

Qualité de l'air et urbanisme : retour d'expérience et analyse d'un quartier fictif à l'aide de la modélisation 3D

Auteurs : Antoine Beaumont / Clara Landry-Merle

Relecteurs : Nathalie Pujol-Söhne / Nathalie Dufour

Diffusion : aout 2021

Avant-propos

Atmo Hauts-de-France est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (décret 2007-397 du 22 mai 2007) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO. Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Atmo Hauts-de-France est agréée du 1^{er} janvier 2019 au 31 décembre 2022, au titre de l'article L.221-3 du Code de l'environnement.

Conditions de diffusion

Atmo Hauts-de-France communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-hdf.fr.

Responsabilités

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Hauts-de-France. Ces données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure. Les résultats sont analysés selon les objectifs de l'étude, le contexte et le cadre réglementaire des différentes phases de mesures, les financements attribués à l'étude et les connaissances météorologiques disponibles.

Avertissement

Atmo Hauts-de-France n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

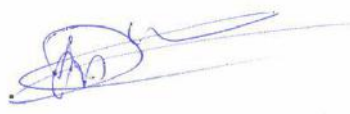
Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Atmo Hauts-de-France – Rapport N°01/2020/CLA/V1**.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Hauts-de-France :

- depuis le formulaire de contact disponible à l'adresse <http://www.atmo-hdf.fr/contact.html>
- par mail : contact@atmo-hdf.fr
- par téléphone : 03 59 08 37 30

Réclamations

Les réclamations sur la non-conformité de l'étude doivent être formulées par écrit dans les huit jours de la livraison des résultats. Il appartient au partenaire de fournir toute justification quant à la réalité des vices ou anomalies constatées. Il devra laisser à Atmo Hauts-de-France toute facilité pour procéder à la constatation de ces vices pour y apporter éventuellement remède. En cas de litige, un accord amiable sera privilégié. Dans le cas où une solution n'est pas trouvée la résolution s'effectuera sous l'arbitrage des autorités compétentes.

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Nathalie Dufour	Responsable du Service Etudes	

Version du document : V3 basé sur trame vierge : EN-ETU-20

Date d'application : 01/01/2021

Sommaire

1 Introduction	8
1.1 Aménagement urbain et qualité de l'air	8
1.2 Contexte et objectifs	9
2 Prérequis	10
2.1 Les polluants : dioxyde d'azote et particules en suspension	10
2.1.1 Les oxydes d'azote	10
2.1.2 Les particules en suspension	11
2.1.3 Émissions et concentrations	11
2.2 Le modèle 3D MISKAM	12
2.3 Quelques définitions	13
2.3.1 Les rues canyons	13
3 Étude	16
3.1 Méthodologie	16
3.1.1 Domaine-test et points d'intérêts	16
3.1.2 Modélisations	18
3.2 Étude 1 : Impact de la hauteur des bâtiments	19
3.2.1 Introduction	19
3.2.2 Résultats des modélisations 3D et interprétations	19
3.2.3 Conclusion et recommandations	26
3.3 Étude 2 : Impact de la distance du bâti à la route	27
3.3.1 Introduction	27
3.3.2 Résultats des modélisations 3D et interprétations	27
3.3.3 Conclusion et recommandations	33
3.4 Étude 3 : Impact de la végétation	34
3.4.1 Introduction	34
3.4.2 Résultats des modélisations 3D et interprétations	35
3.4.3 Conclusion et recommandations	40
4 Conclusion	42
A Annexes	44
A.1 Annexe 1 : Détails entre les interactions des documents d'urbanisme et les démarches pour la qualité de l'air	44
A.2 Annexe 2 : Données nécessaires à la modélisation 3D du domaine-test	45
A.3 Annexe 3 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D dans les rues canyon aux points d'intérêt 4,5 et 7	46
A.4 Annexe 4 : Impact de la hauteur des bâtiments - Interprétation détaillée des résultats dans les rues canyons	49

A.5	Annexe 5 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'autoroute aux points d'intérêt 1 et 2	52
A.6	Annexe 6 : Impact de la hauteur des bâtiments - Interprétation détaillée des résultats au bord de l'autoroute	53
A.7	Annexe 7 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D dans une zone ouverte au point d'intérêt 3	55
A.8	Annexe 8 : Non-uniformité des hauteurs de bâti pour une meilleure qualité de l'air	57
A.9	Annexe 9 : Zone à enjeux dans une rue canyon	59
A.10	Annexe 10 : Impact de la distance du bâti à la route - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'autoroute aux points d'intérêt 1 et 2	61
A.11	Annexe 11 : Impact de la distance du bâti à la route - Détail des résultats des modélisations 3D dans les avenues et rues canyons aux points d'intérêt 4,5 et 7	64
A.12	Annexe 12 : Impact de la distance du bâti à la route - Interprétation détaillée des résultats dans les rues canyons	68
A.13	Annexe 13 : Impact de la végétation - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'autoroute aux points d'intérêt 11 et 12	70
A.14	Annexe 14 : Impact de la végétation - Détail des résultats des modélisations 3D à proximité d'un boulevard à 2 voies	72

Illustrations

1	Schéma des émissions et des concentrations de polluants atmosphériques	12
2	Principe général de fonctionnement du modèle 3D MISKAM	13
3	Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect h/w de la hauteur et de sa largeur : (a) écoulement à rugosité isolée, (b) un écoulement à interface de sillage, (c) écoulement rasant d'après Oke et Nakamura,(1988)	14
4	Modélisation des concentrations en dioxyde d'azote pour 2 scénarios de l'étude du StadeBP à Saint-Pol-sur-mer et rose des vents de la station météo du quartier (Atmo Hauts-de-France 2019)	15
5	Domaine-test d'étude de modélisation 3D et position des 12 points d'intérêts sélectionnés.	17
6	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 1 et 2m avec des bâtiments à hauteurs grandes (1) et petites (2) avec un TMJA élevé - Coupe transversale Ouest - Est	21
7	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 1 et 2 m avec des bâtiments à hauteurs grandes (1) et petites (2) avec des TMJA forts dans les deux cas. - Coupe transversale Nord-Sud	23
8	Modélisation des concentrations en dioxyde d'azote pour 2 scénarios de l'étude du quartier Concorde à Lille (Atmo Hauts-de-France 2019).	24
9	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 entre 1 et 2 m avec des distances entre le bâti et la route petites (1) et grandes (2). Dans les deux cas, les TMJA sont élevés - Coupe transversale Nord-Sud	28
10	Concentrations totales de particules - Condition stable et vent léger - Effet de la taille de la route et de la gestion du trafic (gauche) - Effet du changement du parc routier sur une route à 6 voies (droite) Jones et al. (2000)	29
11	Concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote du scénario d'aménagement au niveau du sol dans le quartier de l'îlot des peintres	30

12	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} ($\mu g/m^3$) entre 1 et 2 m avec des distances entre le bâti et la route faibles (1) et élevées (2). Dans les deux cas, les TMJA sont élevés - Coupe transversale Ouest-Est	32
13	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} ($\mu g/m^3$) au niveau de la coupe transversale Nord-Sud	33
14	1) Vitesse et direction du vent pour différentes densités foliaires (LAD), 2) Concentration en polluant pour différentes densités foliaires (LAD) d'après Ghasemian (2017)	36
15	Exemple de barrières végétales efficaces : denses avec une couverture végétale du sol jusqu'à la cime (a) et le contre-exemple avec des barrières végétales inefficaces composées de trous et avec une porosité élevée (b), d'après Baldauf (2017)	37
16	Différents scénarios : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, d'après Ghasemian (2017)	38
17	1) Vitesse et direction du vent : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, 2) Concentration en polluant : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, d'après Ghasemian (2017)	38
18	Exemple de combinaisons efficaces de barrières végétales et de murs : arbres denses derrière un mur (gauche) et végétation broussailleuse devant un mur (droite)), d'après Baldauf (2017)	41
19	Interactions juridiques entre démarches Qualité de l'Air, outils de planification et d'aménagement et démarches d'urbanisme durable. Source : ADEME 2020	44
20	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 4.	46
21	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 7	47
22	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 4	47
23	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 5	48
24	Modèle de simulation de l'étude de Chan (2003)	49
25	Différents niveaux de concentrations en fonction des régimes d'écoulement et du rapport d'aspect. Chan (2003)	50
26	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 1	52
27	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 2	52
28	Écoulement du vent dans une rue avec des bâtiments à hauteurs faibles (a) et à hauteurs élevées (d) (Mei et al. (2016))	53
29	Fraction volumique de particules PM dans une rue avec des bâtiments à hauteurs faibles (a) et à hauteurs élevées (d) (Mei et al. (2016))	54
30	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3	55
31	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3	55

32	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 6	56
33	Schéma d'une rue canyon d'après Chan (2001)	57
34	Concentration en polluant pour des rapports h_2/h_1 différents	58
35	Fraction volumique de particules PM dans une rue avec des bâtiments à hauteurs croissantes (b) et à hauteurs décroissantes (c)	58
36	Concentrations en oxydes d'azote NO _x entre 1 et 2 mètres sous un vent d'Ouest avec des hauteurs grandes et des TMJA forts	59
37	Concentrations en particules PM ₁₀ entre 1 et 2 mètres sous un vent du Sud avec des hauteurs grandes et des TMJA forts	60
38	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 1.	61
39	Concentrations moyennes annuelles en PM ₁₀ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 2.	62
40	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti/route pour des TMJA différents au point 1.	62
41	Concentrations moyennes annuelles en PM ₁₀ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 2.	63
42	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 4.	64
43	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 4.	65
44	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 7.	65
45	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 7.	66
46	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 5.	66
47	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 5.	67
48	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 8.	67
49	Différents niveaux de concentrations en fonction des régimes d'écoulement et du rapport d'aspect. (source Chan (2003))	68
50	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 11.	71
51	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 12.	71
52	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 9.	72
53	Concentrations moyennes annuelles en NO ₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 10.	73

54	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 9.	73
55	Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 10.	74

Tableaux

1	Tableaux récapitulatifs de la position et de l'utilité des points	16
2	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments aux points 4, 5 et 7	20
3	Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7	22
4	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments aux points 1 et 2	23
5	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3	25
6	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes distances à la route aux points 1 et 2	28
7	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes distances à la route aux points 4, 5 et 7	31
8	Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7	32
9	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation aux points 11 et 12	35
10	Concentrations moyennes annuelles en NO_2 et PM_{10} ($\mu g/m^3$) à 2m en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation aux points 9 et 10	39
11	Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4 et 7	51
12	Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7	69

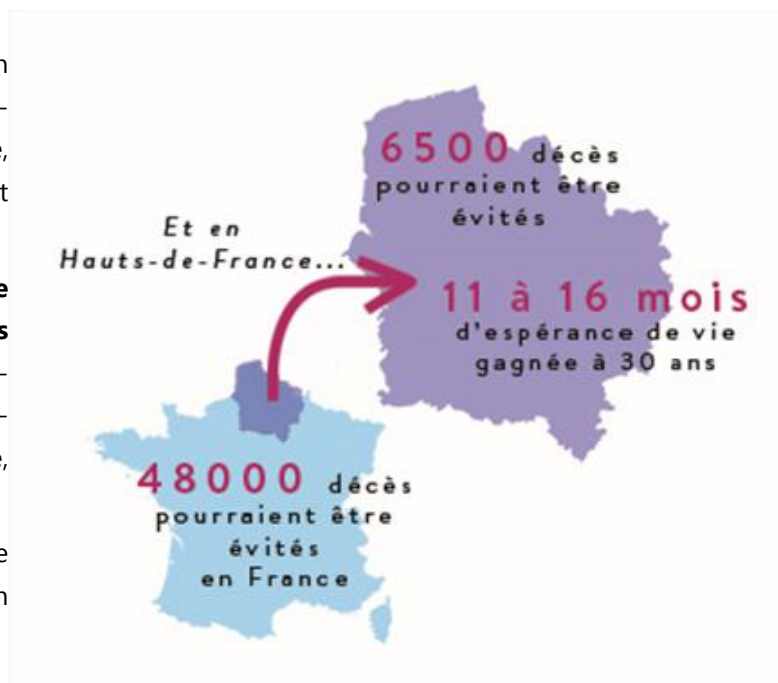
1. Introduction

1.1. Aménagement urbain et qualité de l'air

La **qualité de l'air** est l'un des problèmes environnementaux jugés les plus préoccupants des Français selon le baromètre annuel du ministère de la Transition écologique et solidaire, paru en août 2020. Les Français situent en **troisième position** la question de la pollution de l'air, juste derrière celle du changement climatique et celle de la dégradation de la faune et de la flore.

Une étude publiée par Santé Publique France en juin 2016 montre que les conséquences de la pollution de l'air, en termes de santé publique en France, sont importantes. Les chiffres de cette étude parlent d'eux-mêmes :

- La pollution de l'air correspond à **une perte d'espérance de vie pouvant dépasser 2 ans** dans les villes les plus exposées, plus précisément entre 11 et 16 mois dans les Hauts-de-France selon le type de commune (rurale, moyenne ou grande).
- De plus, la pollution de l'air serait responsable de **48 000 décès** chaque année, dont 6 500 en Hauts-de-France.



La pollution atmosphérique présente un **impact sanitaire majeur** car elle agit sur les systèmes respiratoires et cardiovasculaires et est à l'origine de troubles de la reproduction et du développement de l'enfant, des maladies endocriniennes et neurologiques.

Outre son impact sanitaire, la pollution représente également un coût économique et financier non négligeable. En 2015, la Commission d'enquête sénatoriale a publié un rapport « Pollution de l'air : le coût de l'inaction », qui évalue à plus de **100 milliards d'euros le coût de la pollution atmosphérique** (extérieure et intérieure) sur la santé, les bâtiments, les écosystèmes et l'agriculture.

Aussi, au même titre que d'autres thématiques environnementales, **la qualité de l'air est un critère à prendre en compte dans le choix d'un site à urbaniser**. Les opérations d'aménagement urbains peuvent être un levier important en terme de qualité de l'air : il est possible de **limiter l'impact** et de **réduire l'exposition des populations** à la pollution atmosphérique

Au-delà de la loi LAURE, le **cadre réglementaire français** repose sur une série de plans et de schéma relatifs à la qualité de l'air ambiant (détails en annexe A.1). Dans ce cadre et **en amont** de tout projet d'urbanisme, l'objectif est d'identifier les **enjeux du territoire**, ses spécificités en matière de qualité de l'air, afin de concevoir une opération d'aménagement qui permettra de **limiter/réduire les concentrations de polluants du nouvel espace urbain**.

