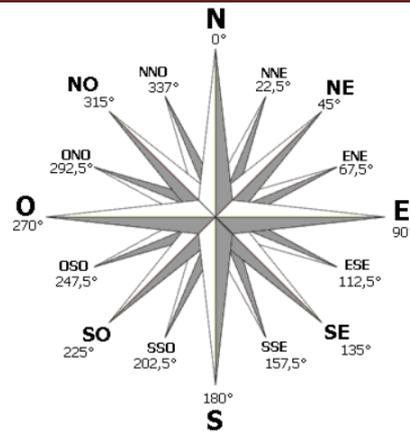


Figure 8 : Rose des vents en général [47]

Concernant la direction du vent, supposons une direction **Nord Nord Est (NNE) de 22,5°**.

Pour la classe de stabilité et la zone d'étude, supposons que dans notre cas, l'atmosphère est de classe **D (neutre)** en Zone Urbaine

### 2.3.4. Taux d'émission de la zone

Tableau VII : Données sur l'autoroute A1 [29]

<b>TRAFIC PAR SECTION</b>										
<b>1° - ROUTES NATIONALES ET AUTOROUTES EN 2022</b>										
N° de la route	N° du poste	Lieu d'implantation		Section concernée					TMJA en véh/j	Circulation en véh.km/j
		P.K	DPETL	ORIGINE	EXTREMITE	P.K O	P.K E	LONG. EN KM		
A1	péage		RABAT	RABAT	SKHIRAT	0,00	17,10	17,10	<b>60870</b>	1040877
A1	péage		RABAT	SKHIRAT	BOUZNKA EST	17,10	29,40	12,30	<b>66146</b>	813596
A1	péage		RABAT	BOUZNKA EST	MOHAM. EST	29,40	48,30	18,90	<b>60690</b>	1147041
A1	péage		RABAT	MOHAM. EST	BIFURCATION HARROUDA	48,30	59,50	11,20	<b>79083</b>	885730
A1	péage		CASABLANCA	BIFURCATION HARROUDA	CASABLANCA EST	59,50	72,80	13,30	<b>34889</b>	464024
A1	péage		CASABLANCA	CASABLANCA EST	CASA PORT	72,80	77,70	4,90	<b>49907</b>	244544
A1	péage		CASABLANCA	CASA PORT	CASA CENTRE	77,70	80,40	2,70	<b>56656</b>	152971
A1	péage		CASABLANCA	CASA CENTRE	NGEUD SIDI MAAROUF	80,40	87,00	6,60	<b>60305</b>	398013
A1	péage		CASABLANCA	NGEUD SIDI MAAROUF	BIFURCATION AZBANE	87,00	92,50	5,50	<b>33673</b>	185202
A1	péage		CASABLANCA	PENETRANTE AZBANE		0,00	1,70	1,70	<b>30000</b>	51000
A1	péage		CASABLANCA	NASSIM	HAD SWALEM	92,50	108,10	15,60	<b>26640</b>	415584
A1	péage		CASABLANCA	HAD SWALEM	BIR JDID	108,10	127,30	19,20	<b>18946</b>	363763
A1	péage		EL JADIDA	BIR JDID	TNIN CHTOUKA	127,30	143,10	15,80	<b>16882</b>	266736
A1	péage		EL JADIDA	TNIN CHTOUKA	AZEMMOUR	143,10	162,70	19,60	<b>16025</b>	314090
A1	péage		EL JADIDA	AZEMMOUR	BIFURCATION EL JADIDA	162,70	168,60	5,90	<b>13948</b>	82293
A1	péage		EL JADIDA	PENETRANTE EL JADIDA		0,00	4,50	4,50	<b>6804</b>	30618
A1	péage		EL JADIDA	BIFURCATION EL JADIDA	EL JADIDA SUD	168,60	177,90	9,30	<b>7364</b>	68485
A1	péage		EL JADIDA	EL JADIDA SUD	JORF LASFAR	177,90	188,70	10,80	<b>7361</b>	79499
A1	péage		EL JADIDA	JORF LASFAR	SIDI SMAIL	188,70	220,90	32,20	<b>4386</b>	141229
A1	péage		EL JADIDA	SIDI SMAIL	EL OUALIDIA	220,90	264,90	44,00	<b>2598</b>	114312
A1	péage		EL JADIDA	EL OUALIDIA	SAFI NORD	264,90	297,50	32,60	<b>2231</b>	72731
A1	péage		EL JADIDA	SAFI NORD	SAFI	297,50	310,00	12,50	<b>1423</b>	17788
<b>TE A1 DE RABAT A SAFI</b>								<b>316,20</b>	<b>23245</b>	<b>7350124</b>

Pour notre cas, Rabat - Bifurcation Harrouda : **59,5 km avec un trafic de 266 789 veh/j**

Selon les données de l'ADM, le trafic routier autour du Maroc s'élève à 266 789 véhicules. La répartition de ce trafic est la suivante : 78 % de véhicules légers (VL), 12 % de poids lourds de type 1 (PL1), et 10 % de poids lourds de type 2 (PL2).

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

En appliquant ces proportions au trafic total, nous obtenons : 208 095 véhicules légers (VL), 32 014 poids lourds de type 1 (PL1), 26 679 poids lourds de type 2 (PL2). Pour l'évaluation des émissions, nous considérons que l'ensemble des véhicules circulant sur l'autoroute est équipé de moteurs diesel. Ainsi, les 208 095 VL sont assimilés à la catégorie PC5, les 32 014 PL1 à la catégorie LDT4, et les 26 679 PL2 à la catégorie C. Les catégories PC5, LDT4 et C correspondent à celles utilisées dans le tableau VI, qui sert à la détermination des facteurs d'émission.

**Détermination du taux d'émission :**

Tableau VIII : Facteur d'émission par type de véhicule

Véhicules	CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PM [g/km]	SO <sub>2</sub> [g/km]
PC5	213	0,82	0,58	0,30	0,20
LDT4	279	1,37	2,05	0,39	0,26
C	893	6,09	15,98	0,28	0,84

En multipliant les données du tableau VIII par le nombre de véhicule par catégorie on obtient :

Tableau IX Facteur d'émission en considérant le nombre total de véhicule par type

CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	PM [g/km]	SO <sub>2</sub> [g/km]
44 324 32	170638,24	120695,34	63677,19	41952,03
8 931 90	43859,18	65628,70	12677,54	8445,29
23 823 45	162469,02	426314,44	7656,58	22508,22
53081,49	259,60	421,89	57,85	50,20

Pour avoir le taux d'émission, il suffit de multiplier les résultats du tableau IX par la distance parcourue qui est 59,5 km et faire la somme par colonne. N'oublions pas de diviser le tout par 86 400 qui est le nombre de seconde dans une journée.

Tableau X : Taux d'émission par polluant

CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO <sub>x</sub> [g/s]	PM [g/s]	SO <sub>2</sub> [g/s]
53081,49	259,60	421,89	57,85	50,20

**2.4. Limite journalière : OMS et EPA**

Les recommandations sur les limites de concentration ont été établies dans des conditions standard, soit à une température de 0°C et une pression de 1 atmosphère, équivalente à la pression atmosphérique. Pour les appliquer, il est nécessaire de convertir ces limites aux

Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

conditions réelles. Nous avons opté pour les recommandations de l'OMS, car elles sont plus rigoureuses et s'appliquent à l'échelle mondiale. Dans notre cas d'étude, nous considérerons que la température moyenne ambiante à Rabat est de 20°C en conditions réelles.

**Conversion : pour le cas de CO<sub>2</sub> :**

$$1 \text{ ppm } (T = 0^\circ\text{C et } P = 1 \text{ atm}) \rightarrow \frac{M(\text{gaz})}{22,4} \times 10^3 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ avec } (T= 0^\circ\text{C et } P=1 \text{ atm})$$

$$C1 = 1000 \times \frac{12+(16 \times 2)}{22,4} \times 10^3 \quad \text{donc} \quad C1 = 1\,964\,290 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\text{Pour } T=T_{\text{amb}} \text{ et } P=1 \text{ atm on a : } C2 = C1 \times \frac{P2}{P1} \times \frac{T1}{T2} \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\text{Application numérique : } C2 = 1\,964\,290 \times \frac{1}{1} \times \frac{0+273,15}{20+273,15} \text{ donc } C2 = 1\,830\,280 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

**Conversion : pour le cas de CO :**

$$1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 (T = 0^\circ\text{C et } P = 1 \text{ atm}) \rightarrow ??? \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ avec } (T= T_{\text{amb}} \text{ et } P=1 \text{ atm})$$

$$T=T_{\text{amb}} \text{ et } P=1 \text{ atm on a : } C2 = C1 \times \frac{P2}{P1} \times \frac{T1}{T2} \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad (9)$$

$$\text{Application numérique : } C2 = 4 \cdot 10^3 \times \frac{1}{1} \times \frac{0+273,15}{20+273,15} \text{ donc } C2 = 3\,727,10 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Pour les autres polluants, on a le tableau ci-dessous :

Tableau XI : Conversion des recommandations de l'EPA et l'OMS en condition réelle

Recommandation	Polluants	Temps moyen	AQG 2021
EPA	CO <sub>2</sub>	-	1 830 280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
OMS	CO	24 heures	3 727,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
OMS	NO <sub>2</sub>	24 heures	23,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
OMS	PM <sub>2,5</sub>	24 heures	13,97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
OMS	PM <sub>10</sub>	24 heures	41,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
OMS	SO <sub>2</sub>	24 heures	37,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

## Conclusion partielle

Ce chapitre a détaillé l'application du modèle de Gauss pour évaluer la dispersion des polluants atmosphériques, en mettant en lumière les paramètres d'entrée essentiels nécessaires à une modélisation précise. Sur le plan numérique, des Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont utilisés pour obtenir des données spatiales précises, tandis que l'interpolation linéaire affine l'analyse. La programmation en Python, avec des bibliothèques comme pandas, numpy, scipy et matplotlib, permet de modéliser, analyser et visualiser les concentrations de polluants. La méthodologie présentée a démontré l'importance de prendre en compte ces paramètres pour obtenir des résultats fiables et exploitables.

## CHAPITRE 3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 3.1. Application au cas du CO<sub>2</sub>

#### 3.1.1. Calculs

*Direction du vent : 22.5° NNE*

*Vitesse du vent : 4 ms*

*Classe de stabilité : D (neutre)*

*Zone : Urbaine*

Taux d'émission calculé au préalable en fonction du trafic routier journalier :

CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO <sub>x</sub> [g/s]	PM [g/s]	SO <sub>2</sub> [g/s]
<b>53081,49</b>	259,60	421,89	57,85	50,20

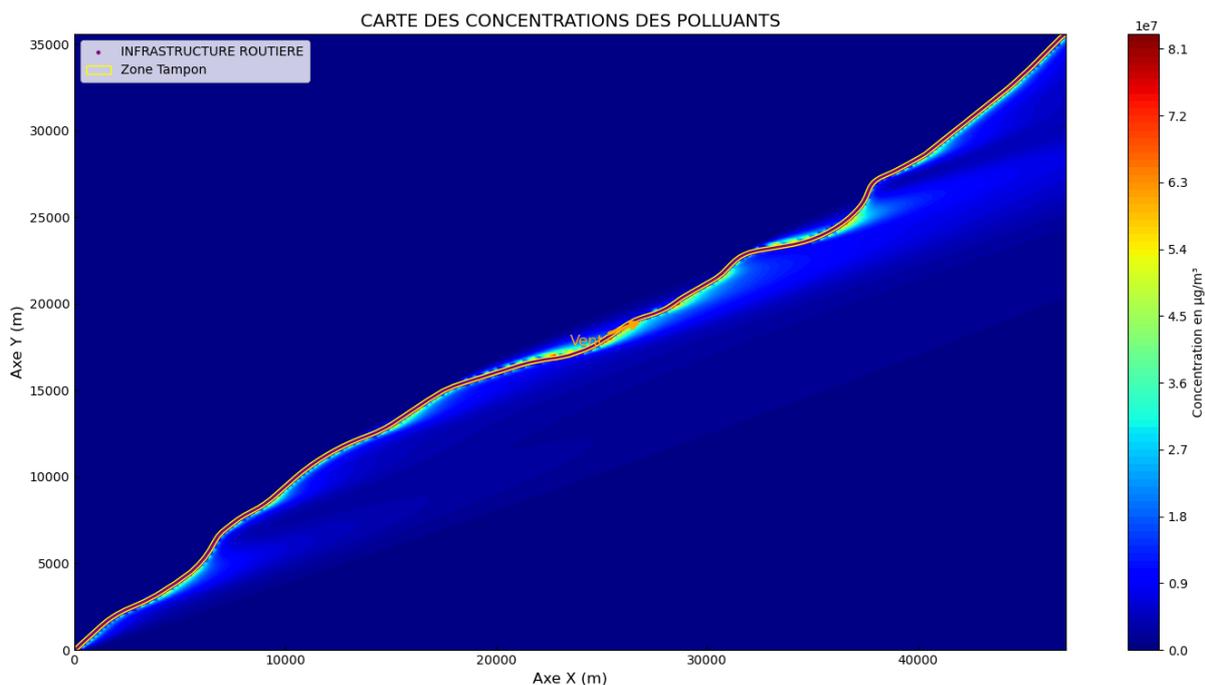


Figure 9 : Modélisation des émissions CO<sub>2</sub> dans le cas initial

#### 3.1.2 Discussion

Dans la configuration initiale, il est clairement observé que les concentrations de polluants diminuent progressivement à mesure que l'on s'éloigne de l'infrastructure routière, traduisant ainsi l'effet de dispersion naturelle des émissions dans l'atmosphère. Ce phénomène se manifeste visuellement par une transition des zones fortement exposées, représentées par des teintes chaudes, vers des zones moins impactées, marquées par des couleurs plus froides,

notamment le bleu. Cette décroissance spatiale des concentrations illustre le rôle clé de la distance par rapport à la source d'émission dans l'atténuation de la pollution.

Toutefois, malgré cet étalement, l'analyse révèle une concentration maximale alarmante de  $8,1 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à proximité immédiate de la route, dépassant largement la limite journalière recommandée par l'EPA, fixée à  $1\ 830\ 280 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce constat met en évidence la gravité de l'impact local de l'infrastructure routière en exploitation sur la qualité de l'air et souligne la nécessité d'une gestion rigoureuse des émissions en milieu urbain pour protéger les populations riveraines.

### 3.2. Application au cas du CO

#### 3.2.1. Calculs

Taux d'émission calculé au préalable en fonction du trafic routier journalier :

CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO <sub>x</sub> [g/s]	PM [g/s]	SO <sub>2</sub> [g/s]
53081,49	<b>259,60</b>	421,89	57,85	50,20

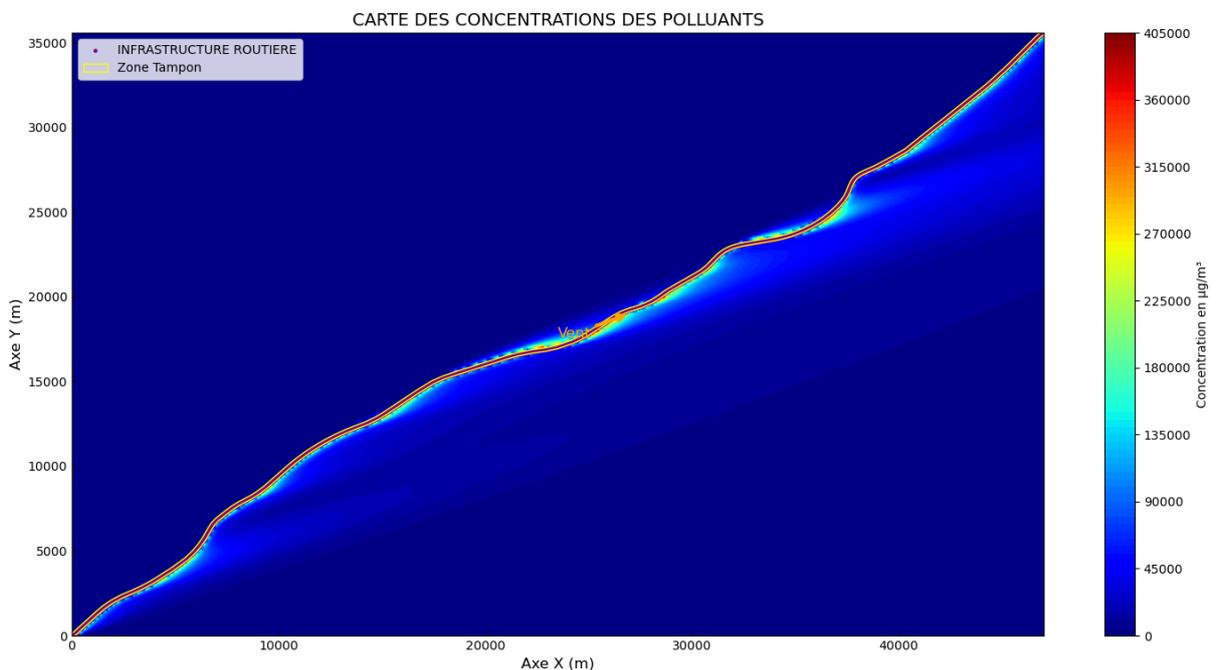


Figure 10 : Modélisation des émissions CO dans le cas initial

#### 3.2.2 Discussion

Dans la configuration initiale, on observe clairement une diminution progressive des concentrations de polluants à mesure que l'on s'éloigne de l'infrastructure routière, témoignant du processus naturel de dispersion des émissions dans l'atmosphère. Ce phénomène s'exprime

## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

visuellement par une transition nette entre les zones fortement exposées, caractérisées par des teintes chaudes, et les zones moins impactées, représentées par des couleurs plus froides, notamment des nuances de bleu. Cette décroissance spatiale illustre le rôle essentiel joué par la distance par rapport à la source d'émission dans la réduction de la pollution atmosphérique.