1.2. Contexte et objectifs

Sur la base des expérimentations en modélisation 3D menée en 2019 sur le quartier Concorde « à santé positive » de la ville de Lille et des deux expérimentations menées sur le territoire de la communauté urbaine de Dunkerque en 2018, Atmo Hauts-de-France propose la réalisation d'**un guide pratique et méthodologique à l'attention des urbanistes et techniciens des collectivités** souhaitant mieux intégrer la question de la qualité de l'air dans leurs projets d'urbanisme. En effet, à l'aide des expériences passées en modélisations 3D, de nouvelles modélisations sur un domaine-test et de la littérature scientifique à ce sujet, ce guide propose des **recommandations permettant de réduire l'impact d'un nouvel aménagement urbain sur la qualité de l'air du quartier**.

La **modélisation 3D** est destinée à évaluer à très **fine échelle** (1 mètre de résolution minimum), l'influence d'un **aménagement urbain** sur la qualité de l'air ouvrant de nouvelles perspectives d'**aide à la décision** pour les planificateurs et gestionnaires des villes. En effet, L'EHESP (École des Hautes Études en Santé Publique) au travers de son guide ISadOrA (Intégration de la Santé dans les Opérations d'Aménagement) paru en Mars 2020 préconise les études de la qualité de l'air, et notamment l'utilisation de modélisation 3D, lors des **phases de conceptions** d'un aménagement urbain.

- Comment la forme urbaine influence-t-elle la qualité de l'air d'un quartier ?
- Existe-t-il des liens entre les choix urbanistiques (végétalisation, forme du bâti) et une amélioration / dégradation de la qualité de l'air ?

Comme premiers éléments de réponses à ces questions, **Atmo Hauts-de-France a déjà réalisé 4 études de modélisation 3D** en amont de projets de renouvellement urbain. L'étude de l'**îlot des peintres** à Grande-Synthe en 2018, du **quartier Concorde** de Lille en 2019, du quartier du **Stade BP** à Saint-Pol-sur-mer en 2019 et plus récemment du **quartier de la gare** à Arras en 2020. Ces modélisations ont permis de mieux appréhender la modélisation 3D et les bénéfices de celle-ci dans l'aide à la décision des nouveaux projets d'urbanisme.

Dans la suite, des **modélisations 3D sur un domaine-test** sont réalisées, une **analyse bibliographique** ainsi qu'un **retour d'expériences** sont proposés pour répondre à trois questions d'intérêts majeurs :

1. Quel est l'impact de la **hauteur du bâti** sur la qualité de l'air d'un quartier ?
2. Quel est l'impact de la **distance à la route du bâti** sur la qualité de l'air d'un quartier ?
3. La **végétation** permet-elle d'améliorer la qualité de l'air d'un quartier ?

Les modélisations 3D sur le domaine-test nous permettent de faire varier un des **trois paramètres clés**, hauteur du bâti, distance du bâti à la route et densité de végétation afin d'évaluer précisément les gains (ou pertes) moyens sur les concentrations de polluants. La bibliographie citée dans le document, et disponible à la fin de ce guide, nous permet de proposer une analyse plus fine des phénomènes mis en évidence dans les modélisations du domaine-test et les modélisations passées.

2. Prérequis

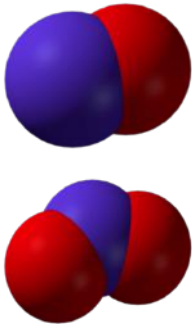
2.1. Les polluants : dioxyde d'azote et particules en suspension

Les **polluants atmosphériques** peuvent être d'origine naturelle (érosion, pollens, feux de forêt, etc.) ou anthropique (liés aux transports, aux activités domestiques, agricoles ou industrielles). Ils se distinguent en deux familles, les polluants primaires et les polluants secondaires :

- Les **polluants primaires** sont émis dans l'air, la plupart du temps par des sources identifiées d'origine humaine sur le territoire. Il s'agit par exemple des oxydes d'azote, des oxydes de soufre, de certaines particules ou encore des composés organiques volatiles.
- Les **polluants secondaires** sont quant à eux issus de réactions chimiques ou photochimiques entre différents polluants primaires dans l'atmosphère. Par exemple, les oxydes d'azote et les hydrocarbures réagissent sous l'influence du rayonnement ultra-violet pour former de l'ozone.

Il est à noter que certains polluants tels que le **dioxyde d'azote** et les **particules en suspension** sont à la fois des polluants primaires et secondaires. Dans la suite de l'étude, nous traiterons ces deux polluants.

2.1.1. Les oxydes d'azote



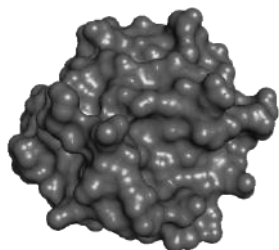
Les oxydes d'azote représentent les formes oxydées de l'azote, les principaux sont le **dioxyde d'azote** (NO_2) et le monoxyde d'azote (NO).

Ils proviennent de la **combustion de combustibles** et de procédés industriels (fabrication d'engrais, traitement de surface etc.). Les principaux émetteurs sont le **transport routier** et les grandes installations de combustion, ainsi que les feux de forêts, les volcans et les orages.

Le NO_2 est un gaz très **toxique** (40 fois plus que le monoxyde de carbone et 4 fois plus que le monoxyde d'azote). Il pénètre profondément dans les poumons et irrite les bronches. Chez les asthmatiques, il augmente la fréquence et la gravité des crises. Chez l'enfant, il favorise les infections pulmonaires.

Les NO_x participent au phénomène des pluies acides. De plus, ce sont des **précurseurs** d'ozone et de particules.

2.1.2. Les particules en suspension



Les particules en suspension varient en fonction de la taille, des origines, de la composition et des caractéristiques physico-chimiques. Les particules PM10 et PM2.5 ont un diamètre respectivement inférieur à 10 micromètres (μm) et à 2,5 μm . Elles sont d'origine naturelle ou d'origine humaine.

Les particules **PM10** proviennent essentiellement du chauffage au bois, de l'agriculture, de l'**usure des routes**, des carrières et chantiers BTP. Les PM2.5 proviennent essentiellement des **transports routiers** et du chauffage au bois.

Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément dans les voies respiratoires. Elles peuvent **irriter et altérer la fonction respiratoire**. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes du fait de leur propension à adsorber des polluants et les métaux lourds.

Les effets de **salissure des bâtiments et monuments** sont les atteintes à l'environnement les plus évidentes. Bien que certains composants des particules aient un effet réchauffant (notamment le carbone suie), l'effet global des particules est considéré comme étant refroidissant.

2.1.3. Émissions et concentrations

La **qualité de l'air** dépend des polluants rejetés dans l'atmosphère par différents secteurs d'activité et d'une série de phénomènes auxquels ils vont être soumis lors de leur temps de résidence dans l'atmosphère. Ainsi, on ne respire pas directement à la source des émissions. L'air respiré dépend donc des concentrations de polluants qui varient en fonction des conditions météorologiques, chimiques et topographiques locales (figure 1).

Les **émissions** de polluants correspondent aux **quantités de polluants directement rejetées dans l'atmosphère** par les activités humaines ou par des sources naturelles. Elles sont exprimées en unité de masse (souvent en kilogrammes ou en tonnes) par unité de temps (généralement sur une année).

Les **concentrations** de polluants correspondent aux **quantités de composés présents dans l'air** et s'expriment en masse par mètre cube d'air. Elles caractérisent la **qualité de l'air respiré**. Les concentrations sont mesurées tout au long de l'année sur le territoire Hauts-de-France par des stations fixes. Elles sont aussi estimées et prévues par le biais de **modèles** à résolution spatiale plus ou moins fine, permettant de couvrir l'ensemble de la région. La modélisation prend en compte les émissions de polluants, les conditions météorologiques, la topographie du territoire, les apports de polluants extérieurs au domaine de modélisation et les réactions chimiques de l'atmosphère pour mettre en évidence les niveaux de pollution sur un territoire.

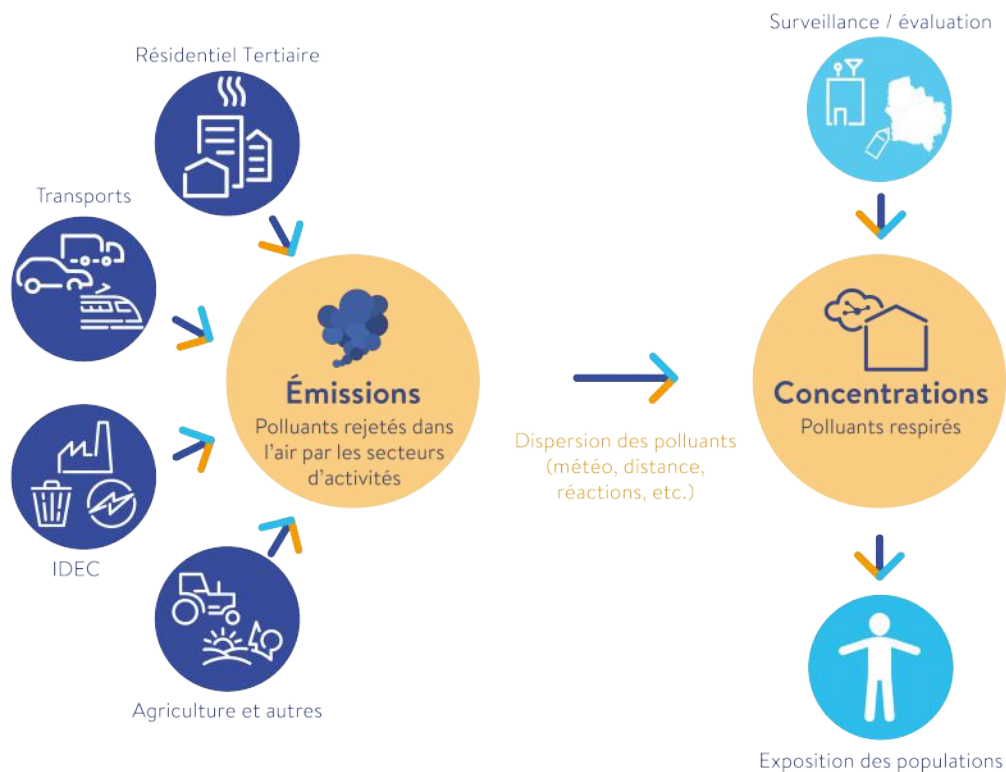


FIGURE 1 – Schéma des émissions et des concentrations de polluants atmosphériques

2.2. Le modèle 3D MISKAM

Le modèle 3D **MISKAM** est reconnu et cité dans de nombreuses publications scientifiques (bureau d'étude Lohmeyer, Atmo Grand-Est, Air Paris ...). Ce modèle utilise des **équations de mécanique des fluides** pour simuler dans un premier temps l'**écoulement de l'air autour des bâtiments** et dans un second temps la **dispersion des polluants**.

En **données d'entrée**, le modèle utilise deux types de données, d'une part des **données de géométrie** servant à définir précisément le bâti, les voiries et la végétation du domaine d'étude et d'autres parts, des données relatives à la **qualité de l'air**, comme les émissions de polluants, la pollution de fond et la météo du domaine de modélisation. En **sorties**, MISKAM propose des **champs de vents** et des **concentrations de polluants** afin d'évaluer leurs dynamiques sur le domaine d'étude (figure 2).

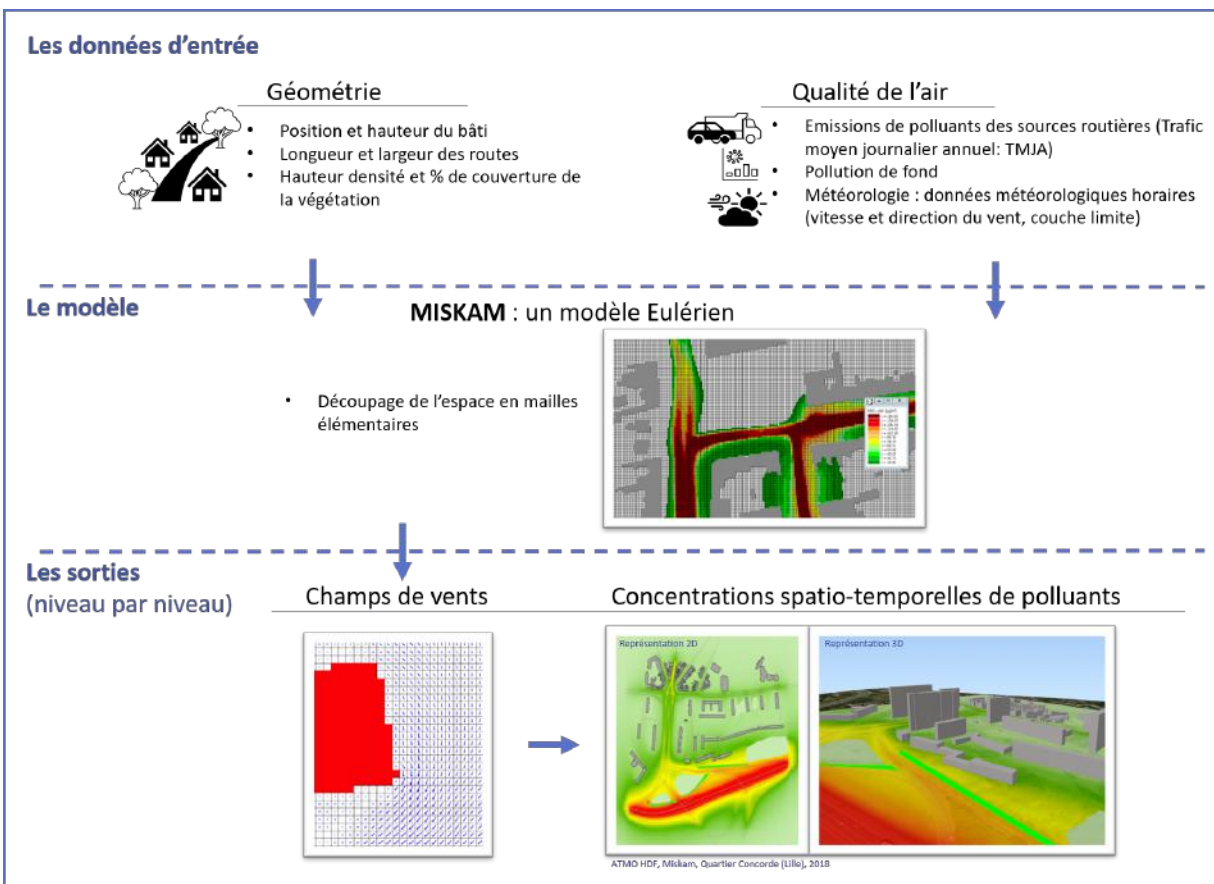


FIGURE 2 – Principe général de fonctionnement du modèle 3D MISKAM

Le domaine de modélisation se découpe sur une **grille régulière** en trois dimensions et toutes les sorties sont disponibles pour chacune des mailles de la grille. Une résolution de **1 mètre** (dans toutes les dimensions) a été choisi dans cette étude afin de garantir une grande finesse des résultats.

Le détail des données nécessaires à la modélisation 3D du domaine-test sont présentées dans l'annexe A.2

2.3. Quelques définitions

2.3.1. Les rues canyons

Selon la définition de Nicholson. (1975), le terme de **rue canyon** fait référence à **une rue relativement étroite avec des bâtiments en continu des deux côtés de la rue**. Vardoulakis et al. (2003) précise cette définition en rajoutant que ce terme est aussi utilisé pour discuter des rues plus larges appelées **avenues canyons**. Selon lui, une rue canyon ne doit pas obligatoirement être composée de bâtiments en continu et peut présenter **quelques ouvertures** sur les 2 côtés.

Les rues canyons présentent une réelle complexité car l'amélioration ou la détérioration de la qualité de l'air va dépendre d'une combinaison de facteurs tels que le **rapport hauteur des bâtiments / largeur de la rue**, noté h/w et appelé le **rapport d'aspect**, le trafic, la densité de végétation et la direction du vent.

Plus précisément, une **avenue canyon** a un rapport d'aspect inférieur à 0,5. Une **rue canyon** est dite **régulière** si elle ne possède pas de grandes ouvertures sur les côtés de la rue et que son rapport d'aspect est environ égal à 1. Un rapport d'aspect égal à 2 définit une rue canyon dite **profonde**.

Suivant le rapport d'aspect h/w d'une rue, avec h la hauteur des bâtiments et w la largeur de la rue, Oke (1988) a distingué trois types d'**écoulements du vent** :

- un écoulement de **rugosité isolé** lorsque ce rapport est inférieur à 0,2 (figure 3, a) ("Isolated roughness flow" en anglais) : situation où la rue est assez large pour que 2 vortex (zone de recirculation de l'air) indépendants se développent des 2 côtés de la rue.
- un écoulement à **interface de sillage** lorsque le rapport est compris entre 0,2 et 0,65 (figure 3, b) ("Wake interference flow" en anglais) : situation où plusieurs tourbillons interagissent dans la rue et forment ainsi un écoulement de l'air très complexe.
- un **écoulement rasant** lorsque le rapport est supérieur à 0,65 (figure 3, c) ("Skimming flow" en anglais) : situation dans laquelle un seul vortex se développe dans la rue canyon. Ce vortex reste bloqué dans la rue qui entraîne une accumulation des polluants entre les deux bâtiments et laisse peu d'échange avec l'écoulement du vent qui passe au-dessus de la rue.

Ainsi, pour une bonne circulation de l'air, **la géométrie de la rue canyon doit être limitée à la valeur seuil de l'écoulement rasant**, soit un rapport d'aspect inférieur à 0,65 Oke (1988)

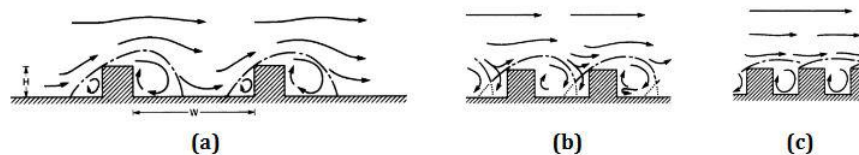


FIGURE 3 – Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect h/w de la hauteur et de sa largeur : (a) écoulement à rugosité isolée, (b) un écoulement à interface de sillage, (c) écoulement rasant d'après Oke et Nakamura,(1988)

Les études de Chan (2001) révèlent que **la concentration la plus élevée dans une rue canyon se trouve au pied du mur sous le vent**, quelle que soit la position de la source. Vardoulakis et al. (2003) présente la même conclusion en prenant en exemple les mesures sur le terrain de DePaul and Sheih (1985) et Qin et Kot, (1993). En effet, leurs mesures montrent une augmentation des concentrations des polluants liés au trafic routier sur le côté du canyon sous le vent et une diminution des concentrations en fonction de la hauteur des deux côtés de la rue. L'augmentation des concentrations dans la rue sous le vent est due à l'**accumulation des polluants** déplacés par le grand vortex qui tourbillonne dans la rue canyon.

Ce phénomène s'illustre en présentant les résultats de l'étude de modélisation 3D effectuée par Atmo Hauts-de-France en 2019 sur le quartier du stade BP à Saint-Pol-sur-Mer. Sur la figure 20, la carte de concentrations en NO_2 avec la légende détaillée (carte de droite) et la coupe transversale montrent un **effet canyon** entre deux bâtiments au sud du quartier. Les concentrations en NO_2 sont plaquées contre le bâtiment situés le plus au Sud. La rose des vents montre que les vents dominants du quartier sont des vents de Sud. Comme indiqué précédemment par Chan (2001) et Vardoulakis et al. (2003), les concentrations en polluants les plus élevées se trouvent au pied du bâtiment sous le vent (ici sous les vents dominants).

Etude du StadeBP à Saint-Pol-sur-mer (2019)

Modélisation des concentrations en dioxyde d'azote pour 2 scénarios

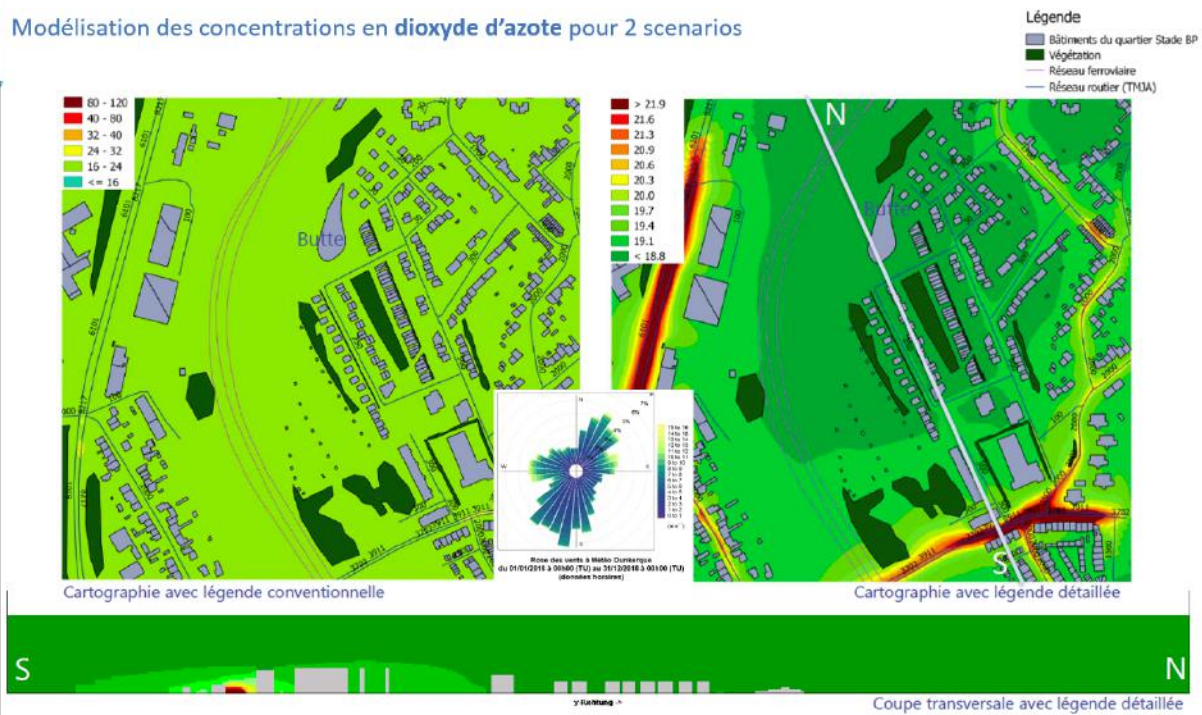


FIGURE 4 – Modélisation des concentrations en dioxyde d'azote pour 2 scénarios de l'étude du StadeBP à Saint-Pol-sur-mer et rose des vents de la station météo du quartier (Atmo Hauts-de-France 2019)

3. Étude

3.1. Méthodologie

3.1.1. Domaine-test et points d'intérêts

Dans cette étude, différents scénarios de modélisation de la dispersion des polluants sur un domaine-test ont été réalisés afin d'évaluer précisément les concentrations selon l'aménagement urbain modélisé.

Ce domaine contient d'une part des **axes routiers** et des bâtiments variés représentant des **rues** caractéristiques de zones urbaines et d'autres part différents types de **végétation** (figure 5).

Les voiries du domaine-test comptent un boulevard à 4 voies, trois rues à double voies, une rue à simple voie et une autoroute périphérique à 4 voies au sud du domaine. Les rues du quartier virtuel sont composées de rues canyons, de rues avec des bâtiments des 2 côtés, de rues avec présence de bâtiments et de végétation de manière unilatérale et des rues avec des cours ouvertes.

Cette configuration du quartier permet de s'intéresser à la **variation des concentrations** en particules PM₁₀ et en NO₂ sur des lieux ayant des caractéristiques spécifiques. Pour ce faire, **12 points d'intérêts** ont été sélectionnés sur le domaine-test et sont représentés sur la figure 5. Le tableau ci-dessous décrit précisément les lieux de chacun des points ainsi que l'étude pour laquelle l'évaluation des concentrations en ce point est pertinente.

Points d'intérêts	Position	Etudes
1	Au pied du bâtiment qui longe l'autoroute	hauteur - distance
2	Au pied de la haie qui longe l'autoroute	hauteur - distance
3	Au pied de la haie qui borde le boulevard à 2x2 voies	hauteur - distance
4	Au pied d'un bâtiment qui borde le boulevard à 2x2 voies dans une avenue canyon	hauteur - distance
5	Au pied d'un bâtiment dans une avenue canyon au bord d'une route à 1 voie	hauteur - distance
6	Au pied d'une cour ouverte au bord d'une route à 1 voie	hauteur
7	au pied d'un bâtiment au bord d'un boulevard à 2 voies dans une avenue canyon	hauteur - distance
8	au pied des 2 haies qui bordent le boulevard à 2 voies	distance
9	derrière une haie (gauche) qui longe le boulevard à 2 voies	végétation
10	derrière une haie (droite) qui longe le boulevard à 2 voies	végétation
11	à l'extrémité gauche de la haie qui longe l'autoroute	végétation
12	à l'extrémité droite de la haie et proche du bâtiment qui longe l'autoroute	végétation

TABLE 1 – Tableaux récapitulatifs de la position et de l'utilité des points



FIGURE 5 – Domaine-test d'étude de modélisation 3D et position des 12 points d'intérêts sélectionnés.

3.1.2. Modélisations

L'approche de modélisation numérique consiste à faire varier un des trois paramètres à la fois (la **hauteur des bâtiments**, la **distance entre les bâtiments et la route** et la **densité de la végétation**) pour des types de trafic routier contrastés et ainsi d'étudier l'impact de ces trois paramètres clés sur la qualité de l'air de la zone urbaine.

Le trafic routier se caractérise par un **trafic moyen journalier annuel**, noté **TMJA**, correspondant à un nombre de véhicules légers observés sur la voie par jour, en moyenne sur une année. Le tableau ci-dessous récapitule les différentes valeurs de TMJA utilisées pour l'autoroute et pour les autres voiries du domaine de modélisation.

Ces valeurs ont été tirées des expériences passées d'Atmo Hauts-de-France en concertation avec la MEL et la CUD.

	Autoroute	Autres voiries
TMJA faible	60 000 véhicules légers/jour	12 000 véhicules légers/jour
TMJA moyen	90 000 véhicules légers/jour	25 000 véhicules légers/jour
TMJA dense	120 000 véhicules légers/jour	50 000 véhicules légers/jour

Pour avoir une évaluation complète des paramètres d'intérêts, **9 modélisations par paramètre et par polluant** ont été réalisées : 3 valeurs du paramètre pour 3 TMJA contrastés par polluant.

Globalement, pour toute l'étude, 7 calculs d'écoulement du vent, 42 calculs de dispersion de polluants et 42 calculs statistiques, soit environ **350 heures de calcul** ont été nécessaires. En exemple, voici le détail pour le paramètre de la **hauteur des bâtiments** :

- **3 calculs de l'écoulement du vent** pour un quartier avec des hauteurs faibles, moyennes et grandes (16 heures par calcul)
- **9 calculs de dispersion des polluant** pour 2 polluants (NO₂ et PM₁₀) : 3 calculs pour les hauteurs faibles, moyenne et grandes pour des TMJA faible, moyen et fort. (2 heures 45 minutes par calcul)
- **9 calculs statistiques** permettant d'évaluer la concentration en polluants dans chaque maille : calculs divisés de la même manière que le calculs de dispersion des polluants. (2 heures 45 minutes par calcul)

La même méthode a été utilisée pour les deux autres paramètres étudiés : la distance du bâti à la route et la densité de végétation.

Dans ce rapport, l'impact des 3 paramètres intérêts est présenté en combinant les résultats de la modélisation 3D sur le domaine-test, les résultats présentés dans les publications scientifiques et les ceux obtenus lors de études passées.

3.2. Étude 1 : Impact de la hauteur des bâtiments

3.2.1. Introduction

Dans cette partie, l'**impact de la hauteur du bâti** sur la qualité de l'air d'un quartier est évalué grâce à **18 simulations** (9 simulations par polluant) dans lesquelles trois distances sont étudiées pour des valeurs de TMJA faibles, moyennes et fortes.

Le tableau ci-dessous récapitule les hauteurs des bâtiments utilisées dans les modélisations 3D.

	Niveaux
Hauteur petite	R (équivalent 4 mètres)
Hauteur moyenne	R+3 (équivalent 13 mètres)
Hauteur élevée	R+5 (équivalent 19 mètres)

Dans les simulations présentées ci-dessous, les autres paramètres, c'est-à-dire la **distance entre le bâti et la route** et la **densité de la végétation**, sont fixées à leur **valeur moyenne**, soit une distance de 30 mètres pour l'autoroute et 10 mètres pour les autres voiries, et 3.3 m²/m de densité de végétation³.

Afin d'analyser l'impact de la hauteur des bâtiments sur les concentrations en polluant d'un quartier, les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote NO₂ et en particules PM₁₀ sont présentées. Les concentrations sont calculées entre 1 et 2 mètres de hauteur correspondant à l'air respiré par des piétons.

3.2.2. Résultats des modélisations 3D et interprétations

Au niveau des rues canyons

Afin d'évaluer l'impact des rues canyons sur les concentrations en NO₂ et en particules PM₁₀, les points d'intérêts 4, 5 et 7 sont analysés (voir tableau 1 et figure 5).