Toutefois, malgré cette dynamique de dispersion, l'analyse met en évidence une concentration maximale alarmante de  $4,05 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en bordure immédiate de la route, soit un niveau environ 109 fois supérieur à la limite journalière recommandée par l'OMS, établie à  $3\,727,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce constat rappelle la nécessité impérieuse de mettre en œuvre des politiques strictes de gestion des émissions routière en ville, afin de protéger efficacement les populations riveraines.

### 3.3. Application au cas du NOx

#### 3.3.1. Calculs

Taux d'émission calculé au préalable en fonction du trafic routier journalier :

CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO <sub>x</sub> [g/s]	PM [g/s]	SO <sub>2</sub> [g/s]
53081,49	259,60	<b>421,89</b>	57,85	50,20

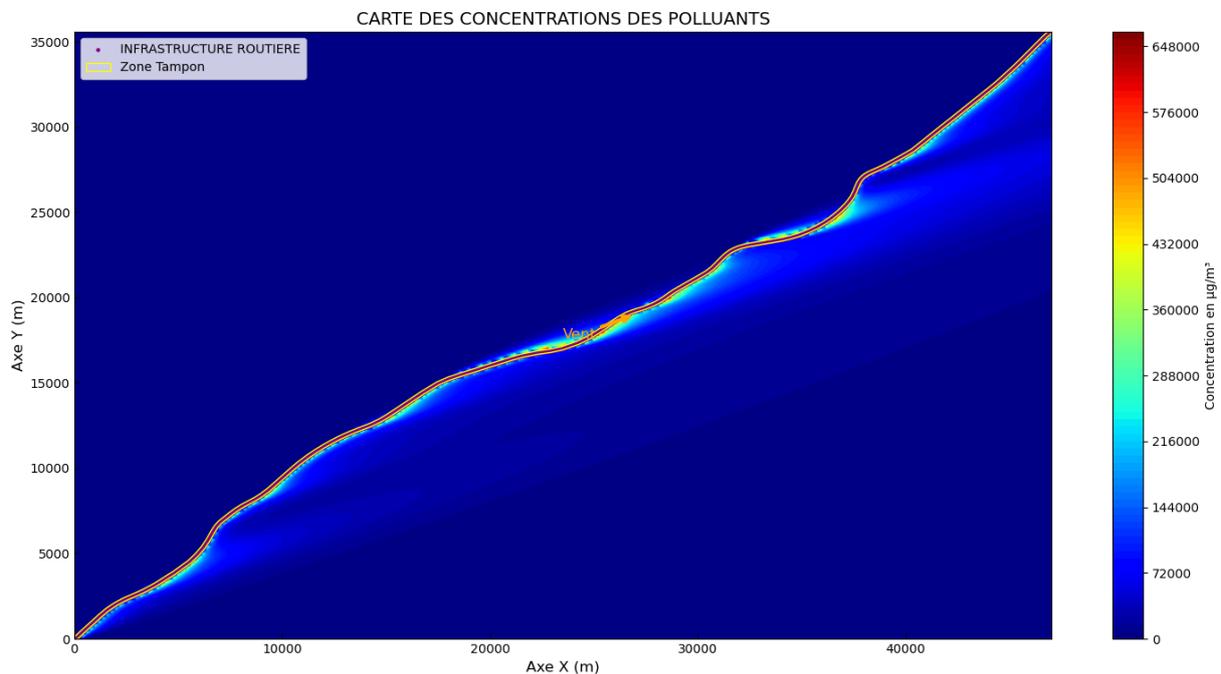


Figure 11 : Modélisation des émissions NOx dans le cas initial

#### 3.3.2 Discussion

Dans la configuration initiale, on constate nettement une diminution progressive des concentrations de polluants à mesure que l'on s'éloigne de l'infrastructure routière, traduisant

ainsi le processus naturel de dispersion des émissions dans l'atmosphère. Ce phénomène se reflète visuellement par un dégradé allant des zones fortement exposées, représentées par des teintes chaudes, vers des zones moins affectées, illustrées par des couleurs plus froides, comme le bleu. Cette décroissance spatiale met en lumière l'influence déterminante de la distance à la source d'émission sur l'atténuation de la pollution atmosphérique.

Néanmoins, en dépit de cette dispersion, l'analyse révèle une concentration maximale préoccupante de  $6,48 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  au plus près de la route, soit un niveau environ 28 000 fois supérieur à la limite journalière recommandée par l'OMS, fixée à  $23,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce constat met en évidence l'urgence d'une régulation stricte des émissions dû au trafic routier en zone urbaine afin de préserver la santé des populations riveraines.

### 3.4. Application au cas du PM

#### 3.4.1. Calculs

Taux d'émission calculé au préalable en fonction du trafic routier journalier :

CO <sub>2</sub> [g/s]	CO [g/s]	NO <sub>x</sub> [g/s]	PM [g/s]	SO <sub>2</sub> [g/s]
53081,49	259,60	421,89	<b>57,85</b>	50,20

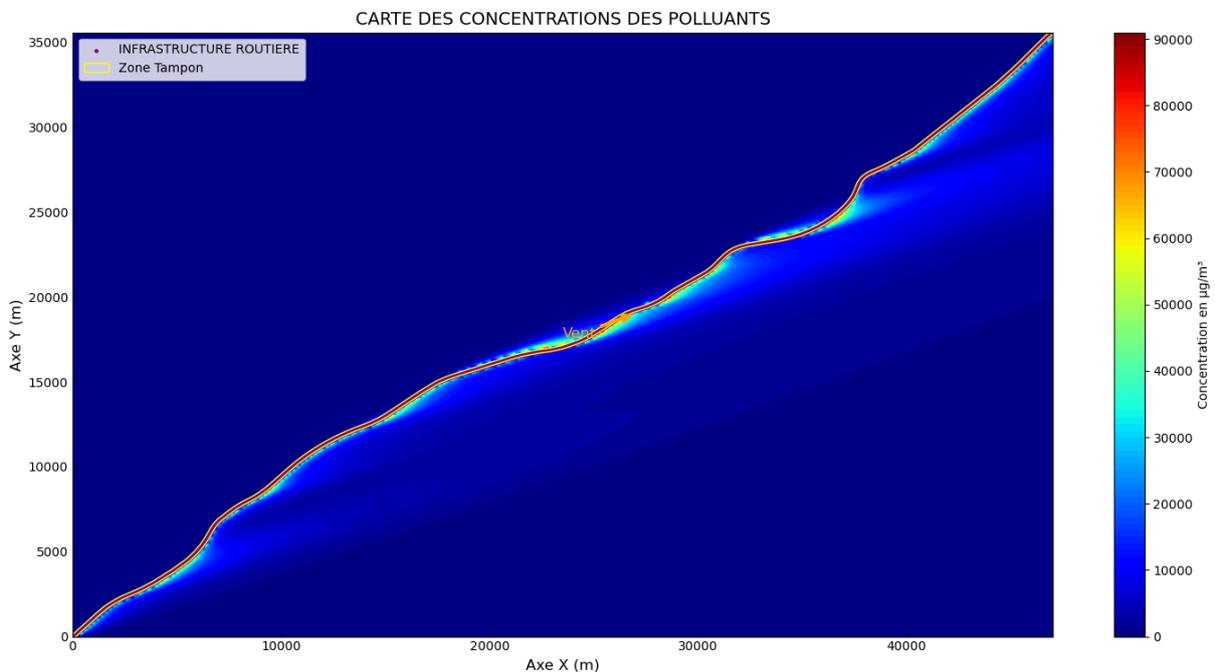


Figure 12 : Modélisation des émissions PM dans le cas initial

### 3.4.2 Discussion

Dans la configuration initiale, on observe clairement une diminution progressive des concentrations de polluants à mesure que l'on s'éloigne de l'infrastructure routière, traduisant le processus naturel de dispersion des émissions dans l'atmosphère. Ce phénomène est représenté visuellement par un dégradé de couleurs, allant des teintes chaudes des zones fortement exposées aux nuances froides des zones moins affectées, notamment le bleu. Cette décroissance spatiale illustre le rôle fondamental de la distance par rapport à la source d'émission dans la réduction de la pollution atmosphérique.

Toutefois, en dépit de cette dissémination, l'analyse met en évidence une concentration maximale préoccupante de  $9 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  au plus près de la route. Ce niveau dépasse d'environ 6 442 fois la valeur limite journalière recommandée par l'OMS pour les particules fines  $\text{PM}_{2.5}$  ( $13,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et d'environ 2 146 fois celle fixée pour les  $\text{PM}_{10}$  ( $41,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ce constat souligne la gravité de l'impact local des axes routiers sur la qualité de l'air.

### 3.5. Application au cas du $\text{SO}_2$

#### 3.5.1. Calculs

Taux d'émission calculé au préalable en fonction du trafic routier journalier :

$\text{CO}_2$ [g/s]	CO [g/s]	$\text{NO}_x$ [g/s]	PM [g/s]	$\text{SO}_2$ [g/s]
53081,49	259,60	421,89	57,85	<b>50,20</b>

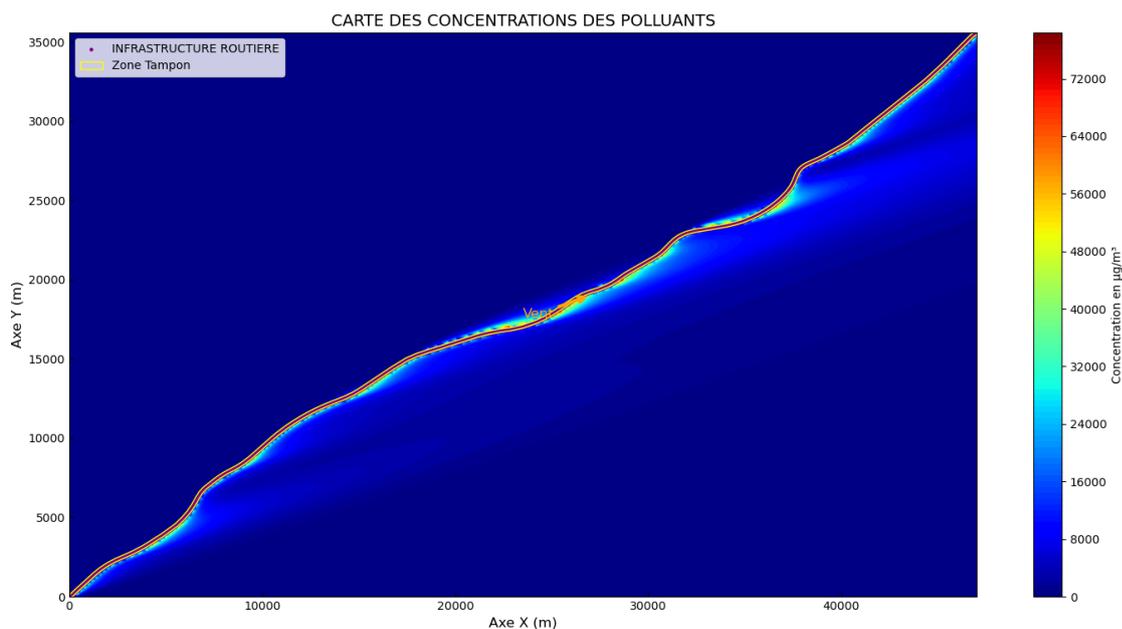


Figure 13 : Modélisation des émissions  $\text{SO}_2$  dans le cas initial

### 3.5.2 Discussion

Dans la configuration de départ, une décroissance progressive des concentrations de polluants est nettement observable à mesure que l'on s'éloigne de l'axe routier, traduisant le mécanisme naturel de dispersion des émissions dans l'atmosphère. Cette dynamique est illustrée par un dégradé chromatique, passant des couleurs chaudes dans les zones les plus exposées aux teintes froides, notamment le bleu, dans les secteurs moins touchés. Cette variation spatiale met en évidence l'influence déterminante de la distance à la source d'émission sur la diminution de la pollution de l'air.

Cependant, malgré cette dispersion, l'analyse révèle une concentration maximale préoccupante de  $7,2 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à proximité immédiate de l'infrastructure routière. Cette valeur excède d'environ 1933 fois le seuil journalier recommandé par l'OMS, fixé à  $37,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Un tel dépassement témoigne de l'impact significatif et localisé des axes de circulation sur la dégradation de la qualité de l'air.

Pour mieux apprécier les résultats, nous allons choisir un point d'intérêt et vérifier la concentration des différents polluants.

Tableau XII Concentration des différents polluants au niveau d'un point d'intérêt (1000,100)

Polluants	Concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	PM	SO <sub>2</sub>
(0,0)	0	0	0	0	0
(1000, 100)	180116,86	880,88	1431,59	196,31	170,36
<b>Norme EPA</b>	<b>1 830 280</b>				
<b>Norme OMS</b>		<b>3 727,10</b>	<b>23,29</b>	<b>41,93 (PM<sub>10</sub>)</b> <b>13,97 (PM<sub>2,5</sub>)</b>	<b>37,27</b>

### 3.6. Etude de sensibilité en un point : Cas de CO<sub>2</sub>

#### 3.6.1. Influence de la zone

Cette étude de sensibilité vise à évaluer comment les variations de zone (rurale ou urbaine) influencent la dispersion des polluants dans l'environnement. Un scénario unique est envisagé.

- **Zone rurale** : D'une zone urbaine (zone standard du projet) vers la zone rurale.

L'objectif de cette analyse est d'identifier les tendances et l'ampleur des variations de pollution en fonction de la zone. Les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre la relation

entre la zone et la pollution atmosphérique. Les résultats détaillés et l'analyse – interprétation de ce scénario sont en **annexe**.

Ci-après un tableau pour observer la variation de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en fonction de la zone, pour un point donné :

Tableau XIII : Sensibilité liée à la zone

	Urbaine	Rurale
(0,0)	0	0
(1000,100)	180 116,86	1 889,03

### 3.6.2. Influence de la direction du vent

En modifiant la trajectoire du vent, nous modifions également celle du panache de pollution, elle influence les zones impactées ainsi que les niveaux de concentration. Pour cette étude :

- **Nord (N)** : Vent soufflant du nord vers le sud.
- **Nord-Est (NE)** : Vent soufflant du nord-est vers le sud-ouest.
- **Est (E)** : Vent soufflant de l'est vers l'ouest.
- **Sud-Est (SE)** : Vent soufflant du sud-est vers le nord-ouest.
- **Sud (S)** : Vent soufflant du sud vers le nord.
- **Sud-Ouest (SO)** : Vent soufflant du sud-ouest vers le nord-est.
- **Ouest (O)** : Vent soufflant de l'ouest vers l'est.
- **Nord-Ouest (NO)** : Vent soufflant du nord-ouest vers le sud-est.

L'objectif est de quantifier l'impact de chaque direction sur la dispersion des polluants et d'identifier les configurations les plus favorables à leur dilution ou non. Les résultats détaillés l'analyse – interprétation pour chaque direction sont en **annexe**.

Ci-après un tableau pour observer la variation de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en fonction de la direction du vent, pour un point donné :

Tableau XIV : Sensibilité liée à la direction du vent

Points	N	NNE	NE	E	SE	S	SO	O	NO
(0,0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1000,100)	$8,06 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^5$	0,039	0	0	$1,24 \cdot 10^{-14}$	$1,44 \cdot 10^7$	$9,26 \cdot 10^6$	$8,98 \cdot 10^6$

### 3.6.3. Influence de la vitesse du vent

La vitesse du vent est un facteur clé dans la dispersion des polluants atmosphériques. Une vitesse élevée favorise la dilution et l'éloignement des polluants, tandis qu'une vitesse faible peut entraîner une accumulation locale et des concentrations plus élevées.

Pour cette étude, plusieurs scénarios ont été considérés, en modifiant la vitesse du vent par rapport au cas de référence :

- **Vitesse /4** : Vitesse du vent divisée par 4.
- **Vitesse /3** : Vitesse du vent divisée par 3.
- **Vitesse /2** : Vitesse du vent divisée par 2.
- **Vitesse x2** : Vitesse du vent multipliée par 2.
- **Vitesse x3** : Vitesse du vent multipliée par 3.
- **Vitesse x4** : Vitesse du vent multipliée par 4.

L'objectif est d'évaluer comment la variation de la vitesse du vent modifie la concentration des polluants dans l'air. L'analyse des résultats issus de ces simulations permettra de mieux comprendre l'effet de la vitesse du vent sur la pollution atmosphérique et d'anticiper les conditions les plus propices à une dispersion efficace. Les résultats détaillés l'analyse – interprétation de chaque scénario sont présentés en **annexe**.

Ci-après un tableau pour observer la variation de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en fonction de la vitesse du vent, pour un point donné :

Tableau XV : Sensibilité liée à la vitesse

	V/4	V/3	V/2	V	Vx2	Vx3	Vx4
(0,0)	0	0	0	0	0	0	0
(1000,100)	720467,45	541704,85	360233,72	180116,86	90058,43	60038,95	45029,21

### 3.6.4. Influence de la stabilité de l'atmosphère

La stabilité atmosphérique joue un rôle fondamental dans la dispersion des polluants. Elle détermine la turbulence de l'air et influence directement la diffusion verticale et horizontale des émissions. Le modèle de Gauss prend en compte cette stabilité à travers des classes définies selon la classification de Pasquill, allant de conditions très instables (favorisant la dispersion) à très stables (limitant la diffusion et favorisant l'accumulation des polluants).

Pour cette étude de sensibilité, six classes de stabilité ont été considérées :

- **Classe A** : Atmosphère très instable, forte turbulence et dispersion maximale.
- **Classe B** : Atmosphère instable, dispersion importante des polluants.
- **Classe C** : Atmosphère légèrement instable, dispersion modérée.
- **Classe D** : Atmosphère neutre, dispersion moyenne, souvent en conditions nuageuses.
- **Classe E** : Atmosphère stable, dispersion limitée, favorisant des concentrations élevées à proximité de la source.
- **Classe F** : Atmosphère très stable, dispersion minimale, souvent observée la nuit avec peu de vent, entraînant une accumulation locale des polluants.

L'objectif est d'évaluer comment ces différentes conditions de stabilité influencent la répartition des concentrations. En situation instable (classe A ou B), la diffusion est rapide, ce qui diminue les concentrations locales. En revanche, en conditions stables (classe E ou F), la dispersion est fortement réduite, augmentant ainsi les niveaux de pollution dans les zones proches de la source. Les résultats détaillés l'analyse – interprétation de chaque cas sont présentés en **annexe**.

Ci-après un tableau pour observer la variation de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en fonction de la classe de stabilité, pour un point donné :

Tableau XVI : Sensibilité liée à la classe de stabilité

	A	B	C	D	E	F
(0,0)	0	0	0	0	0	0
(1000,100)	606 425,81	606 425,81	423 919,18	180 116,86	21 959,26	21 959,26

### 3.6.5. Influence du trafic

Dans cette section, nous analysons l'impact du trafic routier sur la dispersion des polluants atmosphériques en utilisant un modèle gaussien. Cette étude de sensibilité permet d'évaluer comment les variations du flux de véhicules influencent la dispersion des polluants.

- **Trafic /4** : Réduction du trafic à environ 25% de la valeur de référence.
- **Trafic /3** : Réduction du trafic à environ 33 % de la valeur de référence.
- **Trafic /2** : Réduction du trafic à 50 % de la valeur de référence.
- **Trafic x2** : Doublement du trafic par rapport à la valeur de référence.
- **Trafic x3** : Triplement du trafic par rapport à la valeur de référence.
- **Trafic x4** : Quadruplement du trafic par rapport à la valeur de référence.

L'objectif de cette analyse est d'identifier les tendances et l'ampleur des variations de pollution en fonction du trafic. Les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre la relation

entre la densité du trafic et la pollution atmosphérique, et d'évaluer l'impact potentiel de mesures de régulation du trafic sur la qualité de l'air. Les résultats détaillés l'analyse – interprétation sont en **annexe**.

Ci-après un tableau pour observer la variation de concentration (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en fonction du trafic, pour un point donné :

Tableau XVII : Sensibilité liée au trafic

	T/100	T/4	T/2	T	Tx2	Tx4
(0,0)	0	0	0	0	0	0
(1000,100)	1801,16	45029,21	90058,43	180116,86	360233,72	720467,45

### 3.7. Solutions

Pour atténuer la pollution atmosphérique, il est essentiel de jouer sur plusieurs paramètres clés identifiés dans cette étude. Premièrement, bien que la direction et la vitesse du vent soient incontrôlables, des stratégies d'urbanisme peuvent être mises en place pour optimiser la dispersion naturelle des polluants, comme l'aménagement de corridors verts ou l'orientation des infrastructures par rapport aux vents dominants. Aussi, et surtout, la réduction du taux d'émission est cruciale. Cela peut être réalisé par des politiques de limitation du trafic, la promotion de véhicules à faibles émissions, et l'encouragement des transports en commun et des mobilités douces. En agissant sur ces paramètres, il est possible de réduire significativement l'impact de la pollution atmosphérique et d'améliorer la qualité de l'air pour les populations.

### 3.8. Recommandations

#### 3.8.1. Promotion des transports alternatifs

Pour atténuer la pollution atmosphérique, il est impératif de mettre en œuvre des politiques ciblées et des initiatives pratiques. Augmenter les taxes d'importation des véhicules diesel pourrait dissuader leur utilisation et encourager l'adoption de véhicules plus propres.

L'installation de postes de péage tous les 5 km sur l'axe routier Rabat-Casablanca pourrait inciter les automobilistes à privilégier les transports en commun plutôt que les véhicules individuels. La mise en place d'une navette toutes les heures sur cet axe routier offrirait une alternative fiable et fréquente, réduisant ainsi le nombre de véhicules personnels sur la route.

De plus, améliorer les conditions de transport ferroviaire, en termes de confort, de prix et de ponctualité, rendrait le train plus attractif pour les usagers, contribuant ainsi à une réduction significative des émissions liées au transport routier.

### **3.8.2. Sensibilisation du public**

Malgré toutes les solutions envisageables, aucune ne portera véritablement ses fruits sans une sensibilisation efficace. La sensibilisation est, en effet, l'aspect le plus complexe et le plus chronophage de cette démarche. Cependant, elle est indispensable, quel que soit le temps qu'elle nécessite. Il est crucial de persévérer jusqu'à ce que les comportements écoresponsables deviennent une seconde nature pour chacun. L'objectif est d'éveiller les consciences sur les enjeux environnementaux liés au transport routier. Il s'agit d'informer et d'éduquer la population sur l'impact de ses choix de mobilité, en mettant en lumière les avantages des transports en commun et du train. En encourageant l'adoption de ces alternatives, nous pouvons collectivement réduire notre empreinte écologique et contribuer à un avenir plus durable.

### **Conclusion partielle**

Ce chapitre a permis d'évaluer l'impact des émissions de polluants atmosphériques le long de l'autoroute A1 à l'aide d'un modèle de dispersion, en intégrant des données météorologiques et des taux d'émission. Les simulations ont révélé des tendances significatives pour divers polluants, tels que le CO<sub>2</sub>, le CO, les NO<sub>x</sub>, les PM et le SO<sub>2</sub>, mettant en évidence une diminution des concentrations avec l'éloignement de la source, mais aussi des niveaux alarmants près de la route, dépassant souvent les normes de l'OMS et de l'EPA.

L'analyse de sensibilité a montré que la dispersion des polluants est influencée par plusieurs facteurs, notamment le contexte rural ou urbain, la direction et la vitesse du vent, la stabilité atmosphérique et le trafic. Ces résultats soulignent l'importance de la distance par rapport à la source d'émission et la nécessité de politiques strictes de gestion des émissions pour protéger les populations locales.

Enfin, plusieurs stratégies d'atténuation de la pollution atmosphérique liée au transport routier ont été proposées, telles que l'optimisation de l'urbanisme, la promotion des transports en commun et des véhicules à faibles émissions, ainsi que l'intégration de technologies vertes. La sensibilisation du public reste également essentielle pour encourager des comportements écoresponsables. En combinant ces approches, il est possible de réduire significativement la pollution atmosphérique et d'améliorer la qualité de l'air pour les populations.

## CONCLUSION GENERALE

---

Cette étude a permis de mettre en lumière les différentes dimensions du problème de la pollution atmosphérique liée au transport routier au Maroc. En explorant les types de polluants et les réglementations établies par des organismes tels que l'OMS et l'EPA, nous avons pu comprendre les limites imposées pour protéger la santé publique et l'environnement. L'analyse des modèles de dispersion, notamment le modèle gaussien, a révélé les avantages et les limitations de ces outils dans l'évaluation de la pollution de l'air. Les paramètres influençant la dispersion et les hypothèses nécessaires pour modéliser une source linéaire ont été examinés en détail, offrant une base solide pour des études plus approfondies.

L'application du modèle de Gauss pour évaluer la dispersion des polluants atmosphériques a été détaillée, mettant en lumière les paramètres d'entrée essentiels nécessaires à une modélisation précise. La méthodologie présentée a démontré l'importance de prendre en compte ces paramètres pour obtenir des résultats fiables et exploitables.

En conclusion, cette étude pose les bases nécessaires pour aborder les prochaines étapes de cette recherche, visant à proposer des solutions innovantes pour un transport plus durable et respectueux de l'environnement. Les recommandations formulées, telles que la promotion des transports alternatifs, la sensibilisation du public, et l'intégration des technologies vertes, offrent des pistes concrètes pour réduire l'impact environnemental du transport routier. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'explorer l'intégration de ces solutions dans des politiques publiques et des initiatives privées, afin de transformer nos habitudes de transport et de protéger notre environnement.

Des études complémentaires pourraient également examiner l'impact d'autres facteurs, tels que la topographie ou les variations saisonnières, sur la dispersion des polluants. Enfin, le développement de technologies avancées, telles que les capteurs en temps réel et les systèmes d'information géographique (SIG), pourrait améliorer la précision des modèles et faciliter la prise de décision. En investissant dans ces domaines, nous pouvons non seulement réduire notre empreinte carbone, mais aussi stimuler l'innovation et créer des opportunités économiques durables.

## **Bibliographie**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] 4e rapport sur l'état de l'environnement au Maroc, (n.d.). [https://www.environnement.gov.ma/images/2021/rapport/REEM4-VERSION\\_INTEGRALE.pdf](https://www.environnement.gov.ma/images/2021/rapport/REEM4-VERSION_INTEGRALE.pdf) (accessed February 3, 2025).
- [2] F. Nisticò, G. Messina, C. Quercioli, S. Errico, E. Fanti, E. Frilli, M. Postiglione, A. De Luca, A. D'Urso, N. Nante, Can "fine scale" data on air pollution be an evaluation tool for public health professionals?, *Atmospheric Pollut. Res.* 16 (2025) 102487. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102487>.
- [3] What are the WHO Air quality guidelines?, (n.d.). <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines> (accessed March 22, 2025).
- [4] O. US EPA, NAAQS Table, (2014). <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naqs-table> (accessed March 22, 2025).
- [5] Sheldon, M.R., *Simulation*, Elsevier Academic Press, USA, 2006.
- [6] Oberkampf, W.L., Roy, C.J., *Verification and Validation in Scientific Computing*, Cambridge University Press, USA, 2010.
- [7] Berkowicz, R., Hertel, O., Larsen, S.E., Sørensen, N.N., Nielsen, M., *Modelling traffic pollution in streets*, Ministry of Environment and Energy National Environmental Research Institute, 1997.
- [8] M. Fallah Shorshani, C. Seigneur, L. Polo Rehn, H. Chanut, Y. Pellan, J. Jaffrezo, A. Charron, M. André, Atmospheric dispersion modeling near a roadway under calm meteorological conditions, *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 34 (2015) 137–154. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.013>.
- [9] H. Forehead, N. Huynh, Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science, *Environ. Pollut.* 241 (2018) 775–786. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.019>.
- [10] *Approved Methods for the Modelling and Assessment of Air Pollutants in New South Wales*, NSW Environment Protection Authority, 2022.
- [11] Colls, J., *Air Pollution*, Second Edition, Spon Press, Taylor & Francis Group, 2002.
- [12] Jacobson, M.Z., *ATMOSPHERIC POLLUTION: HISTORY, SCIENCE, AND REGULATION*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, 2002.
- [13] Wang, L.K., Pereira, N.C., Hung, Y.-T., *Air pollution control engineering*, Humana Press, Totowa, N.J, 2004.
- [14] G.A. Davidson, A Modified Power Law Representation of the Pasquill-Gifford Dispersion Coefficients, *J. Air Waste Manag. Assoc.* 40 (1990) 1146–1147. <https://doi.org/10.1080/10473289.1990.10466761>.
- [15] R. Briant, I. Korsakissok, C. Seigneur, An improved line source model for air pollutant dispersion from roadway traffic, *Atmos. Environ.* 45 (2011) 4099–4107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.016>.
- [16] C.W. Miller, An examination of gaussian plume dispersion parameters for rough terrain, *Atmospheric Environ.* 1967 12 (1978) 1359–1364. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90076-8).
- [17] Y. Xing, P. Brimblecombe, Dispersion of traffic derived air pollutants into urban parks, *Sci. Total Environ.* 622–623 (2018) 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.340>.
- [18] N. Lotrecchiano, D. Sofia, A. Giuliano, D. Barletta, M. Poletto, *Pollution Dispersion from*

- a Fire Using a Gaussian Plume Model, *Int. J. Saf. Secur. Eng.* 10 (2020) 431–439. <https://doi.org/10.18280/ijssse.100401>.
- [19] *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, United States of America, 1988.
- [20] Ghetti, F., Checcucci, G., Bornman, J.F., *Environmental UV Radiation: Impact on Ecosystems and Human Health and Predictive Models*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2006. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3697-3>.
- [21] Zhang, K., Batterman, S., Air pollution and health risks due to vehicle traffic, *Sci. Total Environ.* (2013) 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>.
- [22] Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmos. Environ.* (2003) 155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9).
- [23] Karner, A.A., Eisinger, D.S., Niemeier, D.A., Near-Roadway Air Quality: Synthesizing the Findings from Real-World Data, *Env. Sci Technol* (2010) 5334–5344. <https://doi.org/10.1021/es100008x>.
- [24] Ropkins, K., Tate, J.E., Early observations on the impact of the COVID-19 lockdown on air quality trends across the UK, *Sci. Total Environ.* (2021) 142374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142374>.
- [25] P. Füle, G. Kristóf, Estimation of local tracer gas concentration probability from minimum input data, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 179 (2018) 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.015>.
- [26] P. Bessemoulin, M. Benarie, Contribution a l'étude de la diffusion des polluants gazeux dans l'atmosphère, *Atmospheric Environ.* 1967 8 (1974) 261–279. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(74\)90093-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(74)90093-6).
- [27] Gifford, F. A., Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion, 2 (1961) 47–51.
- [28] ADM-Rapport annuel et ESG, (n.d.). <https://www.adm.co.ma/sites/default/files/publications/rfa-2023.pdf> (accessed January 22, 2025).
- [29] Ministère de l'équipement et de l'eau, Ministère de l'équipement et de l'eau, (n.d.). <https://www.equipement.gov.ma/Infrastructures-Routieres/Reseau-Routier-du-Royaume/Pages/Trafic-Routier.aspx> (accessed January 22, 2025).
- [30] ADM, Le trafic en temps réel, ADM (2025). <http://www.adm.co.ma/fr/le-traffic-en-temps-reel> (accessed March 17, 2025).
- [31] ADM, ADM en bref, ADM (2025). <http://www.adm.co.ma/fr/adm-en-bref> (accessed March 17, 2025).
- [32] MINISTERE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE, Efficacité énergétique dans le transport, (n.d.). <https://www.mem.gov.ma/Pages/secteur.aspx?e=3&prj=47> (accessed January 27, 2025).
- [33] R. Ezzaher, A. Bouklata, Evaluation of urban transport's impacts on the environment: The case of Fez city, *Altern. Manag. Econ.* 4 (2022) 404–424. <https://doi.org/10.48374/IMIST.PRSM/ame-v4i1.30503>.
- [34] S. Coelho, J. Ferreira, V. Rodrigues, M. Lopes, Source apportionment of air pollution in European urban areas: Lessons from the ClairCity project, *J. Environ. Manage.* 320 (2022) 115899. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115899>.
- [35] Ministère du Transport et de la Logistique - Royaume du Maroc - Ministry of Transport and Logistics, (n.d.). <https://www.transport.gov.ma/Pages/accueil.aspx> (accessed March 17, 2025).
- [36] Aivam, Documentation et études | Aivam, (n.d.). <https://www.aivam.ma/documentation-et-etudes> (accessed January 27, 2025).