Ces points d'intérêt, en jaune dans la figure ci-contre, présentent la particularité de se trouver dans une rue de ce type : des bâtiments sont situés des deux côtés de la rue, seules les voiries sont différentes, 2x2 voies, 1 voie et 2 voies, respectivement. Comme expliqué précédemment, la variation de la hauteur des bâtiments change le rapport d'aspect de la rue canyon. (voir paragraphe 2.3.1)

Les résultats obtenus avec les modélisations 3D du logiciel MISKAM présentent des résultats similaires au niveau des points d'intérêt 4 et 7 comme le montre la table 2 suivante :

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Hauteurs petites (4m)	Hauteurs moyennes (13m)	Hauteurs grandes (19m)
Point 4	NO ₂	faible	22.2	20.9	19.9
		moyen	31.3	28.4	26.5
		fort	47.2	42.6	39.2
	PM10	faible	22.3	22.0	21.7
		moyen	24.4	23.6	23.1
		fort	28.6	27.0	25.9
Point 5	NO ₂	faible	22.5	23.2	21.7
		moyen	32.2	33.3	30.6
		fort	45.6	46.8	43.1
	PM10	faible	22.2	22.2	21.9
		moyen	24.1	24.2	23.5
		fort	27.5	27.8	26.6
Point 7	NO ₂	faible	22.4	20.4	19.8
		moyen	33.6	29.6	28.2
		fort	50.0	43.7	41.6
	PM10	faible	22.3	21.8	21.6
		moyen	24.7	23.5	23.2
		fort	29.2	26.9	26.2

TABLE 2 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments aux points 4, 5 et 7

Au niveau de ces deux points d'intérêt, **les concentrations en dioxyde d'azote NO₂ augmentent en fonction des TMJA**. Les particules PM₁₀ suivent la même tendance mais les écarts de concentrations entre les scénarios sont moins importants.

Les concentrations des deux polluants sont **plus faibles** lorsque les hauteurs des bâtiments sont fixés à une **grande hauteur** de 19 mètres quel que soit le TMJA. Les concentrations les **plus élevées** sont observées lorsque les bâtis sont de **petite taille** (4 mètres) pour les 2 polluants. .

Par contre, au point d'intérêt 5, les résultats sont différents et montrent la **complexité et la variété des écoulements du vent** à l'échelle d'un quartier. En effet, à ce point, les concentrations minimales en polluants sont également obtenus avec des bâtiments de grandes tailles mais les concentrations maximales sont calculées pour des hauteurs moyennes et non des petites hauteurs comme pour les points 4 et 7.

Pour aller plus loin, les détails des résultats obtenus aux points d'intérêt 4, 5 et 7 sont présentés dans l'annexe A.3.

Interprétation des résultats dans les rues canyons

La figure 6 montre les concentrations en NO₂ sur l'ensemble du domaine d'étude entre 1 et 2 mètres (hauteur de piétons).

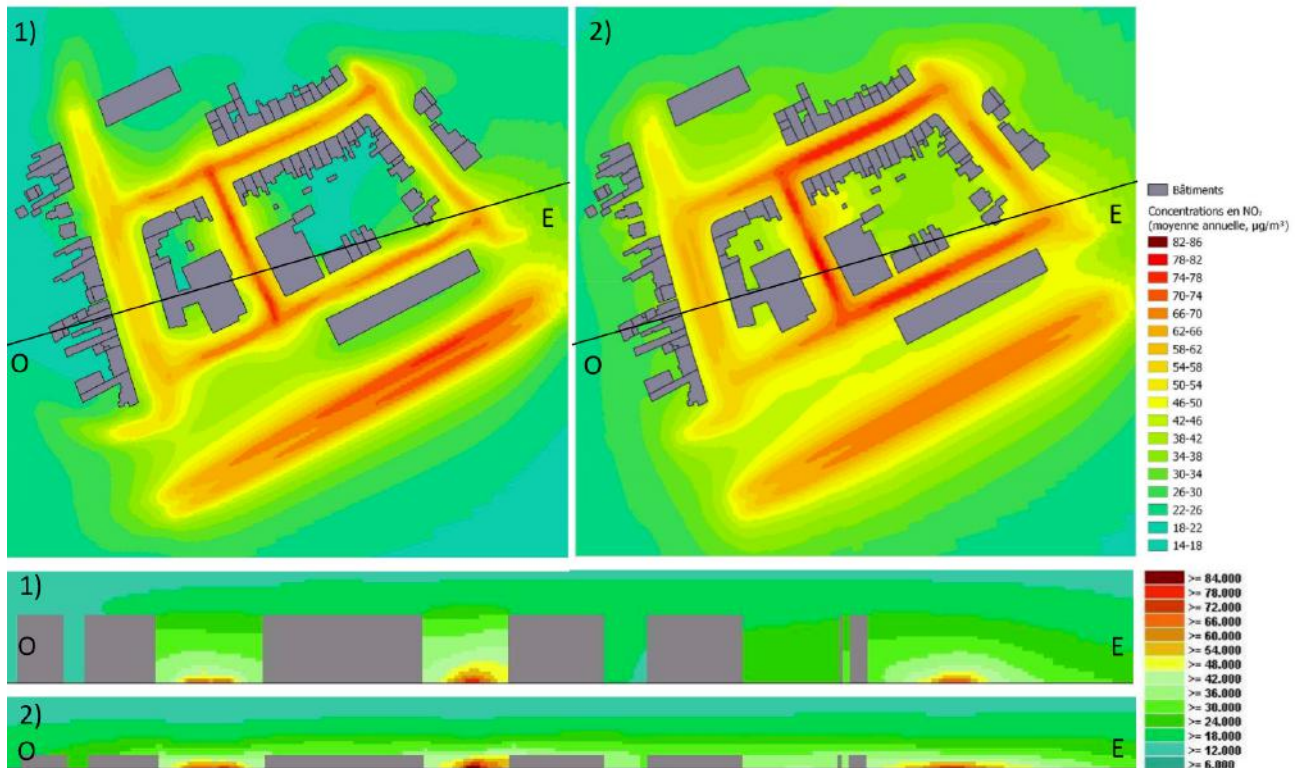


FIGURE 6 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ (µg/m³) entre 1 et 2m avec des bâtiments à hauteurs grandes (1) et petites (2) avec un TMJA élevé - Coupe transversale Ouest - Est

Les résultats 1) et 2) de la figure 6 montrent des effets vortex importants le long des bâtiments de l'avenue du point d'intérêt 4 lorsque les hauteurs des bâtiments sont grandes. Ces tourbillons expliquent pourquoi les concentrations sont plus faibles sur les trottoirs de cette avenue lorsque les hauteurs sont élevées mais **cet effet n'est pas généralisé à toutes les avenues du domaine**. Les résultats dans la rue du point d'intérêt 5 le montrent.

Le tableau suivant récapitule les **rapports d'aspect** (paragraphe 2.3.1) des rues et avenues des points d'intérêt 4, 5 et 7. Dans le quartier de l'étude 3D MISKAM, les concentrations minimales en polluants au niveau des trottoirs sont obtenues pour des hauteurs de bâtiments grandes dans des rues avec un rapport d'aspect de 0,63 pour l'avenue du point 4 et 0,79 pour les points 5 et 7. Par contre les résultats du point 5 montrent que le rapport d'aspect n'est pas le seul paramètre à prendre en compte car selon sa position et la forme de ses bâtiments chaque rue présente un écoulement du vent différent.

	Avenue au point 4			Avenue au point 7 et Rue au point 5		
Distance bâti/route	moyenne (10 m)			moyenne (10 m)		
Largeur de l'avenue (W)	30 m			24 m		
Hauteur des bâtiments (H)	petite (4 m)	moyenne (13 m)	grande (19 m)	petite (4 m)	moyenne (13 m)	grande (19 m)
Rapport d'aspect (H/W)	0,13	0,43	0,63	0,17	0,54	0,79
Régime d'écoulement	Isolated roughness flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Wake interference flow

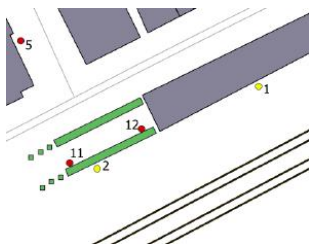
TABLE 3 – Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7

L'interprétation approfondie des résultats dans les rues canyons est présentée dans l'annexe A.4.

L'étude 3D MISKAM montre donc que **la hauteur des bâtiments a un impact complexe sur l'écoulement du vent et la pollution de l'air dans les rues d'un quartier**. Il est difficile d'établir des recommandations générales sur la typologie de rues favorables à la qualité de l'air (Cerema (2017)). Il n'y a pas de bons rapports d'aspect à retenir pour favoriser une bonne dispersion des polluants car **l'écoulement du vent dans les rues est complexe pour des rapports d'aspect compris entre 0,2 et 0,65**. Il est donc nécessaire d'**analyser l'écoulement du vent** en amont des projets d'urbanisme. Par contre **des rapports d'aspect supérieurs à 0,65 doivent être évités pour ne pas construire des rues canyons régulières et profondes** où les polluants stagneront et s'accumuleront.

Les outils de modélisation 3D comme le logiciel MISKAM sont des bons outils d'aide à la décision pour simuler la dispersion des polluants et évaluer, au cas par cas, l'impact de différents scénarios d'aménagement sur la qualité de l'air. (Cerema (2017))

Au bord de l'autoroute



Au niveau des points d'intérêts 1 et 2 situés le long de l'autoroute (en jaune sur l'image ci-contre), les concentrations en dioxyde d'azote suivent la même tendance que précédemment avec des concentrations plus faibles lorsque la hauteur des bâtiments est élevée (19 mètres) quel que soit le trafic.

Pour aller plus loin, les détails des résultats obtenus aux points d'intérêt 1 et 2 sont présentés dans l'annexe A.5.

Les résultats obtenus avec les modélisations 3D du logiciel MISKAM sont décrits dans le tableau suivant (Table 4) :

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Hauteurs petites (4m)	Hauteurs moyennes (13m)	Hauteurs grandes (19m)
Point 1	NO ₂	faible	21.9	18.5	17.7
		moyen	30.4	23.3	21.7
		fort	39.5	28.7	26.1
	PM10	faible	21.9	18.5	17.7
		moyen	30.4	23.3	21.7
		fort	39.5	28.7	26.1
Point 2	NO ₂	faible	22.3	21.7	20.9
		moyen	31.2	29.9	28.3
		fort	41.6	38.9	36.5
	PM10	faible	22.3	22.1	21.9
		moyen	23.9	23.5	23.2
		fort	26.2	25.4	24.8

TABLE 4 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments aux points 1 et 2

Interprétation des résultats au bord de l'autoroute

Les cartes de concentrations sur la figure 7 montrent une vue globale des résultats en PM₁₀ sur l'ensemble du domaine d'étude entre 1 et 2 mètres de hauteur.

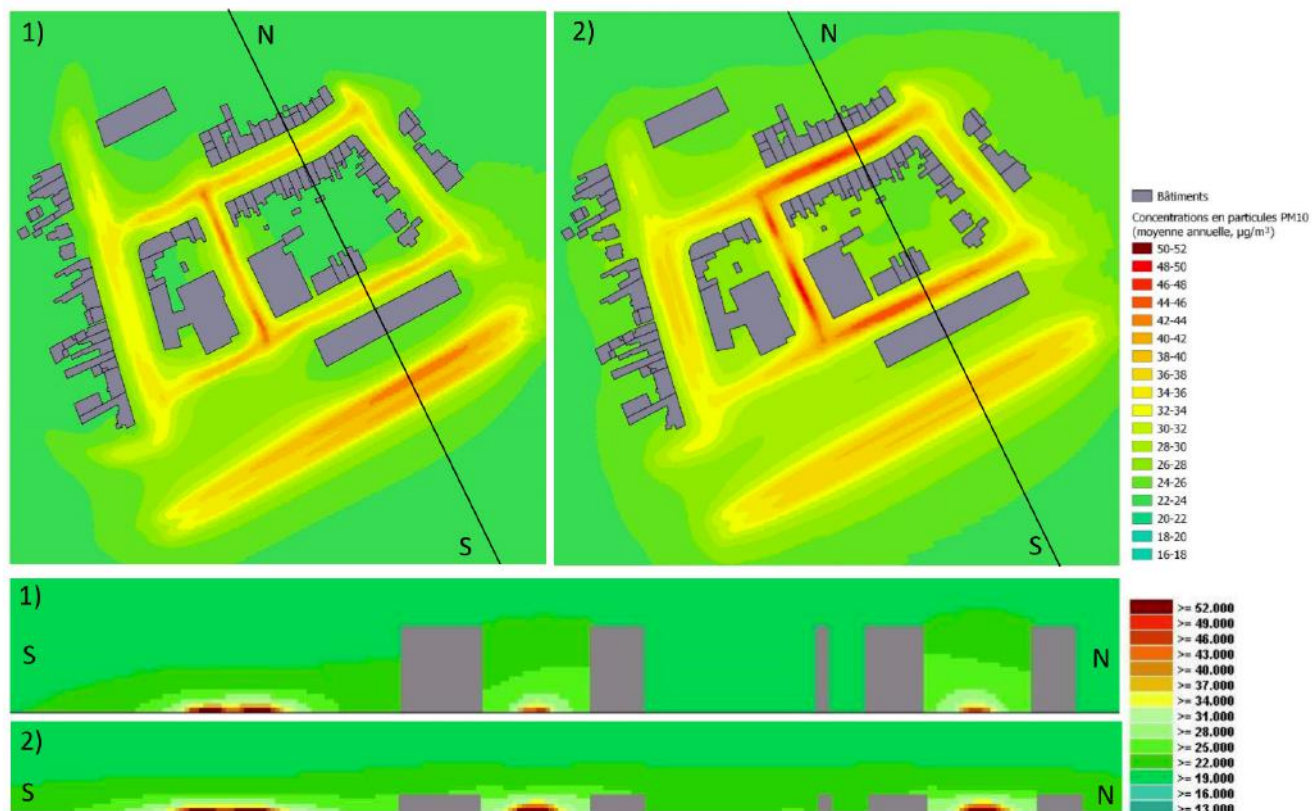


FIGURE 7 – Concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ (µg/m³) entre 1 et 2 m avec des bâtiments à hauteurs grandes (1) et petites (2) avec des TMJA forts dans les deux cas. - Coupe transversale Nord-Sud

Les cartes de concentrations de la figure 6 pour le dioxyde d'azote, et de la figure 7 pour les particules PM_{10} , montrent ce phénomène de vortex (zone de recirculation) au pied du bâtiment qui longe l'autoroute. En effet, à grandes hauteurs, une "bulle de protection" créée par le vortex se forme autour du bâtiment et explique les concentrations en polluant plus faibles au point 1 lorsque les hauteurs sont élevées. Les concentrations au point 2 sont assez homogènes car le vortex n'a pas d'impact en étant plus éloigné du bâtiment.

L'interprétation détaillée des résultats au bord de l'autoroute est présentée dans l'annexe A.6.