- [37] Aivam, Marché automobile au Maroc | Aivam, (n.d.). <https://www.aivam.ma/fr/marche-automobile-au-maroc> (accessed January 27, 2025).
- [38] G. Valotto, G. Rampazzo, F. Visin, F. Gonella, E. Cattaruzza, A. Glisenti, G. Formenton, P. Tieppo, Environmental and traffic-related parameters affecting road dust composition: A multi-technique approach applied to Venice area (Italy), *Atmos. Environ.* 122 (2015) 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.006>.
- [39] OCDE, Études économiques de l'OCDE : Maroc 2024, OCDE (2024). [https://www.oecd.org/fr/publications/etudes-economiques-de-l-ocde-maroc-2024\\_1aad09d0-fr.html](https://www.oecd.org/fr/publications/etudes-economiques-de-l-ocde-maroc-2024_1aad09d0-fr.html) (accessed January 30, 2025).
- [40] Bai, X., Chen, H., Oliver, B.G., The health effects of traffic-related air pollution: A review focused the health effects of going green, *Chemosphere* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133082>.
- [41] Matzoros, A., Van Vliet, D., A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: Part I — model description, *Transp. Res. Part Policy Pract.* (1992) 315–330. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(92\)90019-4](https://doi.org/10.1016/0965-8564(92)90019-4).
- [42] E. Ferrero, S. Alessandrini, B. Anderson, E. Tomasi, P. Jimenez, S. Meech, Lagrangian simulation of smoke plume from fire and validation using ground-based lidar and aircraft measurements, *Atmos. Environ.* 213 (2019) 659–674. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.049>.
- [43] Pasquill, F., The Estimation of Dispersion of Windborne Material, 90 (1961) 33–49.
- [44] J.D.W. Kahl, H.L. Chapman, Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation, *Atmos. Environ.* 187 (2018) 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.058>.
- [45] F. Pilla, B. Broderick, A GIS model for personal exposure to PM10 for Dublin commuters, *Sustain. Cities Soc.* 15 (2015) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.10.005>.
- [46] A. D'Angiola, L.E. Dawidowski, D.R. Gómez, M. Osses, On-road traffic emissions in a megacity, *Atmos. Environ.* 44 (2010) 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.004>.
- [47] La boussole - A l'école du P'tit Sentier, (n.d.). <https://sites.ac-nancy-metz.fr/eco-du-petit-sentier-arzwiller/spip.php?article1329> (accessed February 26, 2025).

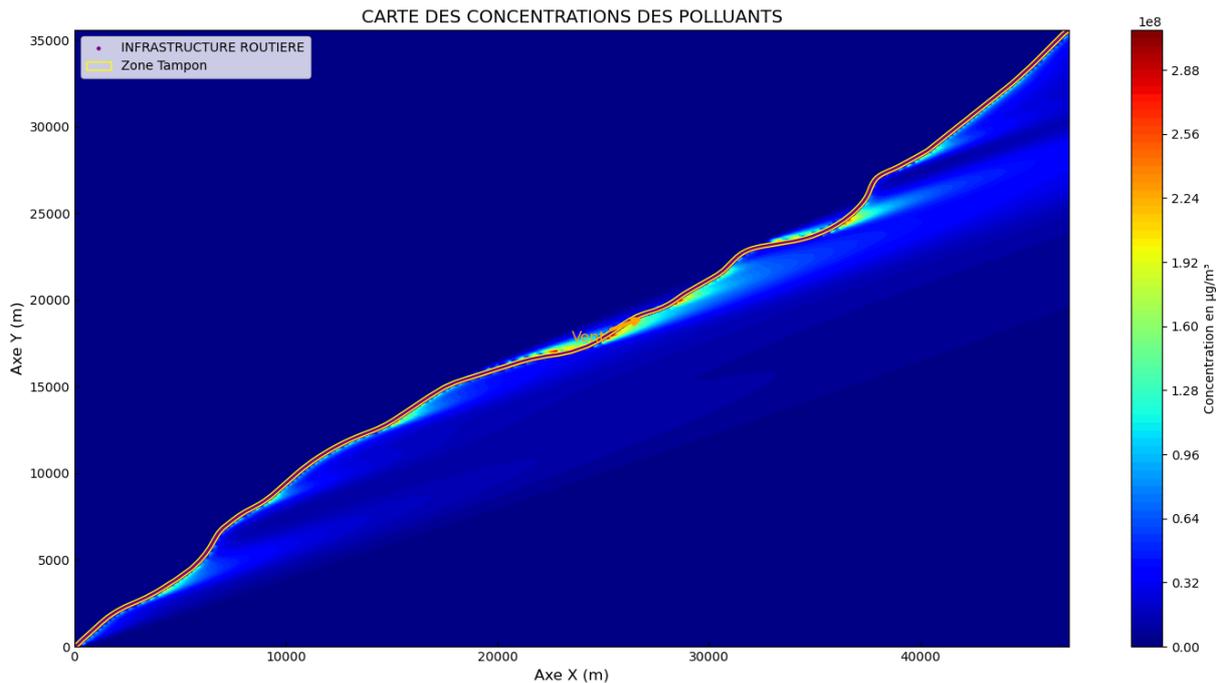
## **Annexes**

## ANNEXE 1 : MODELISATION DE CO2

Origine : Casablanca ; Extrémité : Rabat ; Données d'entrée : Données de Rabat

### Variation de la zone

#### Zone rurale

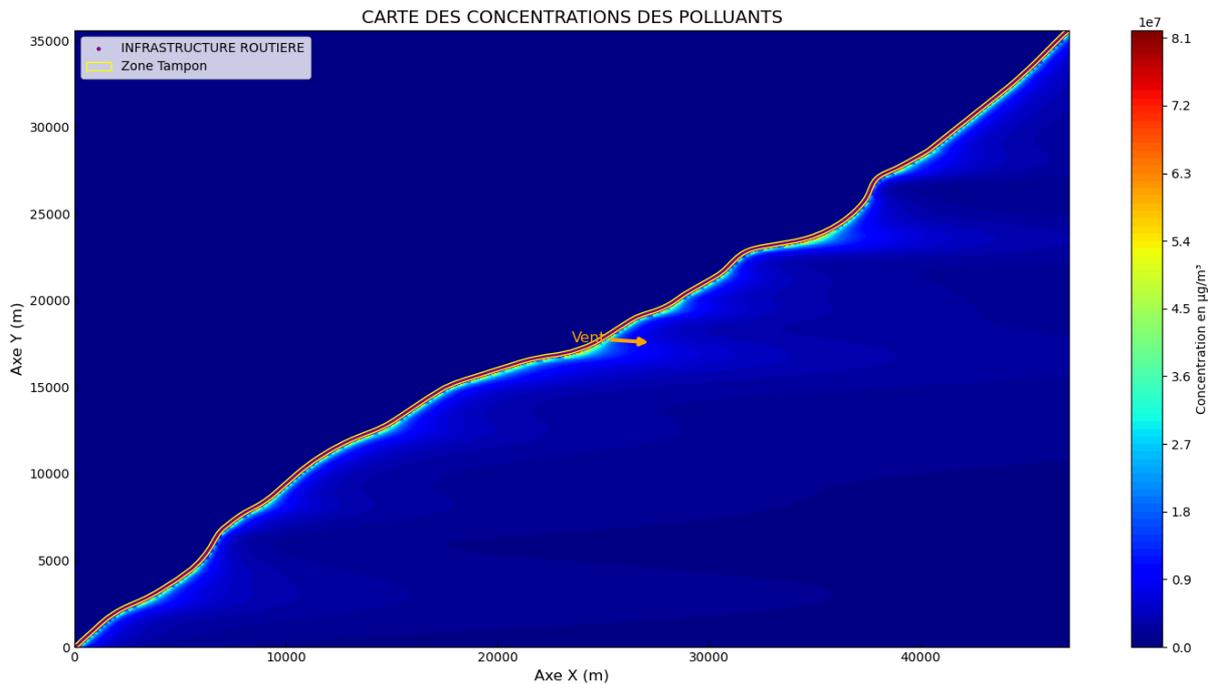


Dans le scénario étudié, la concentration maximale en milieu rural atteint  $2,88 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pour un point donné localisé dans l'espace, tel que le point (1000, 100), la concentration en zone rurale est de  $1\,889,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit 95 fois plus faible qu'en zone urbaine, où elle s'élève à  $180\,116,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette concentration rurale est inférieure à la limite réglementaire fixée par l'EPA, qui est de  $1\,830\,280 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce contraste met en évidence les effets différenciés des caractéristiques environnementales sur le confinement ou la dispersion des émissions.

En zone urbaine, les nombreux obstacles tels que les bâtiments, les murs antibruit ou les panneaux publicitaires créent un environnement semi-fermé où les flux d'air sont canalisés, ralentis ou déviés. Cette complexité structurelle limite la circulation atmosphérique, favorisant une accumulation locale des polluants dans un volume restreint. À l'inverse, en zone rurale, la configuration plus dégagée du paysage permet une dispersion plus large des polluants.

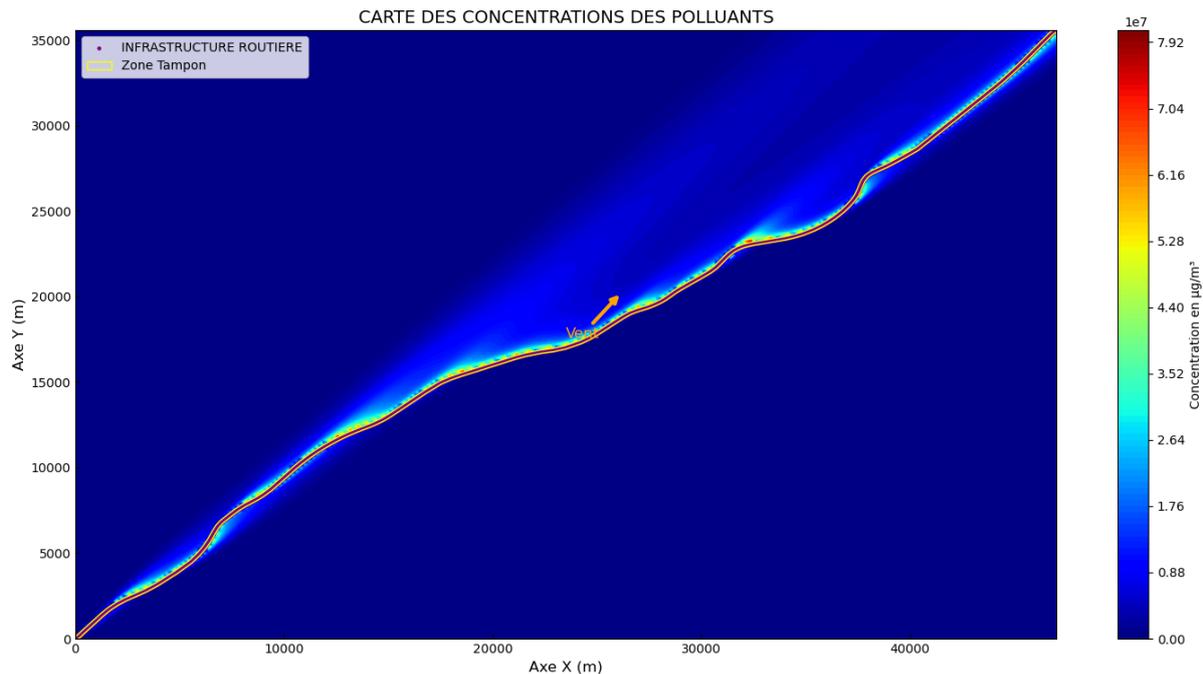
## Variation de la direction du vent

### Direction Nord



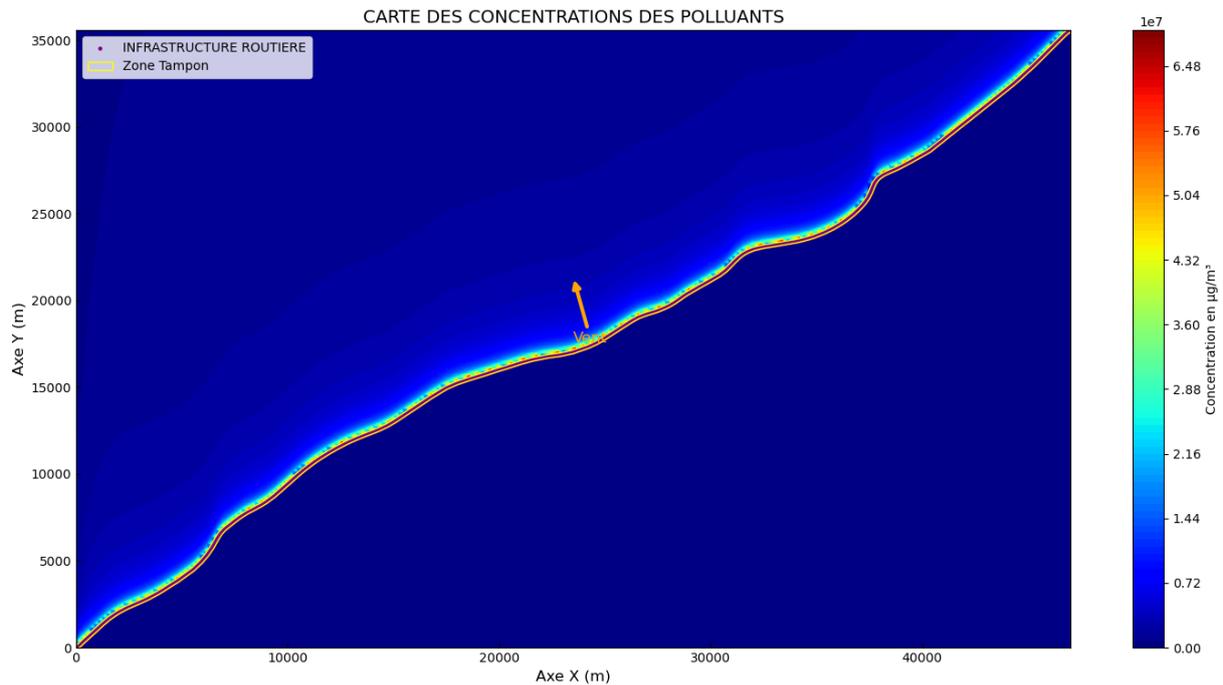
La concentration de polluants au point (1000, 100) pour la direction Nord est de  $8,06 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ce qui représente une valeur extrêmement élevée. Comparée à la limite journalière fixée par l'EPA ( $1\,830\,280 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), cette concentration est **4 fois** plus petite. En outre, par rapport à la concentration initiale de  $1,80 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cette valeur est **45 fois plus élevée**. Cette accumulation massive s'explique par le fait que le point est situé directement dans l'axe du vent. Le vent soufflant plein nord transporte les émissions directement vers ce point, favorisant une concentration locale extrêmement élevée. Cela met en évidence le risque sanitaire et environnemental associé à cette direction du vent, nécessitant des mesures urgentes pour réduire les émissions ou protéger les zones exposées.

## Direction vent NE

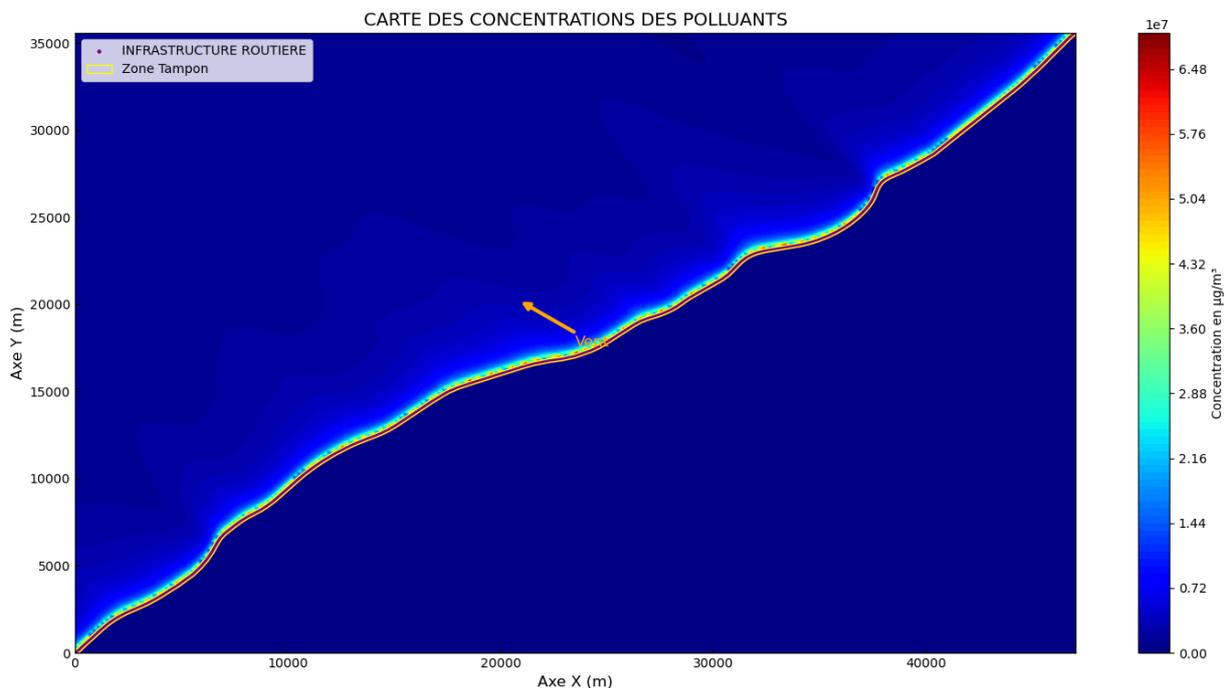


La concentration de polluants au point (1000, 100) pour la direction Nord-Est est de **0,039 µg/m<sup>3</sup>**, une valeur extrêmement faible. Comparée à la limite réglementaire de l'EPA, cette concentration est bien en dessous de la norme, ce qui est rassurant. Par rapport à la concentration initiale de  $1,80 \times 10^5$  µg/m<sup>3</sup>, cette valeur est **4,6 millions de fois plus faible**. Cette réduction drastique s'explique par le fait que le point est situé hors de l'axe principal du vent. Le vent soufflant dans cette direction disperse les polluants loin du point d'intérêt, permettant une meilleure dilution des émissions dans l'environnement. Cela montre que les directions de vent perpendiculaires ou obliques à l'axe routier peuvent significativement réduire les concentrations de polluants.

## Direction E

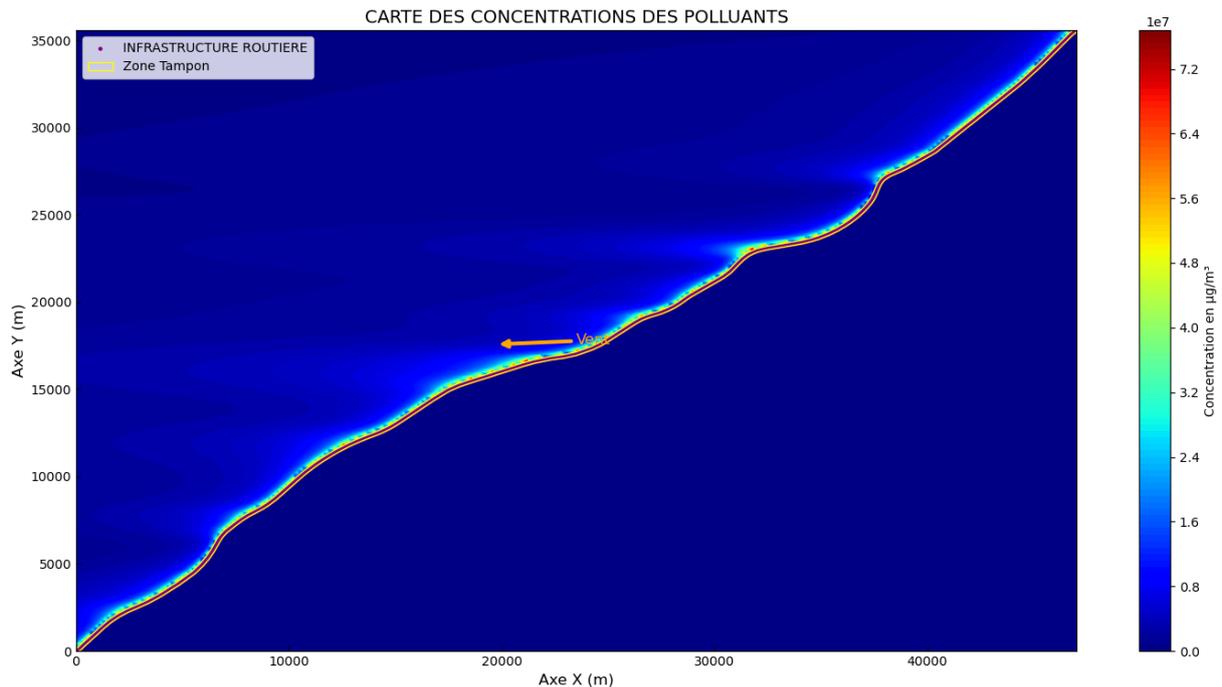


## Direction SE



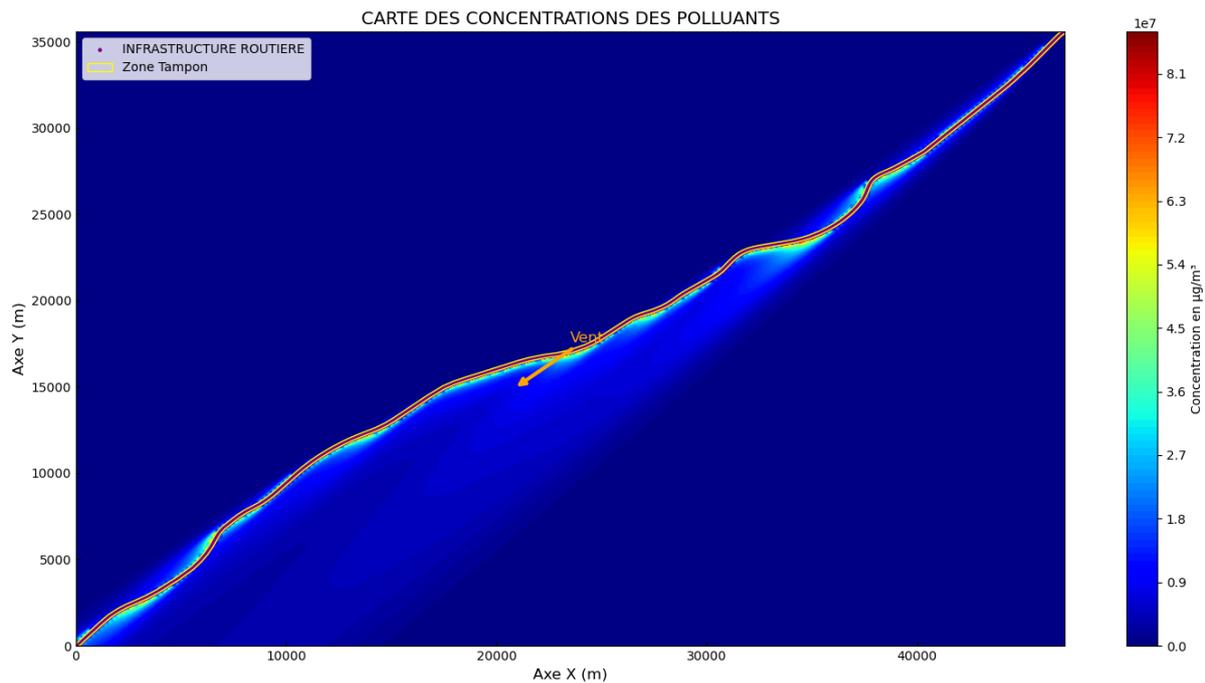
Les concentrations de polluants au point (1000, 100) pour les directions Est et Sud-Est sont identiques, avec une valeur de  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lorsque le vent est orienté vers l'Est ou le Sud-Est, il disperse les émissions loin du point d'intérêt, empêchant ainsi toute accumulation de polluants à cet endroit. En prenant en compte ces directions dans la modélisation, il est possible d'anticiper les zones à faible risque et d'adapter les stratégies de réduction des émissions.

## Direction S



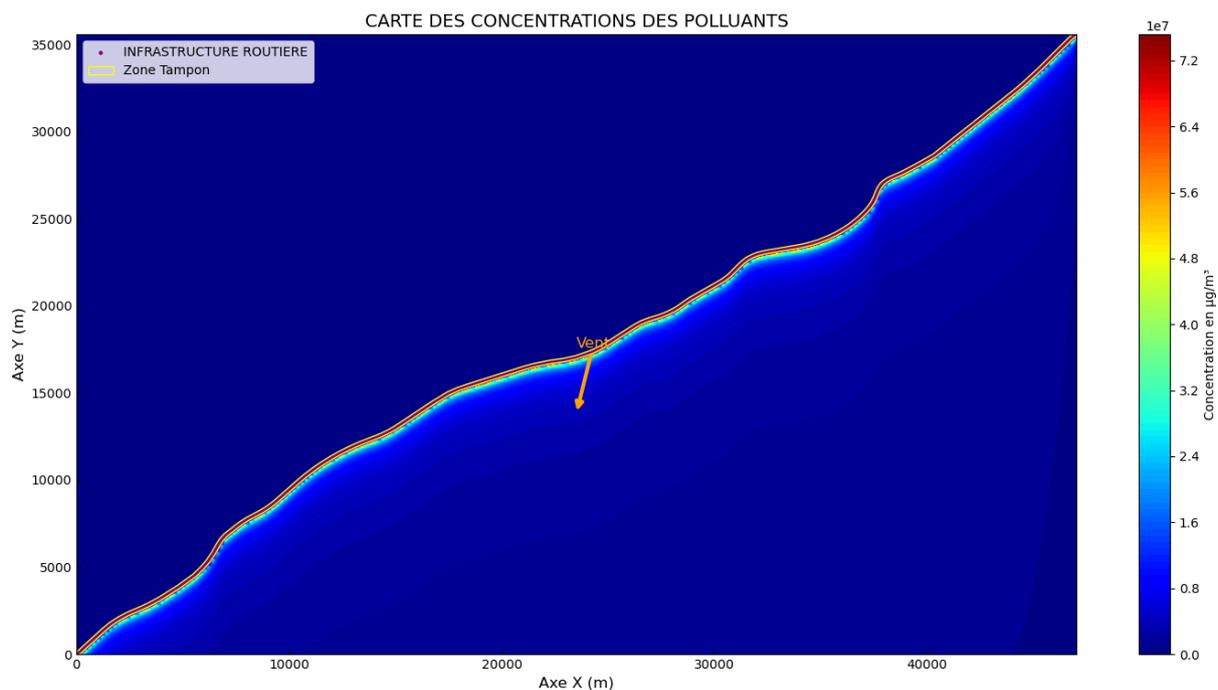
Pour la direction Sud, la concentration de polluants au point (1000, 100) est de  $1,24 \times 10^{-24} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , une valeur extrêmement faible, presque négligeable. Comparée à la limite réglementaire de l'EPA, cette concentration est infiniment plus faible, et par rapport à la concentration initiale, elle est  $1,45 \times 10^{30}$  fois plus faible. Cette réduction spectaculaire s'explique par le fait que le vent souffle dans une direction opposée au point d'intérêt, entraînant les polluants loin de celui-ci. Cela montre que les directions de vent opposées à la source d'émission sont particulièrement efficaces pour réduire les concentrations de polluants dans les zones concernées.

## Direction SO



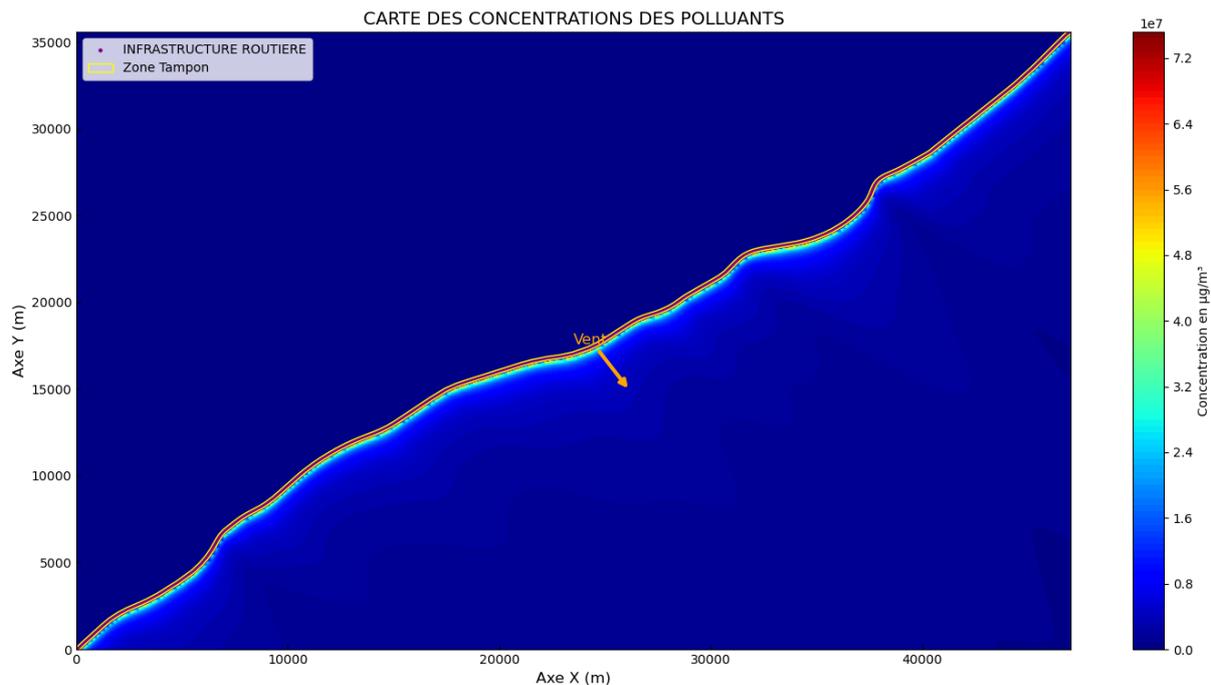
La concentration de polluants au point (1000, 100) pour la direction Sud-Ouest est de  $1,44 \times 10^7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , une valeur très élevée. Comparée à la limite réglementaire de l'EPA, cette concentration est **8 fois supérieure**, ce qui est extrêmement préoccupant. Par rapport à la concentration initiale, cette valeur est **80 fois plus élevée**. Cette accumulation modérée s'explique par le fait que le vent orienté vers le sud-ouest transporte une partie des émissions vers le point d'intérêt.

## Direction O



Pour la direction Ouest, la concentration de polluants au point (1000, 100) est de  $9,26 \times 10^6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , une valeur extrêmement élevée. Comparée à la limite réglementaire de l'EPA, cette concentration est **5 fois supérieure**. Par rapport à la concentration initiale, cette valeur est **51 fois plus élevée**. Cette accumulation élevée s'explique par le fait que le vent souffle directement vers le point d'intérêt, favorisant le transport des émissions vers cette zone.

## Direction NO

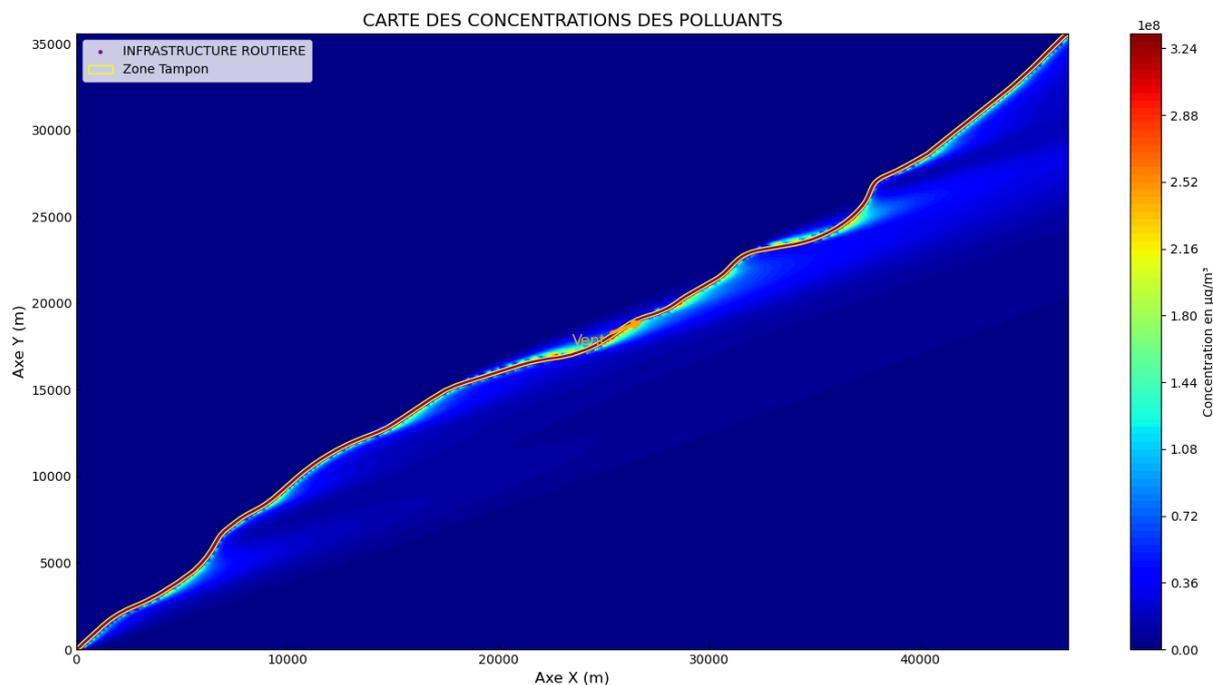


La concentration de polluants au point (1000, 100) pour la direction Nord-Ouest est de  $8,98 \times 10^6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , une valeur très élevée. Comparée à la limite réglementaire de l'EPA, cette concentration est **4,9 fois supérieure**, ce qui est extrêmement préoccupant. Par rapport à la concentration initiale, cette valeur est **50 fois plus élevée**. Cette accumulation significative s'explique par le fait que le vent orienté vers le nord-ouest transporte une grande partie des émissions vers le point d'intérêt. Comme pour les directions Nord et Ouest, cette orientation favorise une concentration locale élevée, soulignant le risque associé à cette direction du vent.