Ces résultats sont à mettre en parallèle avec ceux du projet de **modélisation 3D du quartier Concorde à Lille**. Dans cette étude, les bâtiments peuvent agir comme une barrière qui bloque les polluants en créant une accumulation devant le bâtiment sous le vent mais qui peut aussi permettre de protéger une zone derrière le bâtiment. (Figure 8)

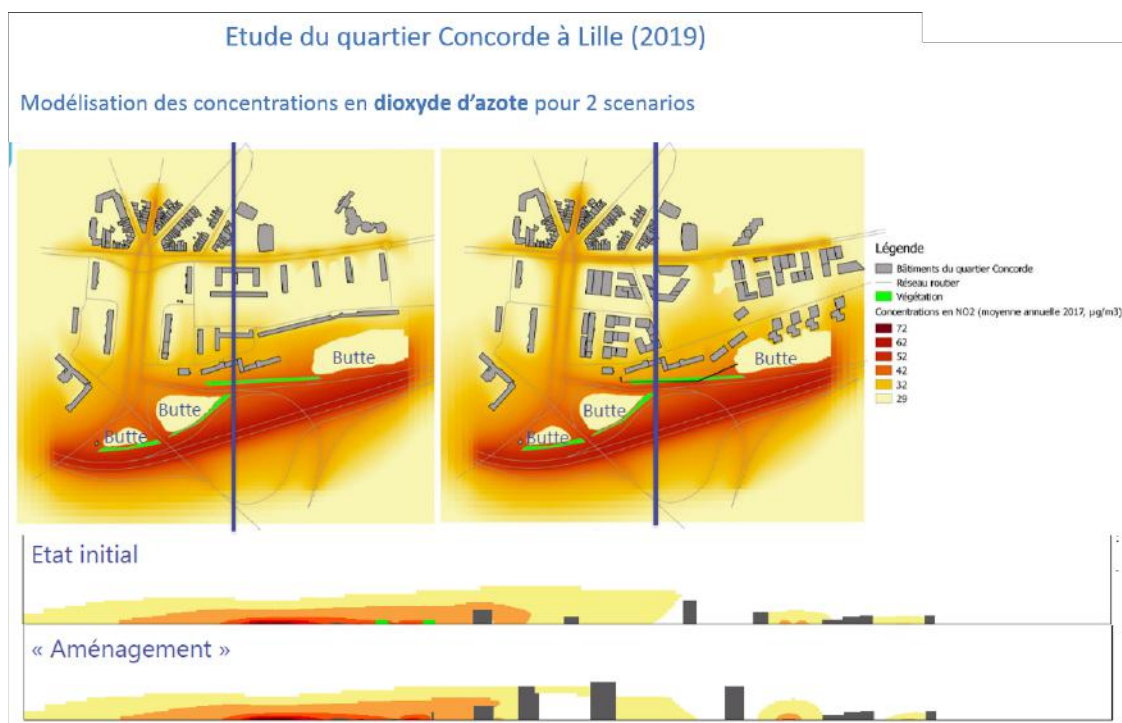


FIGURE 8 – Modélisation des concentrations en dioxyde d'azote pour 2 scénarios de l'étude du quartier Concorde à Lille (Atmo Hauts-de-France 2019).

La coupe transversale "aménagement" de la figure ci-dessus montre bien que la construction de nouveau bâtiment à hauteur élevée dans le scénario d'aménagement a permis d'améliorer la qualité de l'air entre le troisième et quatrième bâtiment.

Ce projet est un bon exemple de quartier impacté par une autoroute proche. Les barrières d'autoroutes et les bâtiments à **hauteurs élevées** permettent de faire **obstacle à la pollution** mais ne sont pas une solution idéale. En effet, la pollution peut **stagner** au niveau de l'autoroute et d'autre part la population présente dans ses bâtiments écrans se retrouvera **fortement exposée** à la pollution atmosphérique.

Au niveau d’une zone ouverte



Le point d’intérêt 3 (en jaune sur la figure ci-contre) se trouve dans une zone ouverte directement impactée par les vents dominants d’Ouest/Sud-Ouest. Au niveau de cette zone ouverte, la hauteur des bâtiments a un impact minime sur les concentrations en polluant (dioxyde d’azote et particule PM₁₀). Ceci s’explique par le fait que ces points se trouvent dans une zone qui n’est pas influencée par les bâtiments et aucun obstacle ne vient perturber la dispersion des polluants.

Les résultats obtenus avec les modélisations 3D du logiciel MISKAM sont décrits dans le tableau suivant (Table 5) :

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Hauteurs petites (4m)	Hauteurs moyennes (13m)	Hauteurs grandes (19m)
Point 3	NO ₂	faible	22.3	22.8	22.5
		moyen	31.3	32.5	32.3
		fort	46.5	48.5	47.9
	PM10	faible	22.3	22.5	22.4
		moyen	24.4	24.7	24.6
		fort	28.3	29.1	28.7

TABLE 5 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3

Pour aller plus loin, les résultats obtenus au point d’intérêt 3 sont présentés dans l’annexe A.7.

Dans un contexte de zone ouverte, le bâti a peu d’impact sur les concentrations calculées : aucun obstacle ne vient perturber la dispersion des polluants.

3.2.3. Conclusion et recommandations

Les différentes modélisations réalisées et l'analyse bibliographique confirment que **la hauteur du bâti** dans une zone urbaine est un **paramètre clé** dont il est nécessaire de tenir compte dans les plans d'aménagements urbains.

Plus particulièrement, **le rapport d'aspect h/w** est un paramètre déterminant qui joue un rôle important sur la dynamique des polluants dans une rue canyon. **Le rapport d'aspect h/w** ne doit pas dépasser 0,65 pour éviter l'effet canyon et l'accumulation des polluants dans une rue (cf paragraphe 2.3.1).

L'**étude des vents dominants** de la zone du nouvel aménagement urbain s'avère aussi primordial. La vitesse et la direction du vent dominant du quartier ayant un impact déterminant sur les concentrations de polluants. En effet, les rues perpendiculaires au vent dominant doivent idéalement avoir un bâtiment en amont du vent 2 fois plus grand que celui en aval du vent pour favoriser une bonne dispersion des polluants et empêcher la formation d'un effet canyon (l'analyse sur le domaine-test est disponible en annexe A.9).

Privilégier des zones urbaines avec **hauteurs non homogènes** du bâti en essayant de respecter un alignement **décroissant des hauteurs** de bâtiments (la question est approfondie en annexe A.8).

Proche d'une **autoroute**, un **bâtiment à hauteur élevée**, parallèle à l'axe routier, agit comme une barrière au pied du bâtiment et derrière le bâtiment.

3.3. Étude 2 : Impact de la distance du bâti à la route

3.3.1. Introduction

Comme dans la partie précédente, l'**impact de la distance entre le centre de la route et les bâtiments** est évalué grâce à **18 simulations** (9 simulations par polluant) dans lesquelles trois distances sont étudiées pour des valeurs de TMJA faibles, moyennes et fortes. Dans ces simulations, **la hauteur du bâti et la densité de la végétation** présentes dans le domaine sont fixées à des valeurs dites "**moyennes**". C'est-à-dire 13 mètres de hauteur pour les bâtiments et $3,3 \text{ m}^2/\text{m}^3$ pour la densité de la végétation.

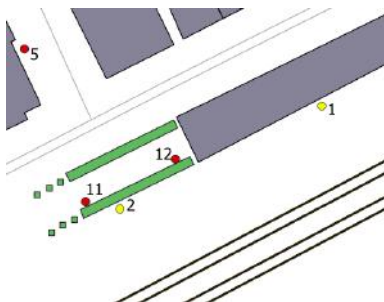
Le tableau ci-dessous récapitule les distances entre la façade des bâtiments et le centre des routes utilisées dans les modélisations 3D.

	Autoroute	Autres voiries
Distance faible	15 mètres	6 mètres
Distance moyenne	30 mètres	10 mètres
Distance élevée	50 mètres	14 mètres

Pour le choix des distances, la distance moyenne correspond à la distance utilisée dans les projets de modélisation 3D déjà réalisés par Atmo Hauts-de-France. Les distances faibles et élevées ont été choisies en analysant les distances dans de grandes villes telles que Lille et Paris afin de définir des valeurs cohérentes.

3.3.2. Résultats des modélisations 3D et interprétations

Au bord de l'autoroute



Proche de l'autoroute, au niveau des points d'intérêts 1 et 2 (voir points en jaune ci-contre et dans le tableau 1), **les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote NO₂ et particules PM₁₀ augmentent en fonction des TMJA.**

Les concentrations en polluants au bord du bâtiment qui longe l'autoroute **diminuent** en fonction de l'augmentation de la **distance**. Les écarts de concentrations en polluants pour des distances faibles et moyennes sont plus importants que les écarts pour des distances moyennes et grandes.

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Distances faibles (15m)	Distances moyennes (30m)	Distances grandes (50m)
Point 1	NO ₂	faible	24.8	18.5	17.0
		moyen	35.2	23.3	20.3
		fort	44.1	28.7	24.0
	PM10	faible	23.0	21.3	21.0
		moyen	24.9	22.1	21.5
		fort	26.9	22.9	22.0
Point 2	NO ₂	faible	27.3	21.7	19.2
		moyen	39.6	29.9	25.0
		fort	50.6	38.9	32.2
	PM10	faible	23.7	22.1	21.5
		moyen	26.3	23.5	22.4
		fort	29.3	25.4	23.7

TABLE 6 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes distances à la route aux points 1 et 2

Pour aller plus loin, le détail des résultats obtenus aux points d'intérêt 1 et 2 est présenté dans l'annexe A.10.

Interprétation des résultats au bord de l'autoroute

Les cartes de concentrations en NO₂ présentées sur la figure 9 montrent la **diminution des concentrations** en NO₂ lorsque la **distance** entre le bâti et l'autoroute **augmente**.

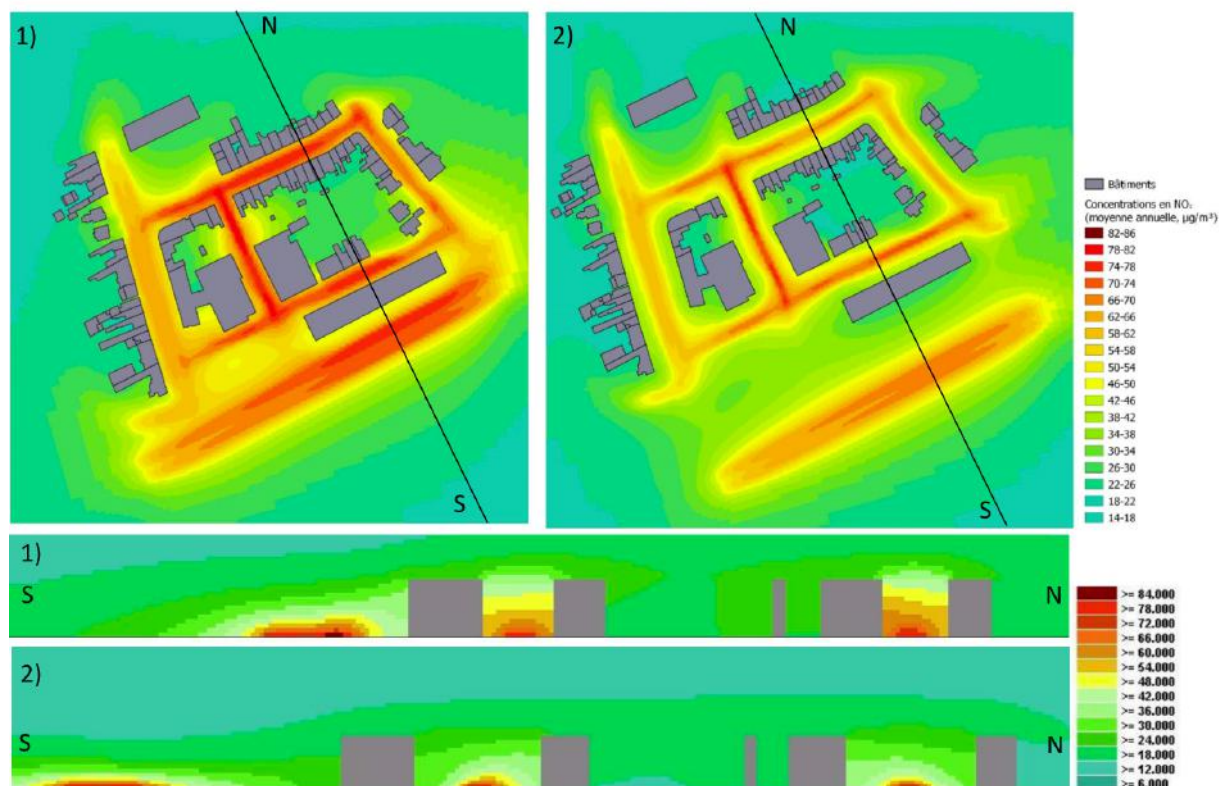


FIGURE 9 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ entre 1 et 2 m avec des distances entre le bâti et la route petites (1) et grandes (2). Dans les deux cas, les TMJA sont élevés - Coupe transversale Nord-Sud

Les publications scientifiques de ce domaine d'étude vont dans le même sens que les résultats obtenus avec les modélisation 3D MISKAM.

En effet, Jones et al. (2000) présente une étude avec le modèle CALINE4, largement utilisé pour évaluer les concentrations au bord des routes, qui conforte les résultats de nos modélisations. Cette étude se base sur un tronçon routier de 200 mètres avec plusieurs configurations de voies (voir encadrés de la figure 10)

La vitesse est définie à 16 km/h pour correspondre à la vitesse dans une situation de trafic très dense. Chaque voie a un TMJA de 6000 véhicules. La direction du vent est perpendiculaire à la route avec des conditions de dispersion stable de 2 m/s. Les points d'intérêts sont situés à 5, 10, 20 et 50 mètres de l'axe de la route.

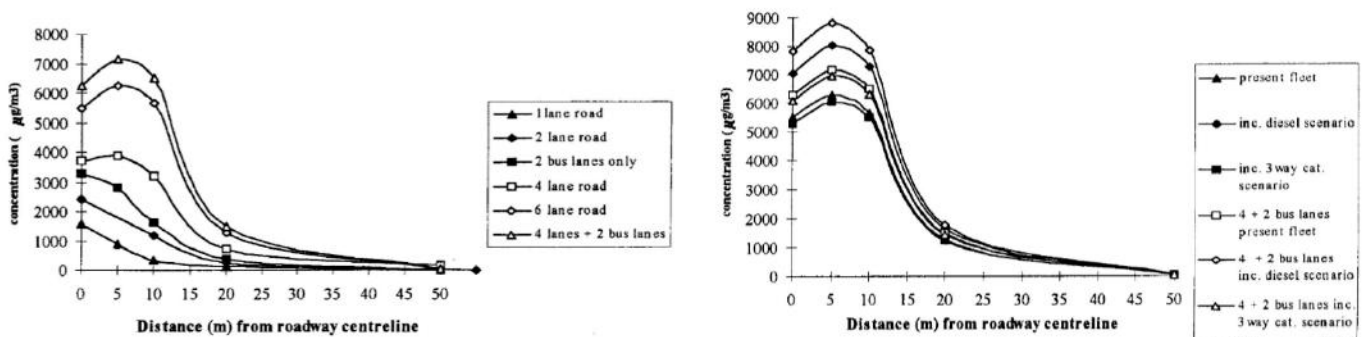


FIGURE 10 – Concentrations totales de particules - Condition stable et vent léger - Effet de la taille de la route et de la gestion du trafic (gauche) - Effet du changement du parc routier sur une route à 6 voies (droite) JONES et al. (2000)

La route à 6 voies présente les plus hautes concentrations. Cette route a un TMJA de 36 000 ce qui représente un peu plus de la moitié des TMJA de l'autoroute du quartier virtuel de l'étude 3D MISKAM qui est défini à 60 000 véhicules légers par jour en situation de TMJA faible.