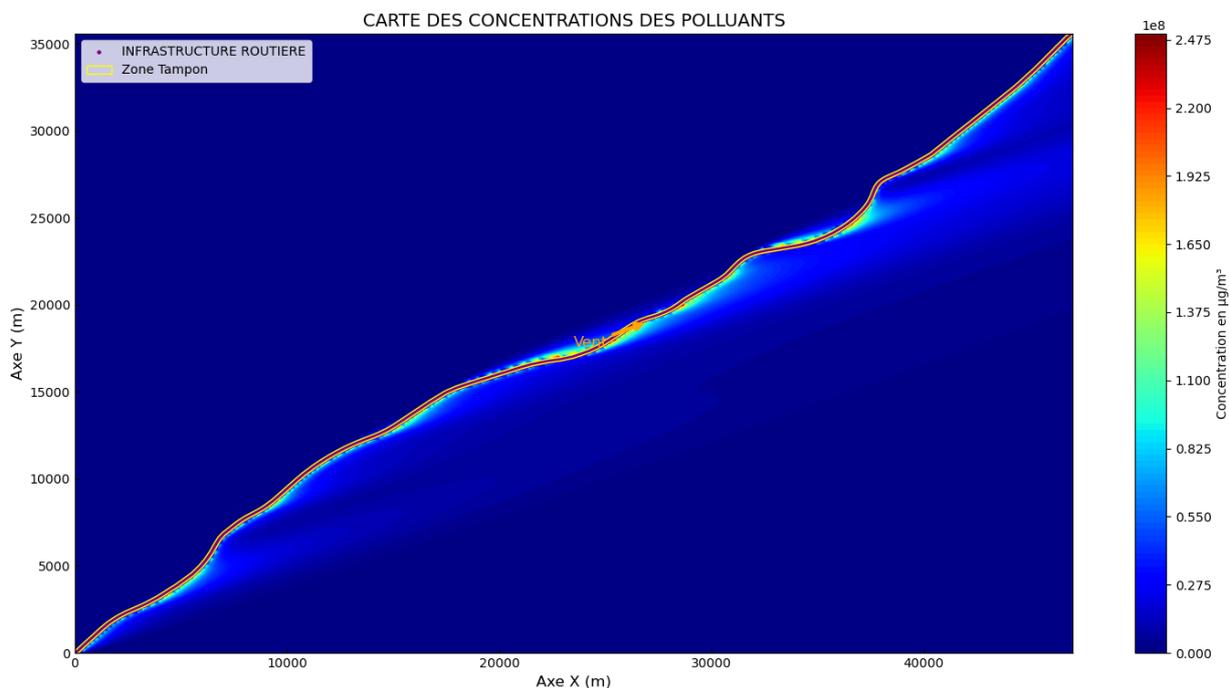
Il est crucial de prendre en compte la direction des vents dominants dans les modélisations de qualité de l'air et les politiques de gestion environnementale. Une mauvaise anticipation de ce paramètre peut entraîner une exposition imprévue de certaines populations, parfois situées en dehors des zones traditionnellement considérées à risque.

## Variation de la vitesse du vent

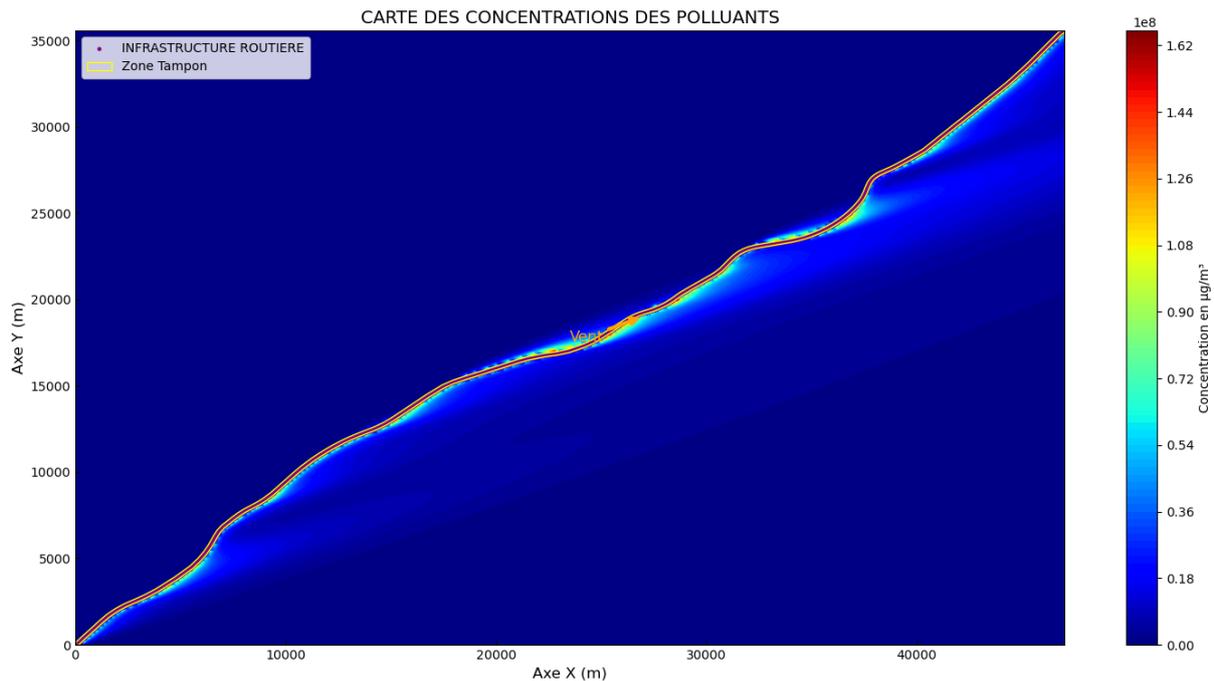
V/4



V/3



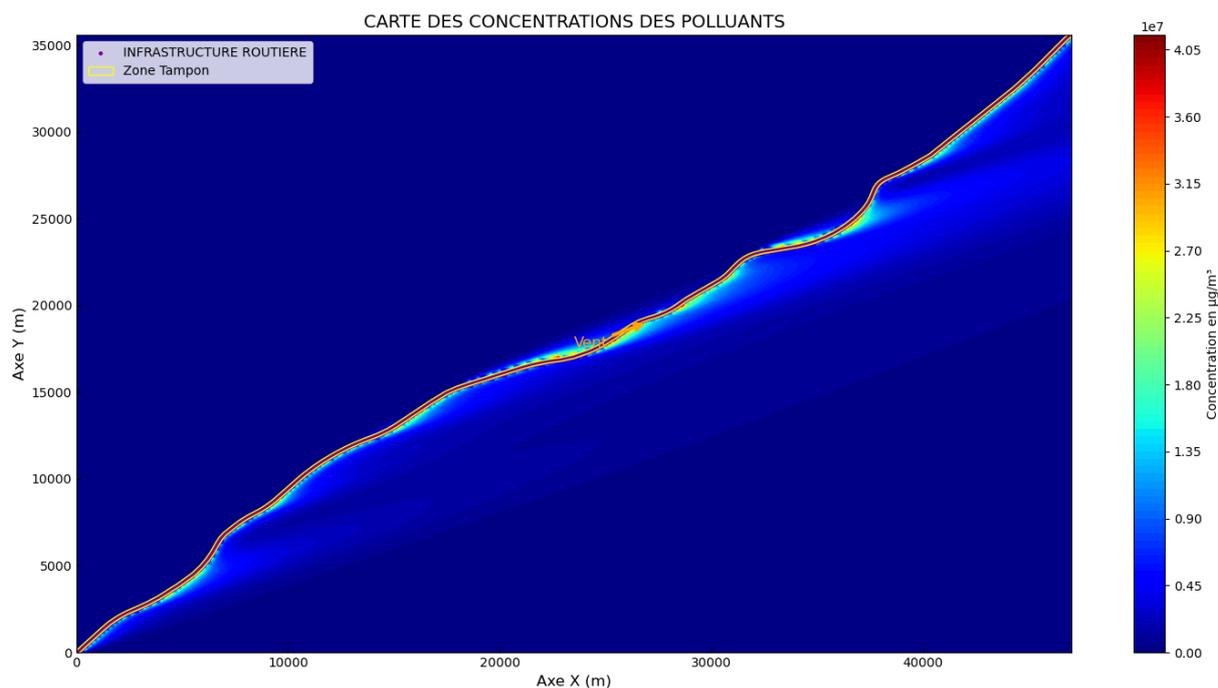
V/2



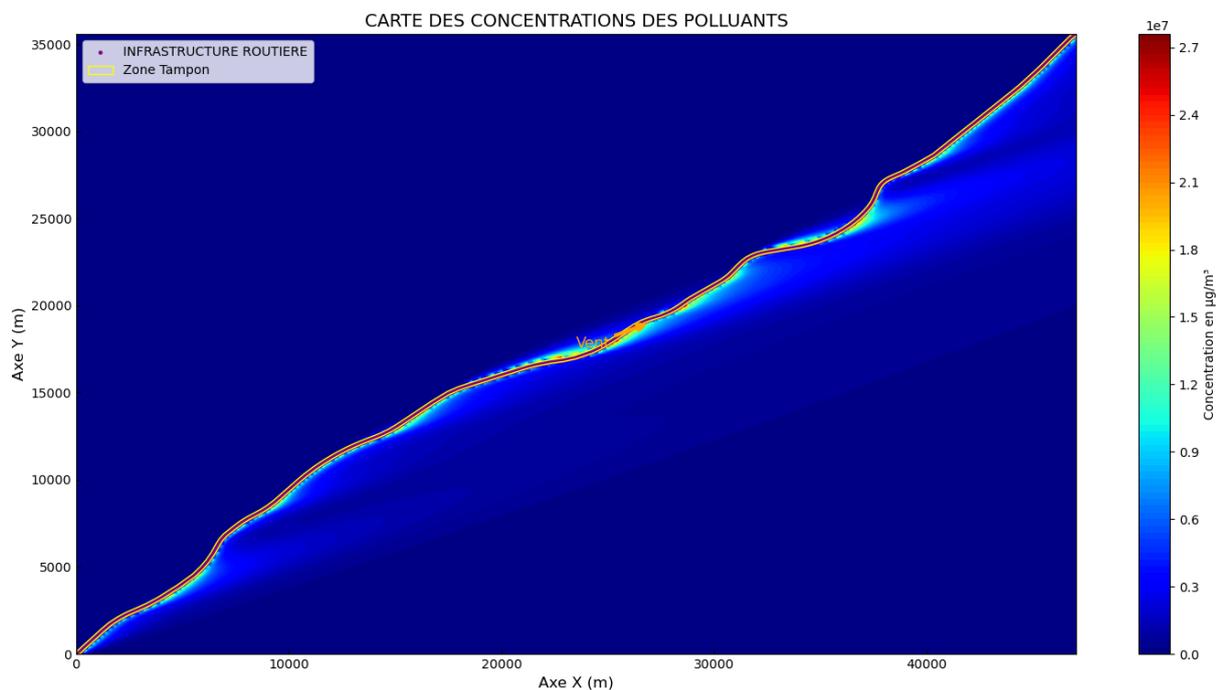
Les concentrations de polluants au point (1000, 100) pour les vitesses réduites (V/4, V/3, V/2) montrent une tendance claire : une réduction de la vitesse du vent entraîne une augmentation significative des concentrations de polluants par rapport à la valeur initiale ( $180\ 116,86\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pour la vitesse V/4, la concentration est de **720 467,45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **4 fois plus élevée** que la valeur initiale. Pour la vitesse V/3, la concentration est de **541 704,85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **3 fois plus élevée**. Enfin, pour la vitesse V/2, la concentration est de **360 233,72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **2 fois plus élevée**. Ces augmentations s'expliquent par le fait qu'une vitesse du vent plus faible entraîne une dispersion plus lente des polluants, limitant leur dilution dans l'environnement et favorisant leur accumulation locale. Ces concentrations sont acceptables, car elles sont inférieure à la limite réglementaire de l'EPA ( $1\ 830\ 280\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

# Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

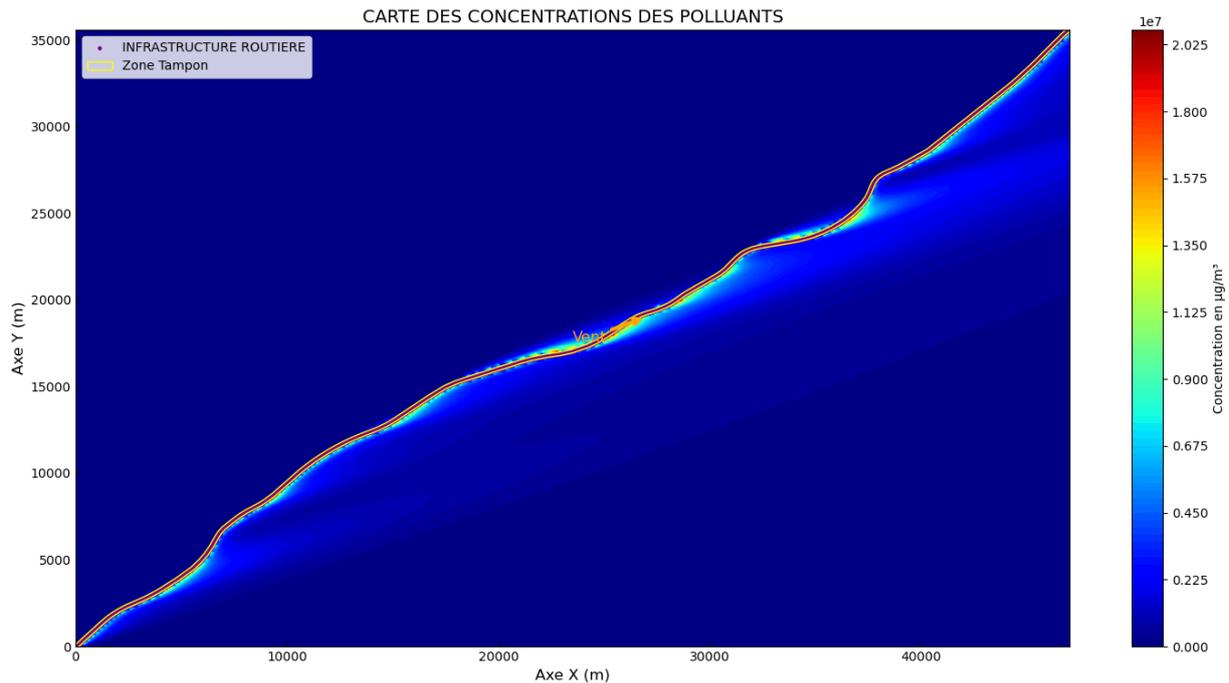
## Vx2



## Vx3



## Vx4

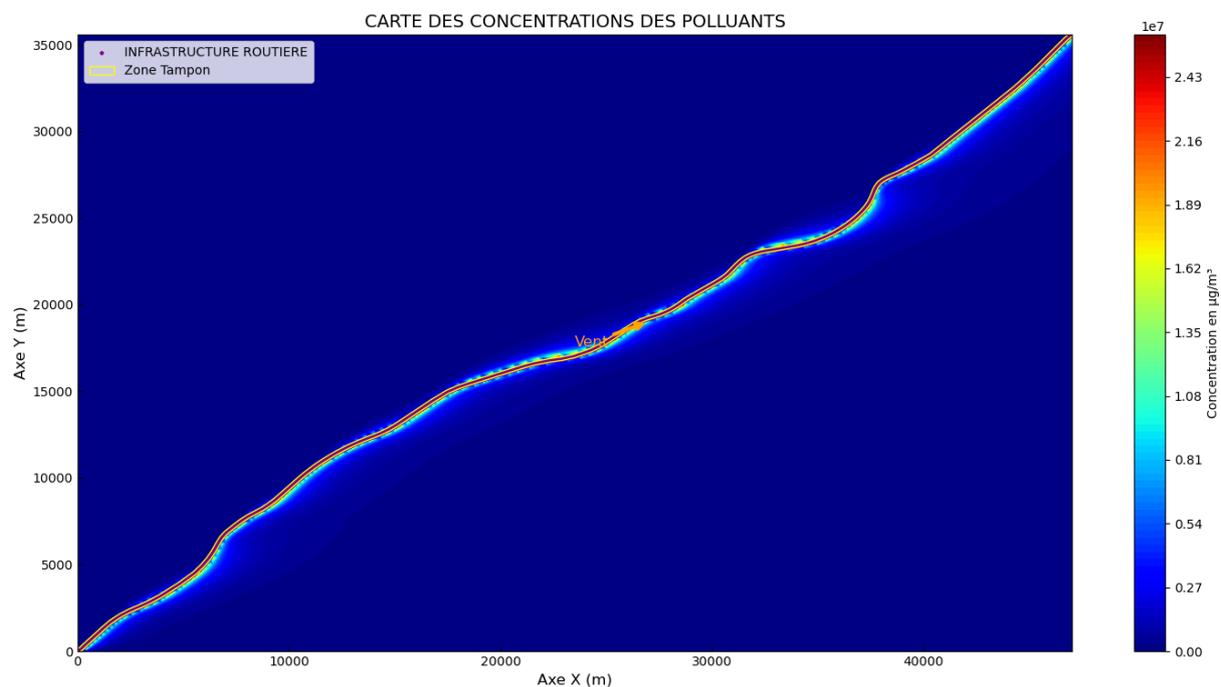


Les concentrations de polluants au point (1000, 100) pour les vitesses augmentées ( $V_{x2}$ ,  $V_{x3}$ ,  $V_{x4}$ ) montrent une tendance inverse : une augmentation de la vitesse du vent entraîne une réduction significative des concentrations de polluants par rapport à la valeur initiale ( $180\ 116,86\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pour la vitesse  $V_{x2}$ , la concentration est de **90 058,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **2 fois plus faible** que la valeur initiale. Pour la vitesse  $V_{x3}$ , la concentration est de **60 038,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **3 fois plus faible**. Enfin, pour la vitesse  $V_{x4}$ , la concentration est de **45 029,21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **4 fois plus faible**. Ces réductions s'expliquent par le fait qu'une vitesse du vent plus élevée entraîne une dispersion plus rapide des polluants, permettant une dilution plus efficace dans l'atmosphère. Cependant, malgré ces réductions, les concentrations restent bien en-dessous de la limite réglementaire de l'EPA ( $1\ 830\ 280\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

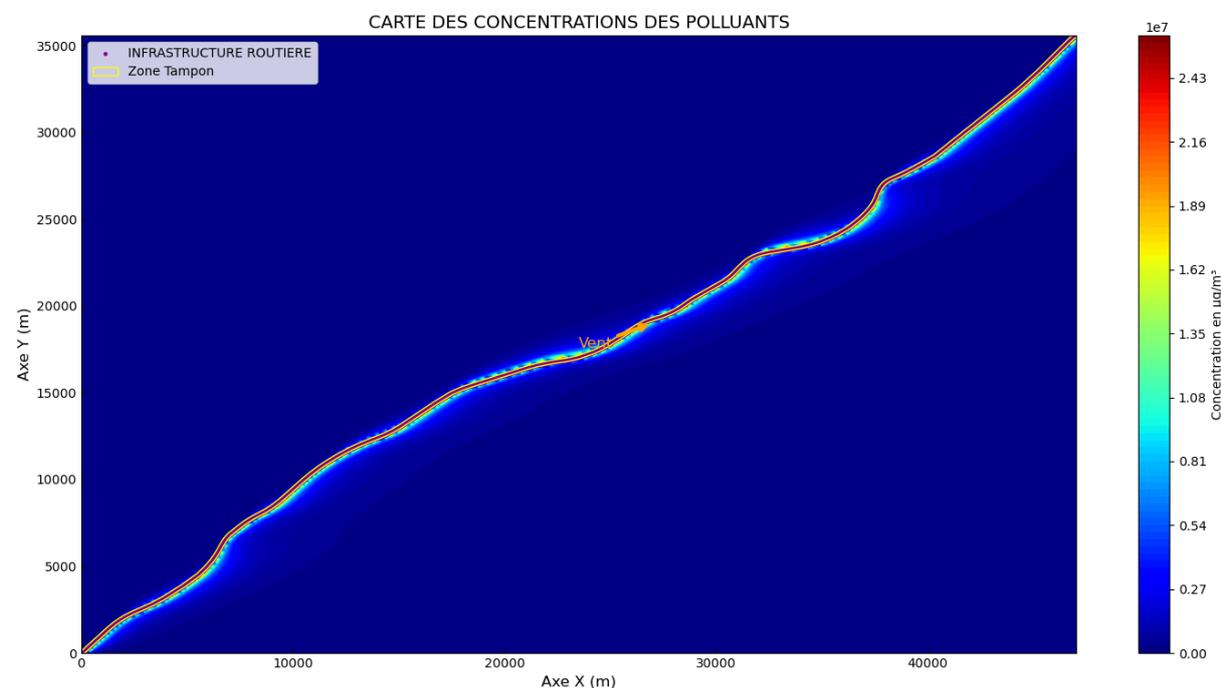
Lorsque la vitesse du vent passe d'une valeur faible à une plus grande valeur, elle favorise la dilution des polluants atmosphériques. Le vent transporte les particules polluantes sur de plus grandes distances et les mélange avec un volume d'air plus important, réduisant ainsi leur concentration locale.

## Variation de la stabilité de l'atmosphère

### Classe A : Très instable



### Classe B : Instable

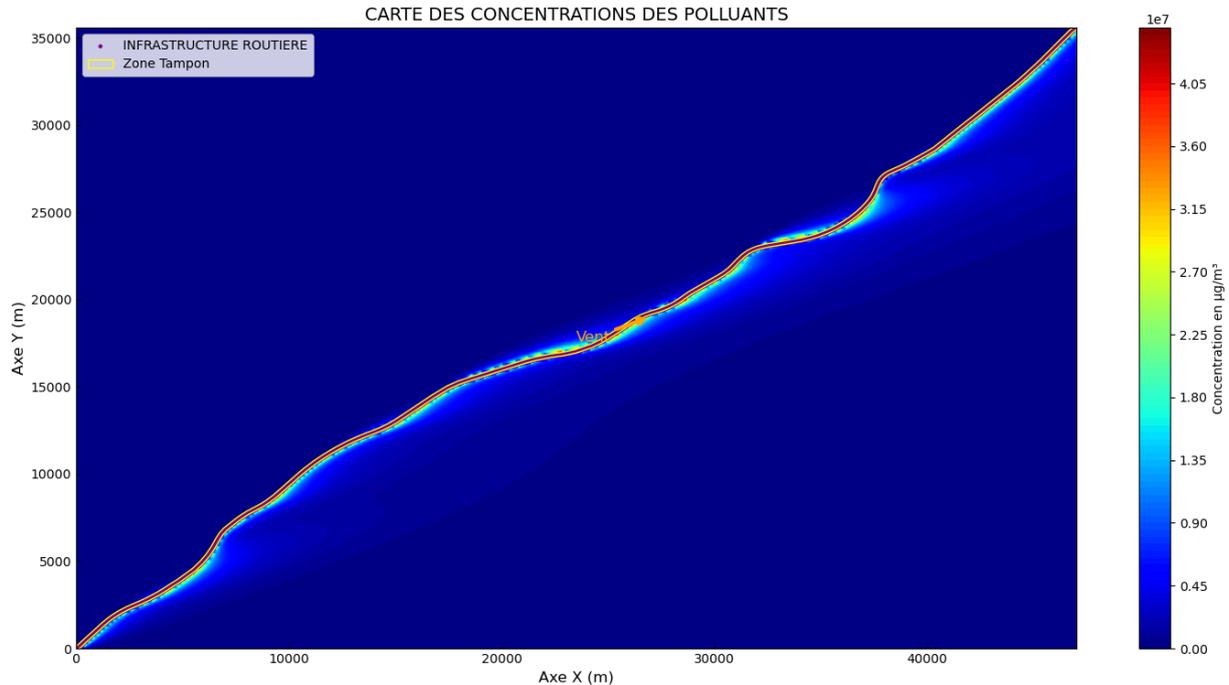


Les concentrations de polluants au point (1000, 100) varient de manière significative en fonction des classes de stabilité atmosphérique. Pour les classes A et B, la concentration est de **606 425,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , une valeur inférieure à la limite réglementaire de l'EPA (1 830 280  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

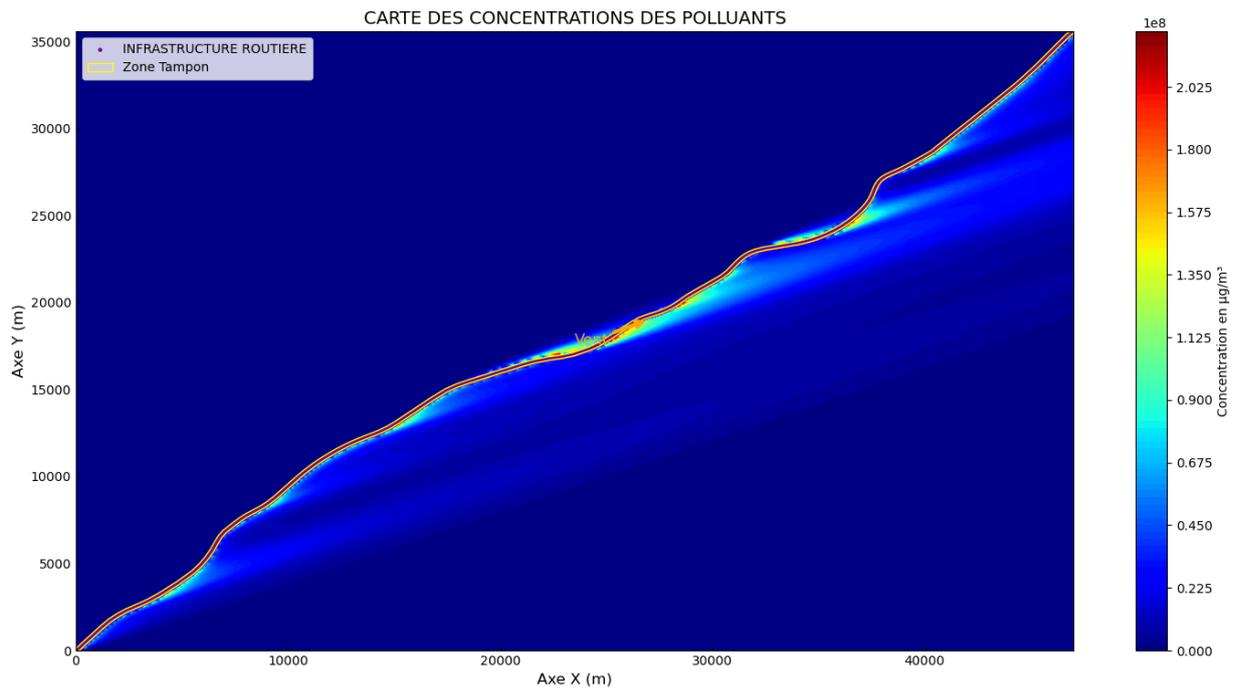
Cette concentration est également **3,4 fois plus élevée** que la valeur initiale ( $180\,116,86\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les classes A et B correspondent à des conditions de stabilité très faible, où l'atmosphère est fortement turbulente, ce qui favorise une dispersion rapide des polluants en altitude mais entraîne une accumulation locale importante en raison de la faible stabilité verticale.

### Classe C : Peu Instable

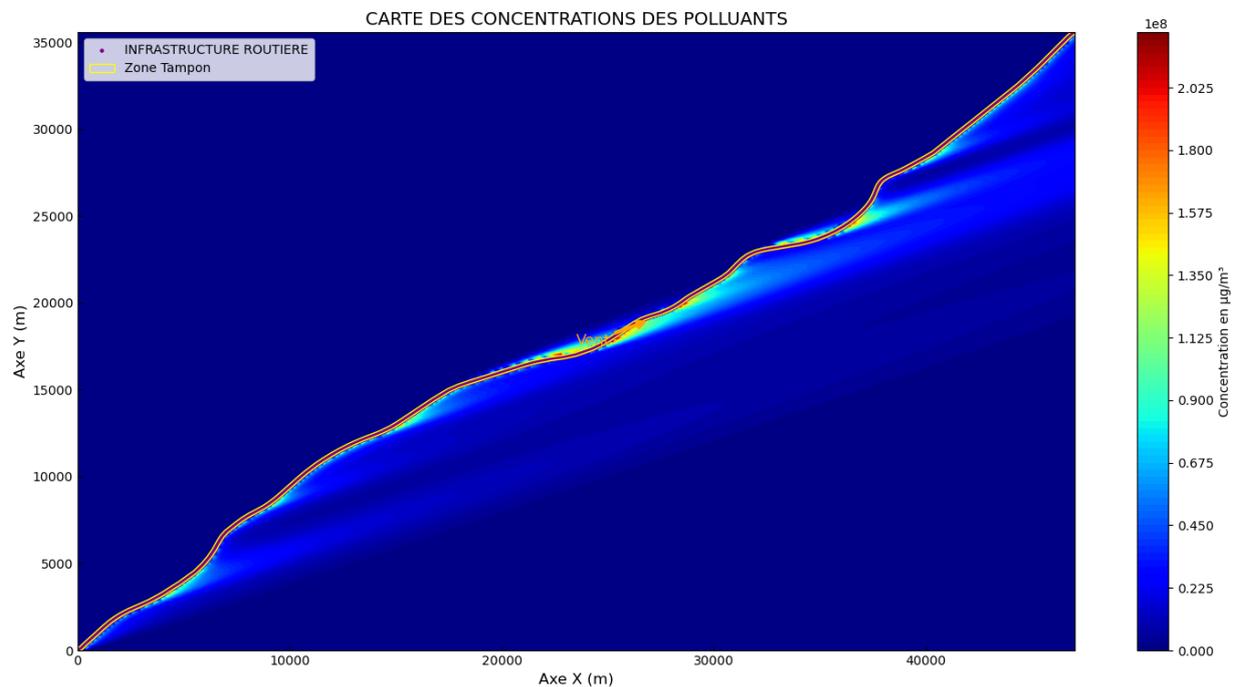


Pour la classe C, la concentration est de **423 919,18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , inférieure à la limite réglementaire de l'EPA et **2,4 fois plus élevée** que la valeur initiale. La classe C représente des conditions de stabilité modérée, où la dispersion des polluants est moins efficace que dans les classes A et B, mais reste suffisante pour réduire légèrement les concentrations par rapport à ces dernières.

### Classe E : Stable



### Classe F : Très stable



Enfin, pour les classes E et F, la concentration est de **21 959,26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**  inférieure à la limite réglementaire de l'EPA, et **8,2 fois plus faible** que la valeur initiale. Les classes E et F correspondent à des conditions de stabilité élevée, où l'atmosphère est très stable, ce qui limite la dispersion verticale des polluants et favorise leur accumulation au sol. Cependant, cette

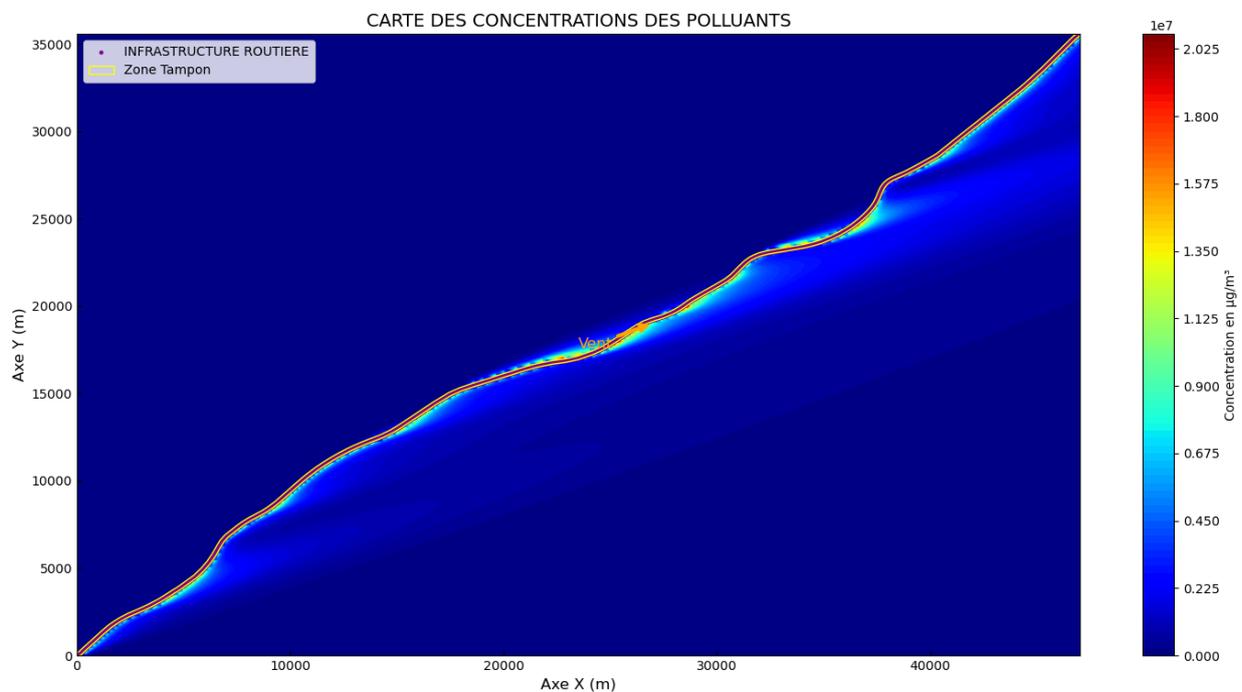
## Modélisation de la pollution de l'air généré par une source linéaire : Application à l'autoroute A1, tronçon Rabat-Casa

stabilité permet une meilleure dilution horizontale, ce qui explique la réduction significative de la concentration par rapport aux classes A, B et C.