Cette modélisation montre que **la concentration en polluants décroît très rapidement avec la distance au centre de la route**. Comme le montre la figure 10, au bord de ces routes, la concentration totale de particules atteint son maximum à une distance de 5 mètres de la route et décroît fortement jusqu'à 20 mètres de la route. A partir d'une distance de 20 mètres, la concentration totale de particules diminue faiblement jusqu'à atteindre la valeur de la pollution de fond à 50 mètres de la route. Par contre, dans le quartier virtuel de l'étude 3D MISKAM, la concentration de fond n'est pas atteinte à 50 mètres car le TMJA est plus élevé. (TMJA moyen = 90 000 et TMJA fort = 120 000 véhicules léger /jour) Par ailleurs, la figure 10 montre que les différences entre les types de voies disparaissent également rapidement.

Les résultats montrent que la distance faible de 15 mètres entre les bâtiments et l'autoroute n'est pas suffisante pour obtenir des niveaux de concentrations satisfaisants.

Des distances de 30 à 50 mètres entre l'axe routier et le bâti sont à privilégier pour des aménagements urbains mais sont sensibles au TMJA de l'axe routier à proximité.

Retour d'expérience du quartier de l'Îlot des peintres à Grande-Synthe

En 2018, le modèle 3D MISKAM a été mis en œuvre sur le **quartier de l'îlot des Peintres à Grande-Synthe**. Ce projet réalisé par Atmo Hauts-de-France a permis de modéliser les concentrations en dioxyde d'azote d'un quartier construit à côté d'une départementale de 2 voies. La figure 11 montre les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote du scénario d'aménagement de ce quartier.



FIGURE 11 – Concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote du scénario d'aménagement au niveau du sol dans le quartier de l'îlot des peintres

La route départementale de ce quartier est fréquenté par 19 800 véhicules par jour (TMJA). Ce TMJA est situé entre le TMJA faible et moyen de l'étude de modélisation 3D MISKAM.

La diminution des concentrations à mesure que l'on s'éloigne de l'axe est rapide : au bord de la route départementale, il faut parcourir environ 70 mètres vers le centre de l'îlot pour que la concentration moyenne en NO_2 s'approche du niveau de fond. Selon ce principe de décroissance rapide, en bordure d'axes moins fréquentés, la distance à parcourir pour retrouver les concentrations de fond est moindre, surtout si un bâtiment fait effet d'écran. Ces conclusions sont spécifiques au quartier de l'îlot des peintres et nous allons étudier par la suite l'influence de la distance à la route sur des voies de catégories différentes.

Au niveau des rues canyons

Au niveau des rues du quartier, l'analyse des résultats des modélisations 3D montre que certains points d'intérêt présentent une différence importante entre les concentrations calculées pour des distances faibles et grandes alors que cette différence est moins marquée pour d'autres points.



L'étude consiste à comparer les points d'intérêts 4, 5 et 7 (voir points en jaune ci-contre voir tableau 1), tous situés dans des rues canyons, seul le type de voies diffère.

Les points sont situés proches de voies avec des caractéristiques différentes : le point 4 proche d'un boulevard à 2x2 voies, le point 7 proche d'un boulevard à 2 voies et le point 5 proche d'une rue à 1 voie.

Les concentrations en NO₂ augmentent en fonction des TMJA. De manière générale, les concentrations en polluants sont plus faibles lorsqu'il y a une grande distance entre le bâti et la route.

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Distances faibles (6m)	Distances moyennes (10m)	Distances grandes (14m)
Point 4	NO ₂	faible	23.4	20.9	19.1
		moyen	33.1	28.4	24.9
		fort	49.6	42.6	36.2
	PM10	faible	22.6	22.0	21.5
		moyen	25.0	23.6	22.7
		fort	29.7	27.0	25.0
Point 5	NO ₂	faible	28.9	23.2	20.1
		moyen	43.2	33.3	27.2
		fort	59.4	46.8	37.8
	PM10	faible	23.6	22.2	21.5
		moyen	27.1	24.2	22.8
		fort	33.4	27.8	25.0
Point 7	NO ₂	faible	25.8	20.4	18.0
		moyen	41.0	29.6	23.8
		fort	59.6	43.7	33.7
	PM10	faible	23.3	21.8	21.2
		moyen	26.9	23.5	22.2
		fort	33.7	26.9	24.1

TABLE 7 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes distances à la route aux points 4, 5 et 7

Pour des distances faibles et moyennes, les écarts de concentrations en polluants sont plus importants que les écarts entre des distances moyennes et grandes.

Pour approfondir, le détail des résultats obtenus aux points 4, 5 et 7 est présentée dans l'annexe A.11.

Interprétation des résultats dans les rues canyons

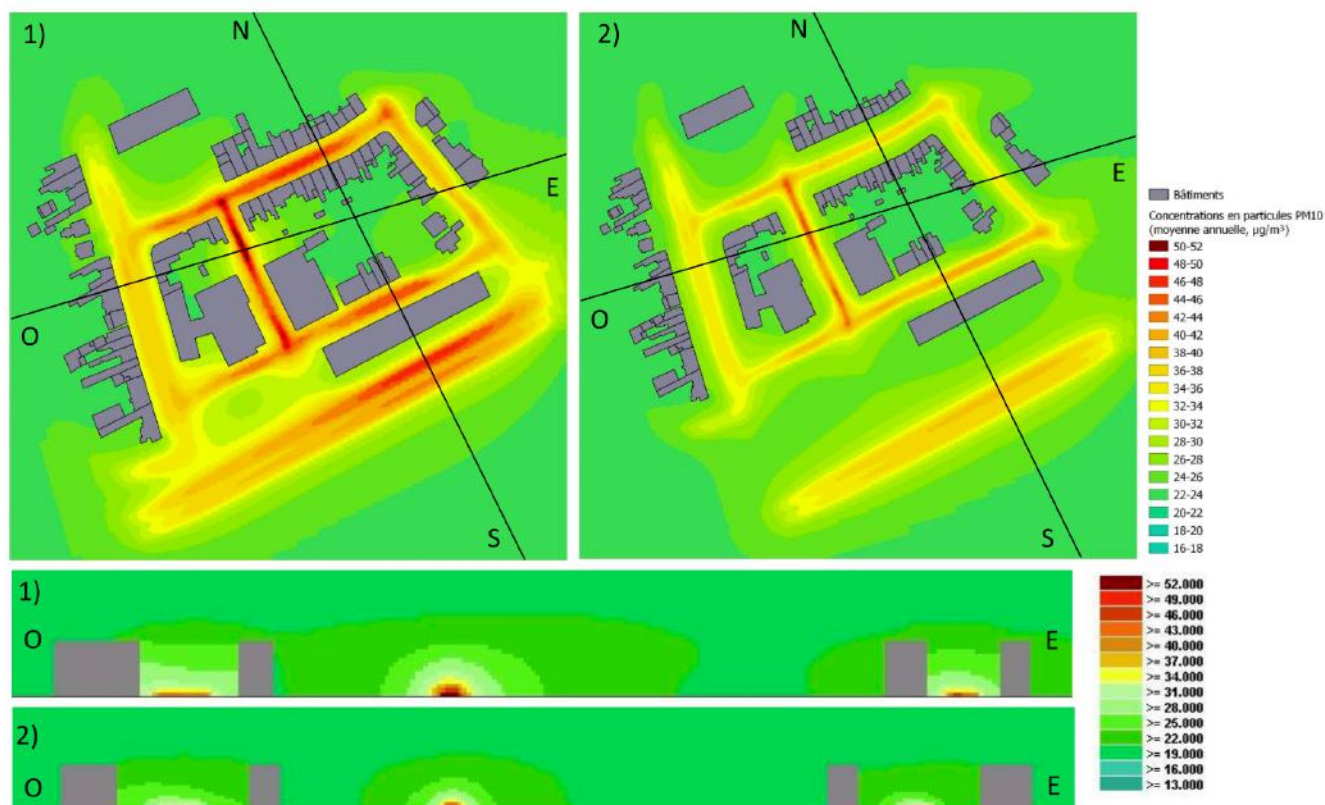


FIGURE 12 – Concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ (µg/m³) entre 1 et 2 m avec des distances entre le bâti et la route faibles (1) et élevées (2). Dans les deux cas, les TMJA sont élevés - Coupe transversale Ouest-Est

Les cartes de concentration en polluants de la figure 12 montre que l'augmentation de la distance et donc l' **augmentation de la largeur des rues permet une meilleure dispersion des polluants** pour toutes les rues du domaine d'étude. Dans cette partie, la hauteur des bâtiments est constante et fixée à 13 mètres. L'augmentation de la largeur de la rue entraîne donc une augmentation du volume des rues qui permet une meilleure dispersion des polluants et donc une baisse des concentrations.

	Avenue au point 4			Avenue au point 7			Rue au point 5		
Hauteur (h)	13 m			13 m			13 m		
Distance bâti/route	petite	moyenne	grande	petite	moyenne	grande	petite	moyenne	grande
Largeur de la rue (w)	22 m	30 m	39 m	14 m	23 m	31 m	17 m	24 m	32 m
Rapport d'aspect (h/w)	0,59	0,43	0,33	0,92	0,57	0,42	0,7	0,5	0,4
Régime d'écoulement	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Isolated roughness flow	Skimming flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow

TABLE 8 – Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7

Le tableau 8 récapitule les valeurs des rapports d'aspect aux points d'intérêt 4,5 et 7. Ce tableau nous montre que la largeur de la rue est un des paramètres du rapport d'aspect et donc qu'une rue large ne permet pas forcément d'assurer une bonne dispersion des polluants si la hauteur de la rue est trop élevée (rapport d'aspect supérieur à 0,65).

L'avenue du point 7 a un rapport d'aspect de 0,92 lorsque la distance est petite. Dans ce cas, l'avenue est une avenue canyon où un effet canyon se produit comme le montre la carte de concentration de la figure 12 et la coupe transversale de la figure 13.

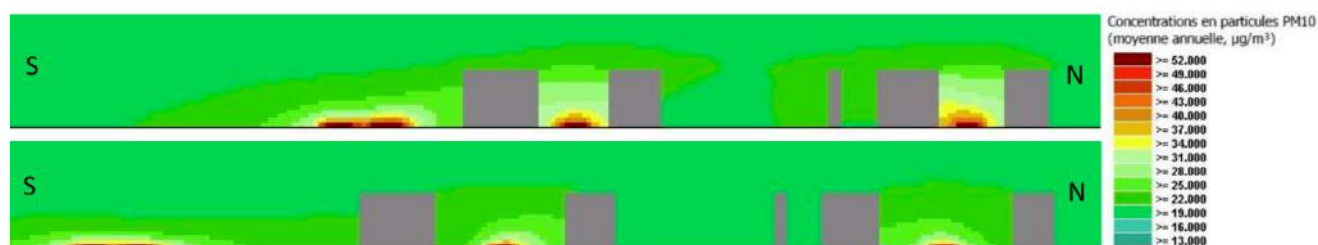


FIGURE 13 – Concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ (µg/m³) au niveau de la coupe transversale Nord-Sud

Pour aller plus loin, l'interprétation détaillée des résultats dans les rues canyons est présentée dans l'annexe A.12.

L'augmentation de la largeur de la voie entraîne une augmentation du volume des rues qui permet une meilleure dispersion des polluants et donc une baisse des concentrations localement.

3.3.3. Conclusion et recommandations

Au bord d'une autoroute, **les concentrations en polluants diminuent fortement entre 15 mètres et 30 mètres de la route** jusqu'à tendre vers la pollution de fond.

Le **trafic moyen** (TMJA) **doit être évalué** car une distance grande de 50 mètres par rapport au centre de la route n'est pas forcément suffisante pour voir disparaître l'influence de la route sur les concentrations.

Dans des boulevards et rues avec du bâti de chaque côté de la rue, **une augmentation de la largeur permet une meilleure dispersion des polluants.**

Le paramètre clé du **rapport d'aspect** (h/w) (paragraphe 2.3.1) doit être appréhendé pour éviter un régime d'écoulement qui engendrerait un effet canyon et donc une accumulation des polluants dans la rue.

Une distance entre le bâti et la route la plus grande possible doit être privilégiée lors de la construction d'un nouveau bâtiment et/ou quartier. Cette distance optimale va dépendre des TMJA mais également des hauteurs des bâtiments environnants.

3.4. Étude 3 : Impact de la végétation

3.4.1. Introduction

Le **rôle de la végétation** dans la réduction de la pollution de l'air est un **sujet complexe** en raison des multiples phénomènes qui peuvent entrer en jeu. De façon générale, l'ensemble des données empiriques ne suggèrent pas que les espaces verts soient des moyens efficaces pour réduire durablement la pollution de l'air, mais peuvent contribuer à atténuer l'exposition des populations à la pollution par différents mécanismes (Markevych et al., 2017).

Le logiciel **MISKAM** permet de prendre en compte la végétation par le biais de deux paramètres : **la densité de végétation LAD (m^2/m^3)** et le **pourcentage de couverture** des mailles du domaine par la végétation. Le LAD est la densité de la surface foliaire définie comme le rapport entre la surface foliaire et le volume total occupé par la végétation, il dépend du type d'arbre et varie avec la hauteur.

Aussi, afin d'analyser l'**impact de la densité de la végétation (m^2/m^3)** sur la qualité de l'air, comme précédemment, **18 simulations** différentes (9 simulations par polluant) ont été réalisées avec le logiciel MISKAM dans lesquelles **3 densités de végétation** ont été évaluées pour des valeurs de TMJA contrastées. Dans les simulations, la **hauteur des bâtiments** et la **distance entre les bâtiments et la route** présentes dans le domaine sont **fixées** à des valeurs dites "moyennes". C'est-à-dire 13 mètres de hauteur pour les bâtiments et une distance du bâti à la route de 10 mètres en ville et de 30 mètres pour l'autoroute.