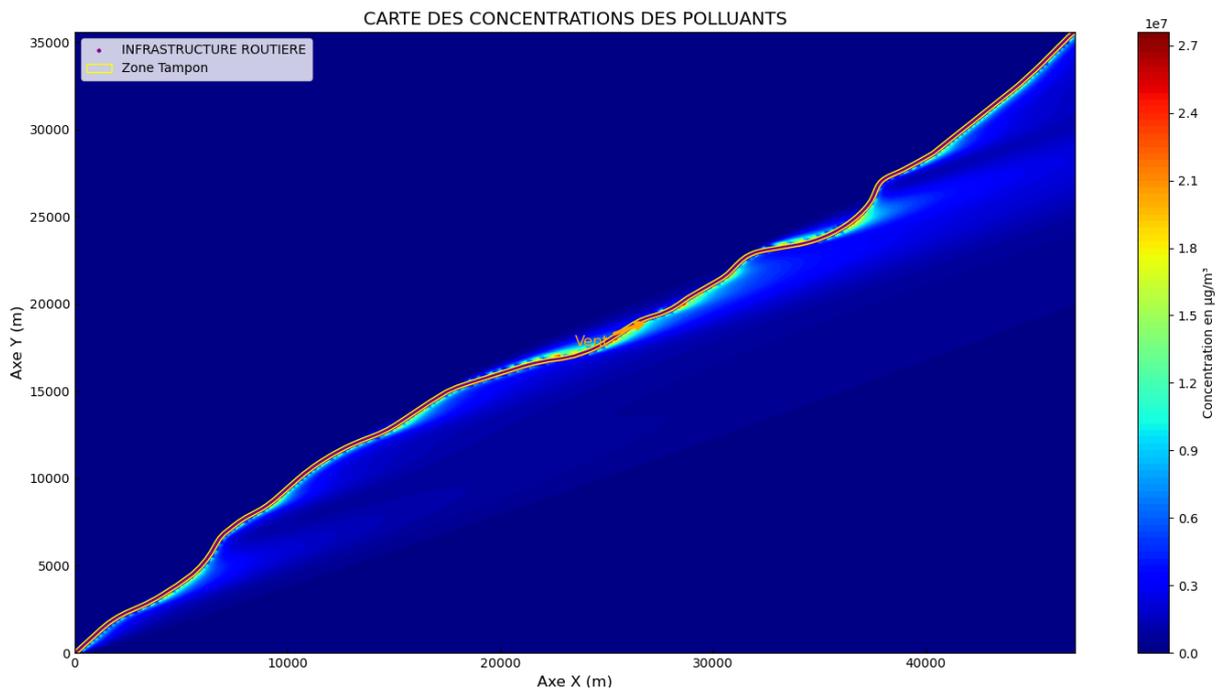
Les conditions atmosphériques déterminent la manière dont les polluants se dispersent dans l'air, affectant ainsi leur concentration au sol. En conditions instable (turbulence significative), les polluants se dispersent principalement verticalement, tant vers le haut que vers le bas. Cela permet une dilution modérée des polluants dans l'air ambiant.

### Variation du trafic routier : taux d'émissions

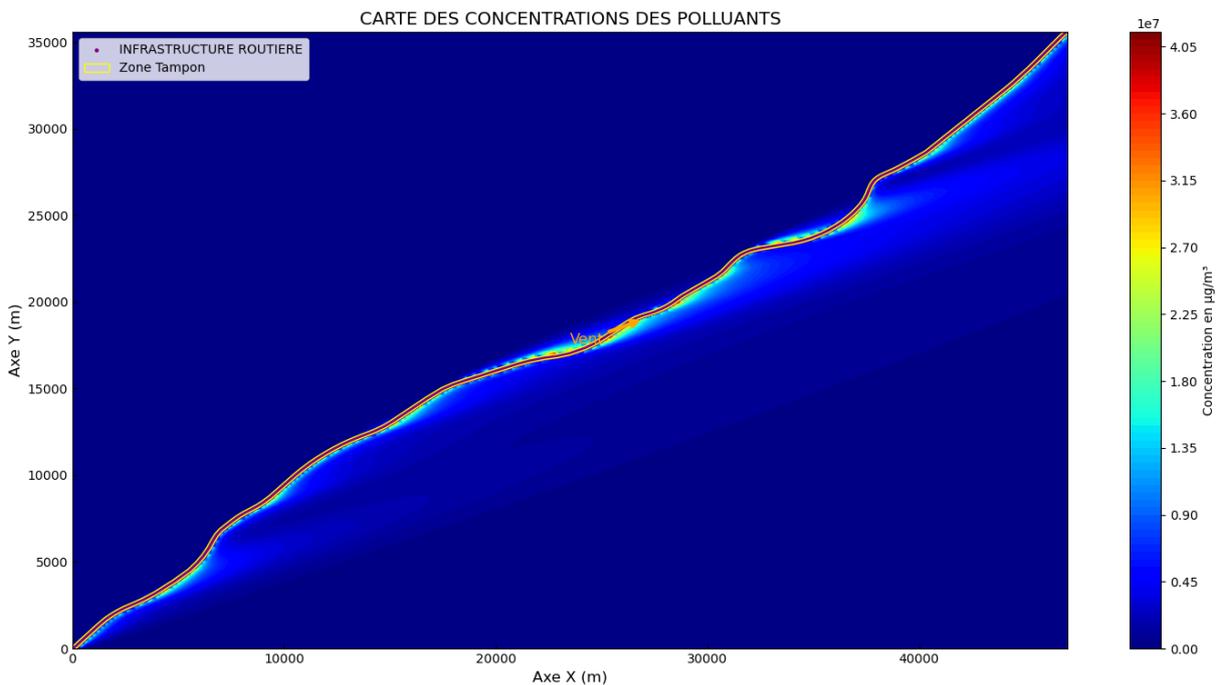
T/4



T/3



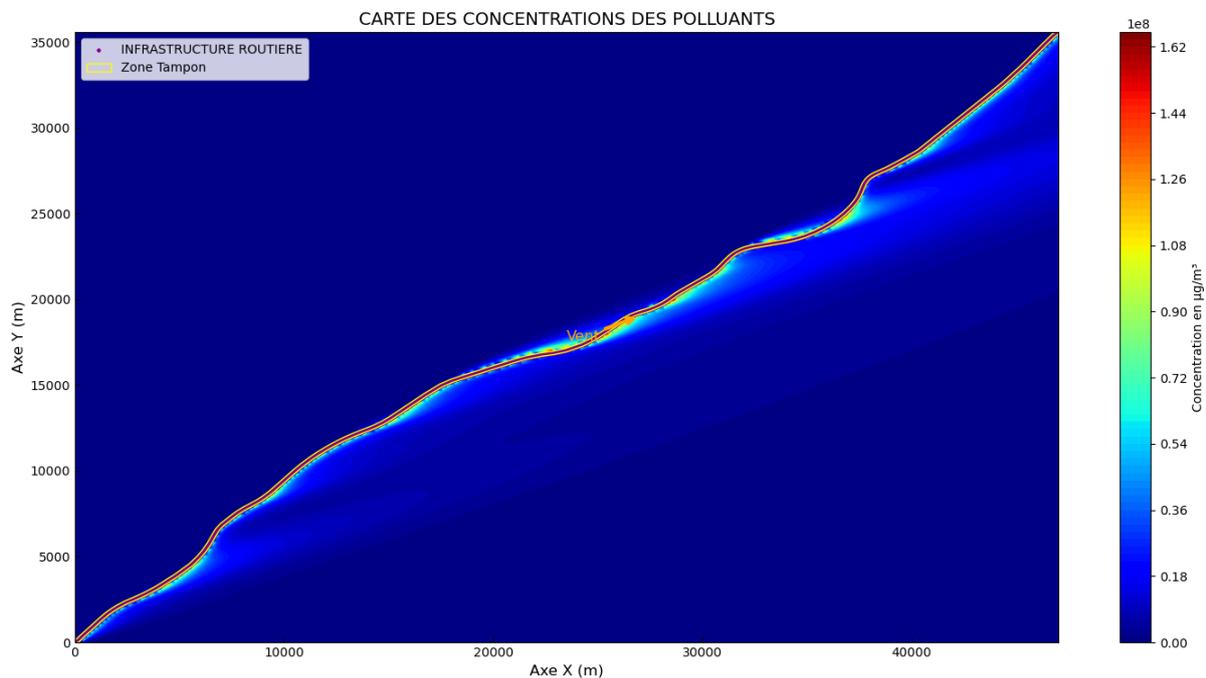
T/2



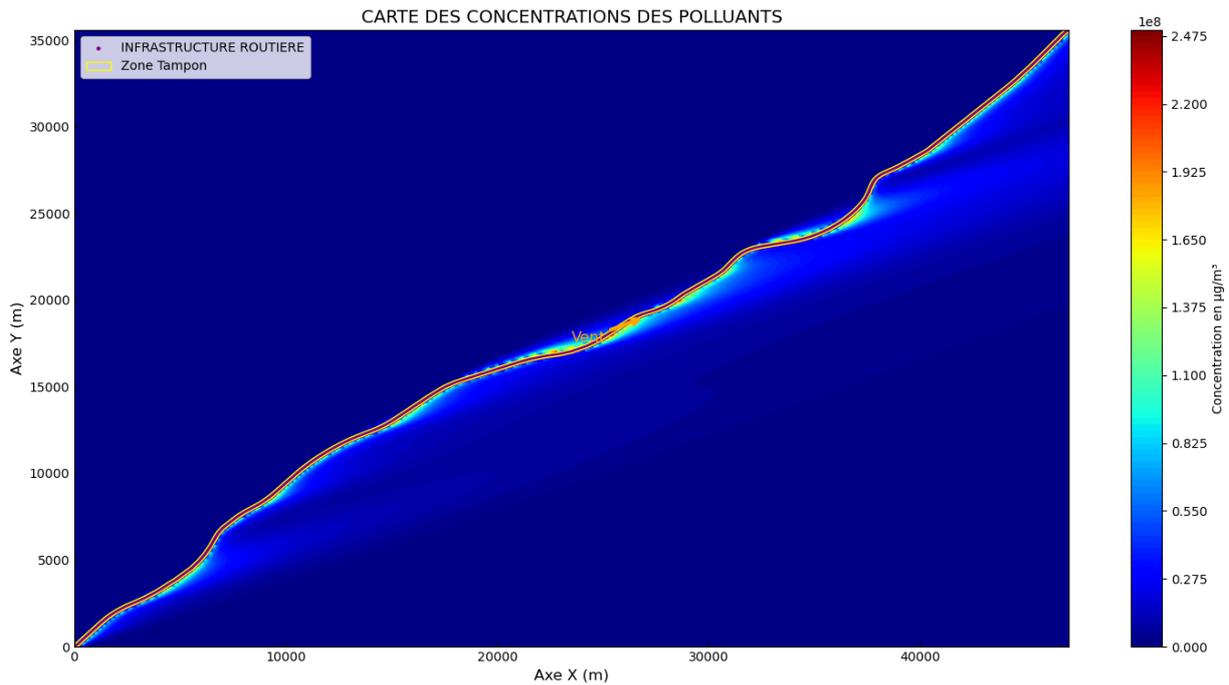
Les concentrations de polluants au point (1000, 100) pour les réductions de trafic (T/4, T/3, T/2) montrent une tendance claire : une diminution du trafic entraîne une réduction significative des concentrations de polluants par rapport à la valeur initiale (180 116,86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pour un trafic réduit de 25% (T/4), la concentration est de **45 029,21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **4 fois plus faible** que la valeur initiale. Pour un trafic réduit de 66,6 % (T/3), la concentration est de **60 038,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** ,

soit **3 fois plus faible**. Enfin, pour un trafic réduit de 50 % (T/2), la concentration est de **90 058,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **2 fois plus faible**. Ces réductions s'expliquent par le fait qu'une diminution du trafic entraîne une réduction des émissions de polluants, ce qui permet une meilleure dilution dans l'environnement. Cependant, malgré ces réductions, les concentrations restent bien en-dessous de la limite réglementaire de l'EPA (1 830 280  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ces résultats montrent que, bien que la réduction du trafic améliore la dispersion des polluants, elle reste insuffisante pour atteindre des niveaux acceptables, soulignant la nécessité de mesures supplémentaires pour réduire les émissions.

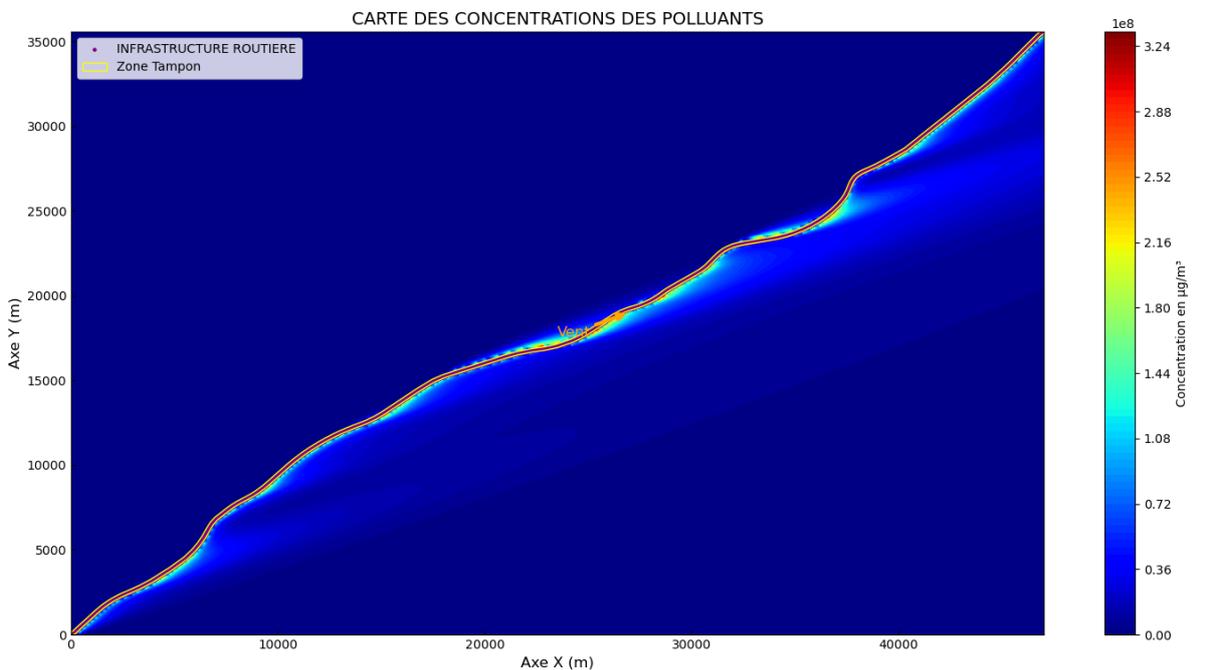
## Tx2



### Tx3



### Tx4



Les concentrations de polluants au point (1000, 100) pour les augmentations de trafic (Tx2, Tx3, Tx4) montrent une tendance inverse : une augmentation du trafic entraîne une augmentation significative des concentrations de polluants par rapport à la valeur initiale ( $180\ 116,86\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pour un trafic doublé (Tx2), la concentration est de **360 233,72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **2 fois plus élevée** que la valeur initiale. Pour un trafic triplé (Tx3), la concentration est de

**541 704,85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **3 fois plus élevée**. Enfin, pour un trafic quadruplé (Tx4), la concentration est de **720 467,45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , soit **4 fois plus élevée**. Ces augmentations s'expliquent par le fait qu'une augmentation du trafic entraîne une augmentation des émissions de polluants, ce qui limite leur dilution dans l'environnement et favorise leur accumulation locale. Ces concentrations sont extrêmement préoccupantes, car elles sont inférieure à la limite réglementaire de l'EPA (1 830 280  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ces résultats montrent que l'augmentation du trafic aggrave la situation en augmentant les concentrations de polluants, soulignant la nécessité de mesures urgentes pour réduire les émissions et améliorer la dispersion des polluants dans ces conditions.

Le volume de trafic routier constitue un facteur clé dans la détermination des concentrations de polluants atmosphériques, en raison de son lien direct avec le taux d'émission des contaminants. Cette situation souligne l'urgence d'intégrer des mesures de gestion du trafic dans les stratégies d'amélioration de la qualité de l'air. Contrairement aux paramètres météorologiques ou géographiques, l'intensité du trafic constitue un levier d'action direct et immédiat.