Les densités de végétation utilisées dans les modélisations sont précisées dans le tableau ci-dessous (source : bureau Lohmeyer, GmbH & Co., All.) :

	Valeur	Type de végétation
Densité faible	$1 \text{ m}^2/\text{m}^3$	Chêne ; Hêtre
Densité moyenne	$3,3 \text{ m}^2/\text{m}^3$	Haie de mûres ; Groseillier épineux
Densité élevée	$8 \text{ m}^2/\text{m}^3$	Rhododendron du Caucase ; Canche cespiteuse

La littérature n'est pas unanime sur la question de savoir si la végétation en bordure de route réduit les concentrations de polluants, si elle n'a pas d'effet, ou même si elle augmente potentiellement la concentration en polluants sous le vent Baldauf (2017). En effet, les résultats des études peuvent, à la fois mettre en évidence que les barrières végétales peuvent entraîner des baisses de concentration en polluants ou au contraire augmenter les niveaux localement.

Afin d'analyser les résultats des modélisations du paramètre de densité de végétation (LAD), les 4 points d'intérêts : 9, 10, 11 et 12 sont étudiés (en jaune dans la figure ci-dessous).



Le point d'intérêt 9 se trouve derrière une haie d'une hauteur de 6 mètres et d'une largeur de 2 mètres au carrefour entre le boulevard à 4 voies et le boulevard à 2 voies. Le point 10 est situé derrière une haie de même dimension le long du boulevard à 2 voies.

Le point 11 se trouve à l'extrémité gauche d'une haie de 8 mètres de haut et 3 mètres de largeur, près de l'autoroute.

Le point 12 se trouve à l'extrémité droite de la même haie et proche du bâtiment qui longe l'autoroute.

3.4.2. Résultats des modélisations 3D et interprétations

Au bord de l'autoroute

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Densités faibles (1 m ² /m ³)	Densités moyennes (3,3 m ² /m ³)	Densités fortes (8 m ² /m ³)
Point 11	NO ₂	faible	21.0	21.0	21.4
		moyen	28.3	28.3	29.6
		fort	38.7	38.7	39.4
	PM10	faible	22.0	22.0	22.1
		moyen	23.4	23.4	23.5
		fort	25.6	25.6	25.6
Point 12	NO ₂	faible	21.0	21.0	19.5
		moyen	28.3	28.3	25.8
		fort	38.7	38.7	33.6
	PM10	faible	22.0	22.0	21.6
		moyen	23.4	23.4	22.6
		fort	25.6	25.6	24.0

TABLE 9 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation aux points 11 et 12

Les résultats des modélisations 3D MISKAM au bord de l'autoroute montrent la complexité de ce domaine d'étude. En effet, d'après Ghasemian (2017), **les barrières végétales sont fondamentalement plus complexes que les barrières solides**. En effet, la végétation étant un milieu poreux composé de branches et de feuilles qui sont perméables au vent, l'écoulement du vent qui passe à travers la végétation est différent de l'écoulement autour de barrières solides.

Interprétation des résultats au bord de l'autoroute

Le point 11 est situé dans une zone qui est influencée par les vents dominants d'ouest/sud-ouest. Dans cette zone complexe, au point 11, les concentrations les plus basses sont calculées avec une densité foliaire moyenne de 3,3 m²/m³ et faible de 1 m²/m³.

Par contre, au point 12, situé dans une zone où l'écoulement du vent est influencé par le bâtiment qui longe l'autoroute. Les concentrations sont plus basses avec une densité de végétation forte de $8 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Dans cette zone, une végétation avec une densité dense est bénéfique seulement dans la zone de vortex proche du bâtiment. Ces zones montrent la **complexité de l'écoulement du vent dans une barrière végétale**.

Pour évaluer l'influence des densités foliaires sur les champs de vents et les concentrations derrière une barrière végétale, Ghasemian (2017) a examiné 5 LAD contrastés : 0,17; 0,42; 1; 1,25 et $3,33 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (figure 14). Dans cette étude, le vent est perpendiculaire à la route (de 2,98 m/s).

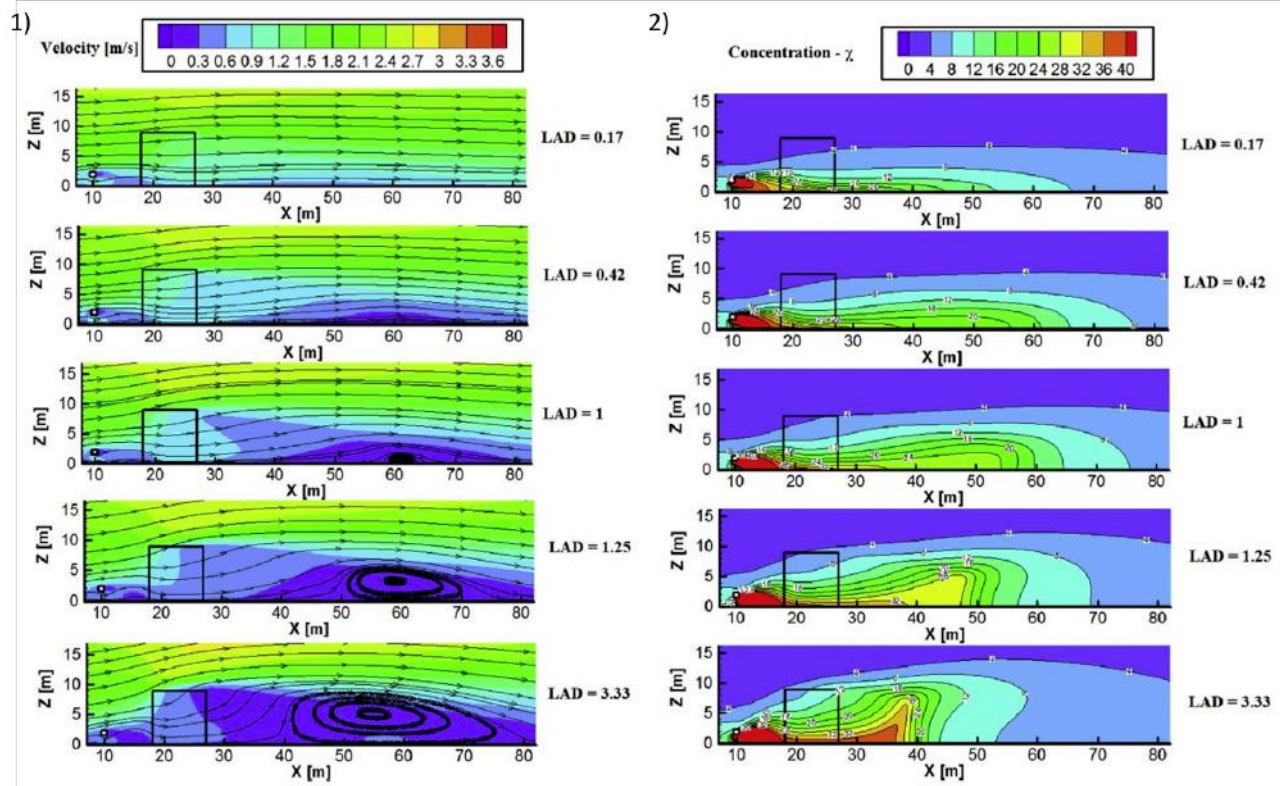


FIGURE 14 – 1) Vitesse et direction du vent pour différentes densités foliaires (LAD), 2) Concentration en polluant pour différentes densités foliaires (LAD) d'après GHASEMIAN (2017)

Avec une densité foliaire de $0,17 \text{ m}^2/\text{m}^3$, il n'y a pas de changement clair dans les profils et la forme de l'écoulement du vent. Le panache de pollution associé est comparable à celui présent sur un terrain plat.

Lorsque la densité de la végétation et la densité foliaire augmente, la vitesse du vent diminue en aval de la végétation. Avec une densité foliaire de $0,42 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$, il y a 2 zones distinctes derrière la barrière végétale : une zone calme immédiatement derrière la barrière végétale caractérisée par une turbulence réduite et plus loin, une petite zone de recirculation avec une turbulence plus élevée. Les concentrations de polluants en aval de la végétation sont comparables pour ces deux LAD.

Avec une densité foliaire de $1,25$ et $3,33 \text{ m}^2/\text{m}^3$, la barrière végétale dévie le vent vers le haut et compresse l'écoulement laminaire au-dessus. L'écoulement est soulevé au dessus de la canopée et la zone de recirculation se crée sous le vent. Lorsque le LAD augmente, le centre de la zone de recirculation se déplace en hauteur et les concentrations

de polluants derrière la canopée augmentent. En effet, la zone de recirculation maintient la pollution à proximité des barrières, entraînant une diminution de la concentration de polluants à l'écart de la barrière pour les canopées denses.

L'écoulement du vent dans une barrière végétale est un phénomène complexe. La densité foliaire de la végétation présente en bordure d'autoroute joue un rôle majeur sur la dispersion des polluants et sur les concentrations modélisées derrière la barrière.

Interprétation des résultats à proximité d'un boulevard à 2 voies

Dans son étude, Ghasemian (2017) explique que **les canopées denses peuvent agir de la même manière qu'une barrière solide** et atténuer la concentration des polluants. Elles seront d'autant plus efficaces si la couverture végétale est présente du sol jusqu'au sommet de la canopée végétale comme le montre les modélisations MISKAM précédentes. En effet, les arbres avec une grande ouverture sous la canopée engendrent des concentrations plus élevées sous le vent en laissant passer le panache tout en réduisant la vitesse du vent. La figure 15 montre des exemples de barrières végétales en bordure de route.



FIGURE 15 – Exemple de barrières végétales efficaces : denses avec une couverture végétale du sol jusqu'à la cime (a) et le contre-exemple avec des barrières végétales inefficaces composées de trous et avec une porosité élevée (b), d'après BALDAUF (2017)

Ghasemian (2017) étudie la dynamique de l'écoulement du vent et des concentrations de polluants suivant trois scénarios : un terrain plat, une barrière solide avec une hauteur de 9 m et une épaisseur de 0,5 m et pour finir, une barrière végétale avec une hauteur et une épaisseur de 9 m. La figure 16 présente les 3 scénarios étudiés de façon schématique.

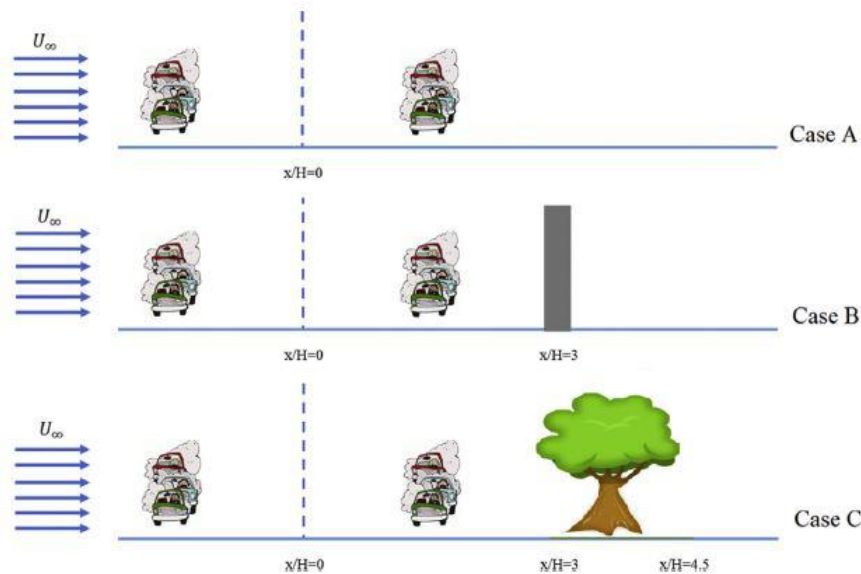


FIGURE 16 – Différents scénarios : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, d'après GHASEMIAN (2017)

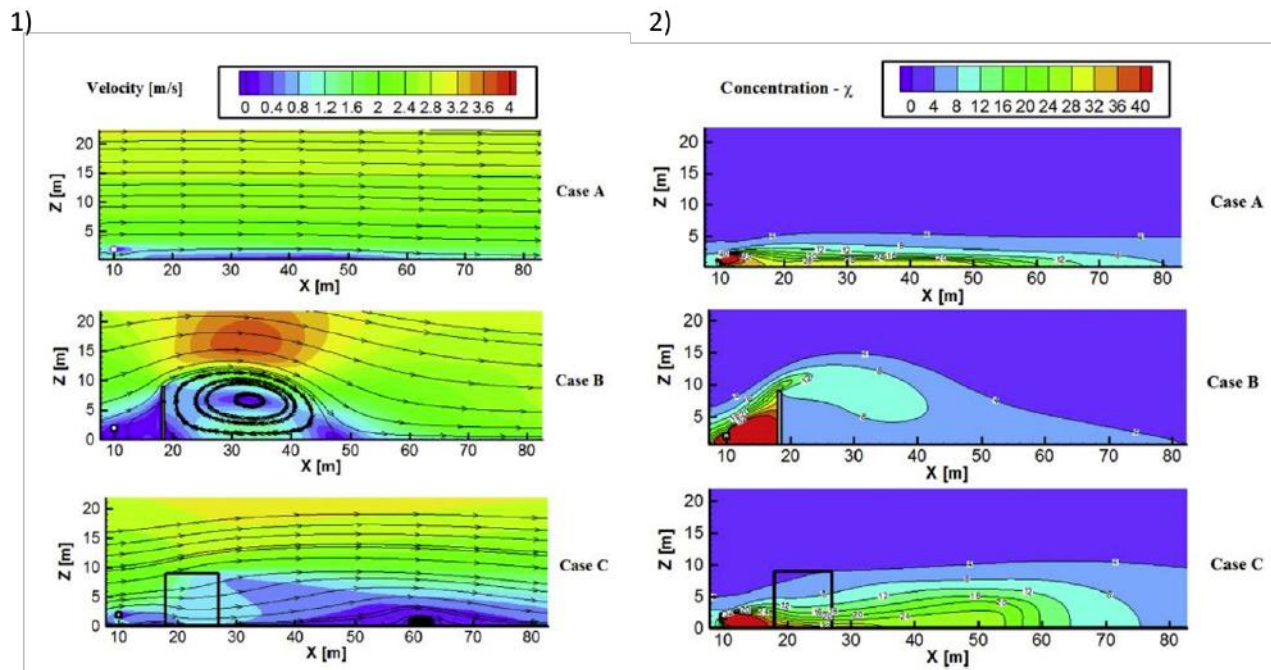


FIGURE 17 – 1) Vitesse et direction du vent : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, 2) Concentration en polluant : (cas A) terrain plat, (cas B) barrière solide, (cas C) barrière végétale, d'après GHASEMIAN (2017)

Dans cette étude, avec un vent perpendiculaire à la route (de 2,98 m/s), le mur change la direction de l'écoulement du vent et dévie les vecteurs du vent verticalement (figure 17 1). Une zone de recirculation se crée derrière la barrière solide. La barrière solide provoque un courant ascendant qui entraîne un soulèvement du panache et une augmentation de la dispersion des polluants (figure 17, 2).

La barrière végétale crée une région de faible vitesse de vent en aval et une zone de recirculation se forme aussi derrière la barrière végétale. Un écoulement moyen passe à travers la végétation, la recirculation est déplacée plus loin en aval et n'est pas assez forte pour induire un mouvement de courant ascendant et élever le panache (figure 17, 2).

Plus précisément, la moyenne des concentrations en polluants dans cette zone montre que la barrière solide améliore la qualité de l'air en bord de route de 58% et la barrière végétale détériore la qualité de l'air de 10% en comparaison avec les résultats du terrain plat.

Une barrière solide améliore efficacement la qualité de l'air derrière la barrière en convertissant la source au niveau du sol en une source en hauteur. La barrière solide induit une composante de vitesse verticale significative et dévie les lignes de courant créant une zone de recirculation en aval. Une barrière végétale réduit la vitesse du vent, ce qui entraîne une dispersion plus lente des polluants à l'intérieur et derrière la canopée. Elle n'induit pas de mouvement ascendant pour soulever le panache du sol : **la barrière végétale augmente donc la concentration des polluants en aval par rapport à une barrière solide.**

Au niveau d'une zone ouverte

Points d'intérêt	Polluants	TMJA	Densités faibles (1 m ² /m ³)	Densités moyennes (3,3 m ² /m ³)	Densités fortes (8 m ² /m ³)
Point 9	NO ₂	faible	21.0	21.0	18.3
		moyen	28.3	28.3	23.6
		fort	38.7	38.7	34.1
	PM10	faible	22.0	22.0	21.3
		moyen	23.4	23.4	22.3
		fort	25.6	25.6	24.4
Point 10	NO ₂	faible	21.0	21.0	18.0
		moyen	28.3	28.3	23.2
		fort	38.7	38.7	32.6
	PM10	faible	22.0	22.0	21.2
		moyen	23.4	23.4	22.1
		fort	25.6	25.6	23.9

TABLE 10 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ et PM₁₀ (µg/m³) à 2m en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation aux points 9 et 10

Dans une configuration avec 2 haies parallèles proches du boulevard à 2 voies, les résultats montrent l'**impact positif que peuvent avoir les barrières végétales sur la qualité de l'air d'un quartier.**

Aux points d'intérêt 9 et 10, placés dans une configuration de distance à la route moyenne de 10 mètres entre le bâti et le centre de la route, les concentrations sont les mêmes pour une densité faible et moyenne et sont plus faibles avec une densité végétale forte (8 m²/m³).

Dans un contexte de rue ouverte, plus la densité foliaire (LAD) des barrières végétales est élevée plus les concentrations derrière celles-ci sont faibles. Les résultats montrent aussi que **plus les TMJA sont élevés plus les gains associés à la présence de végétation dense sont importants.**

3.4.3. Conclusion et recommandations

Végétalisation des zones urbaines

La végétation urbaine participe à réduire la quantité de certains polluants de l'air, par absorption pour les polluants gazeux ou piégeage pour les polluants particulaires, avec une efficacité variable selon l'espèce, le climat, le type de polluant et la proximité des sources de pollution (Janhäll (2015); Pascal, Laaidi et Beaudéau (2018)).

La végétation telle que les haies peuvent en effet filtrer les particules fines lorsqu'elles sont situées à côté d'une route alors que la végétation avec une canopée plus haute comme les arbres peuvent réduire le mélange et la turbulence et **entraîner une augmentation des niveaux de concentration près du sol**. (Janhäll (2015))

A noter aussi que la pollution atmosphérique autour des espaces verts (parcs) est moindre : les sources d'émissions n'y sont généralement pas présentes et les espaces ouverts contribuent à la dispersion des polluants.

Cependant, une augmentation des surfaces d'espaces verts est susceptible d'une part d'augmenter la dissémination de pollens allergisants de certaines essences végétales (ce qui pourrait augmenter la prévalence des maladies allergiques) et d'autre part d'augmenter les concentrations en composés volatiles organiques (COVs) pouvant dégrader la qualité de l'air.

Recommandations techniques

Une **surface foliaire importante** et une proximité de la source de pollution constituent des paramètres favorables pour que la végétation constitue une barrière efficace contre la pollution atmosphérique (Baldauf (2017), Ghasemian (2017)). Cependant, l'aménagement des bâtiments a également une grande importance; comme vu précédemment, l'écoulement de l'air est sensiblement différent pour une rue canyon et une route ouverte, en effet, certaines configurations de rues canyons empêcheraient la dispersion des polluants et exposeraient les populations aux polluants de l'air malgré la présence d'arbres. (Abhijith et al. (2017)).

Les études sur les barrières végétales proches des routes dans des rues ouvertes présentant une amélioration de la qualité de l'air derrière la végétation ont habituellement **une hauteur de 4 à 5m de haut**. L'épaisseur de la barrière végétale nécessaire à une atténuation efficace de la pollution de l'air variera en fonction de la densité de la végétation. En général, les études montrant une diminution des concentrations en polluants avec de la végétation ont une **épaisseur d'environ 5 m**, la plupart approchant 10 mètres ou plus. (Neft et al. (2016))

La végétation choisie pour une barrière **ne doit pas être sujet à des changements significatifs de caractéristiques et d'intégrité pendant le changement de saisons**. Des arbres qui ne sont pas sujet à des changements significatifs saisonniers, tels que des plantes à feuilles persistantes et d'autres conifères similaires doivent être considérés. De plus, une rangée de **plusieurs types de végétation** peut permettre une réduction de la pollution suffisante aussi longtemps que la végétation se développe au fil du temps après la première plantation. Cette approche assurera une densité suffisante à la première plantation, et permettra d'améliorer l'élimination des polluants quand la végétation arrivera à maturité.

Les barrières antibruit combinées à de la végétation permettent également de diminuer les concentration en particules ultra-fines le long et à l'écart d'une route ou autoroute par rapport à une route ouverte ou une barrière antibruit seule.

Les barrières solides peuvent varier en hauteur, les recherches sur la réduction de la pollution de l'air à partir de ces structures définissent des **hauteurs entre 4 et 6 mètres**. Une barrière de végétation doit dépasser d'au moins **1 mètre au-dessus de la barrière solide**. Pour des barrières solides plus petites, la végétation doit prolonger la barrière à une hauteur d'au moins 6 mètres pour exploiter au maximum le potentiel de réduction de la pollution dans le sens du vent.



FIGURE 18 – Exemple de combinaisons efficaces de barrières végétales et de murs : arbres denses derrière un mur (gauche) et végétation broussailleuse devant un mur (droite)), d'après BALDAUF (2017)

Pour aller plus loin, **peu d'études ont porté sur l'efficacité des façades et toitures végétalisées sur la pollution atmosphérique**. Néanmoins, même si elles semblent moins efficaces que les arbres ou les barrières végétales, elles suggèrent que ce type d'infrastructures peut constituer des moyens complémentaires pour atténuer la pollution atmosphérique dans les rues (Abhijith et al. (2017)).

En effet, Baldauf (2017) explique qu'en général il a été démontré que la végétation et les infrastructures vertes ont des avantages pour la **santé globale** dont une augmentation de l'activité physique, une baisse de l'obésité, une amélioration de la santé mentale, une amélioration générale des issues de naissance, une diminution des maladies cardio-vasculaires, et une diminution de la mortalité (James, Banay et al. (2015), James, Hart et al. (2016)). Dadvand et al. (2015) ont constaté une amélioration du développement cognitif des écoliers associé à une augmentation de la verdure environnante qui pourrait être, en partie, due à cette association à la réduction de la pollution atmosphérique à proximité.

En plus de la qualité de l'air et des bénéfices sur la santé, la végétation en bordure de route peut améliorer l'esthétique, augmenter la valeur des biens immobiliers, réduire la chaleur, contrôler le ruissellement des eaux de surfaces et réduire la pollution sonore (avec des bosquets denses, épais et hauts). A contrario, la végétation peut également affecter les lignes de visibilité du conducteur, contribuer à la formation de débris sur routes, présenter des risques d'incendie, et constituer des voies d'accès pour les espèces nuisibles et invasives.

4. Conclusion

Sur la base des expérimentations des outils de modélisation 3D menées en région, Atmo Hauts-de-France a réalisé une étude sous la forme d'un guide pratique et méthodologique à l'usage des techniciens des collectivités et des urbanistes.

Les résultats des modélisations 3D avec le logiciel MISKAM, les retours d'expériences et l'étude bibliographique ont permis de mettre en évidence **l'impact combiné de la hauteur des bâtiments et de la distance du bâti à la route sur la qualité de l'air d'un quartier.**

Plus précisément, afin de prendre en compte **la qualité de l'air dans les projets d'aménagements urbains**, les techniciens des collectivités et les urbanistes doivent suivre les recommandations suivantes :

- Procéder à une **étude des champs de vent** de la zone d'aménagement afin d'évaluer au mieux les potentiels effets canyons qui rendent complexe le phénomène de dispersion des polluants.
- Dans le quartier, analyser **la position des rues par rapport aux vents dominants** pour localiser **les rues canyons potentielles** (rues perpendiculaires aux vents dominants).
- Calculer les rapports d'aspects des rues (h/w) et **éviter les rapport d'aspects supérieurs à 0,65**.
- Évaluer **le trafic sur les voiries (TMJA)** de la zone d'aménagement.
- Proche d'une autoroute, privilégier **une distance supérieure à 30 mètres** entre l'autoroute et le bâtiment le plus proche. Augmenter cette distance en fonction des TMJA.
- Dans les rues du quartier, retenir **la plus grande largeur** de rue possible (14 mètres dans le quartier fictif).
- Proche d'une autoroute, privilégier un **bâtiment à hauteur élevée** (19 mètres retenu dans le quartier fictif) mais veiller néanmoins à ne pas exposer la population du bâtiment.
- Privilégier des rues avec des **hauteurs non homogènes**.
- Au niveau de la végétation, privilégier **des haies** plutôt que des arbres.
- Choisir des espèces avec **une densité de surface foliaire (LAD) élevée**.
- Choisir des **végétaux non allergisants** et à **feuilles persistantes**.
- Proche de l'autoroute, privilégier **une haie de végétation associée à une barrière antibruit**.

L'étude de modélisation 3D confirme que **le logiciel MISKAM est un bon outil d'aide à la décision** pour les urbanistes car il permet d'obtenir une estimation précise et objective des concentrations et de la dispersion des polluants dans chaque rue du quartier.

Ce logiciel permet aussi de **scénariser des aménagements urbains** et d'aider à concevoir des **solutions** permettant de réduire l'impact sur la qualité de l'air en changeant la position du bâti par exemple.

Concernant l'impact de la végétation, l'étude bibliographique et les résultats des modélisations 3D montrent **la complexité de l'écoulement du vent au travers de la végétation**.

L'étude précise les caractéristiques requises pour qu'une barrière végétale **améliore la qualité de l'air** mais montre aussi que, dans certaines conditions, la végétation peut avoir **un impact négatif** sur la qualité de l'air.

Les résultats des modélisations 3D avec le logiciel MISKAM sont mitigées et ouvrent la perspective de réaliser d'autres études utilisant des **logiciels spécialisés** permettant de prendre en compte plus finement la végétation dans la modélisation.

Plus globalement, il serait aussi intéressant d'avoir une **approche intégrée air et biodiversité** afin de proposer des préconisations concrètes en matière de barrières végétales, en lien avec les acteurs de la biodiversité et les politiques locales.

1. Annexes

1.1. Annexe 1 : Détails entre les interactions des documents d'urbanisme et les démarches pour la qualité de l'air

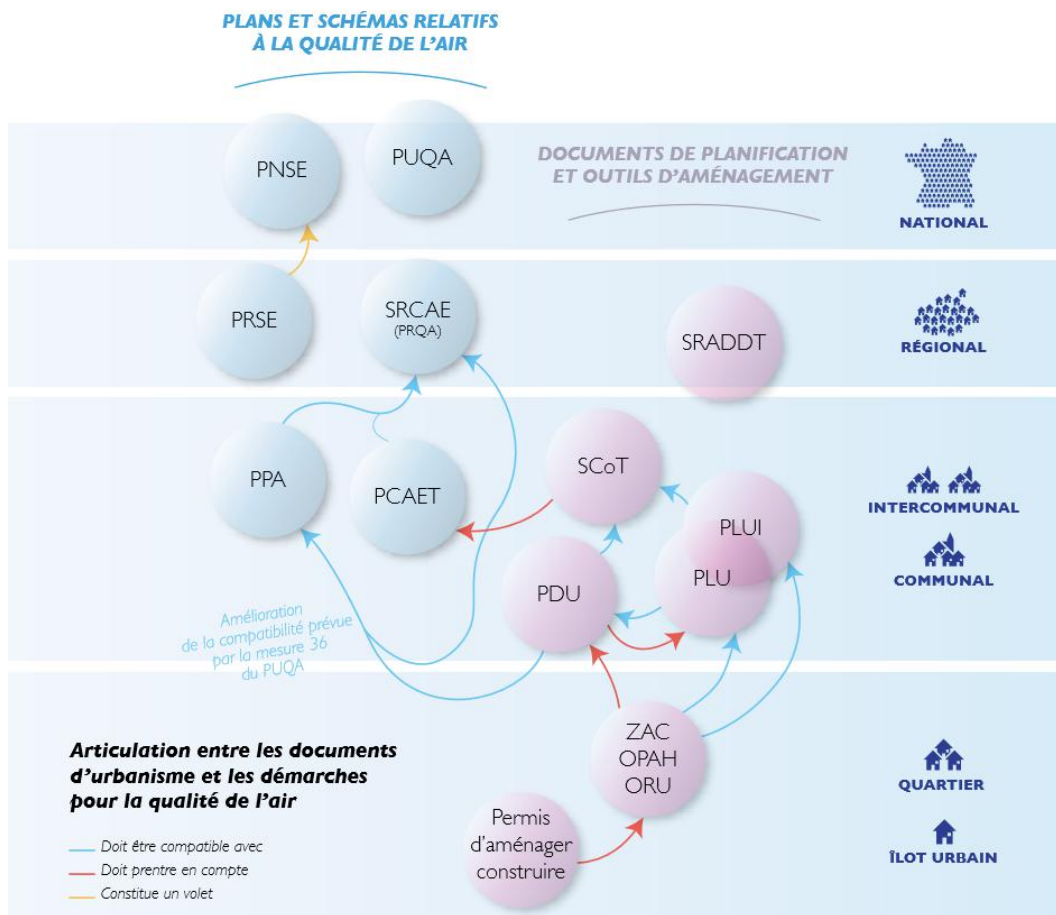


FIGURE 19 – Interactions juridiques entre démarches Qualité de l'Air, outils de planification et d'aménagement et démarches d'urbanisme durable. Source : ADEME 2020

1.2. Annexe 2 : Données nécessaires à la modélisation 3D du domaine-test

Le modèle 3D MISKAM utilisé requiert des **données d'entrée** ayant pour but de décrire les bâtiments et les sources de pollution présentes à l'intérieur du domaine d'étude ainsi que les conditions météorologiques et de pollution de fond de l'année à évaluer.

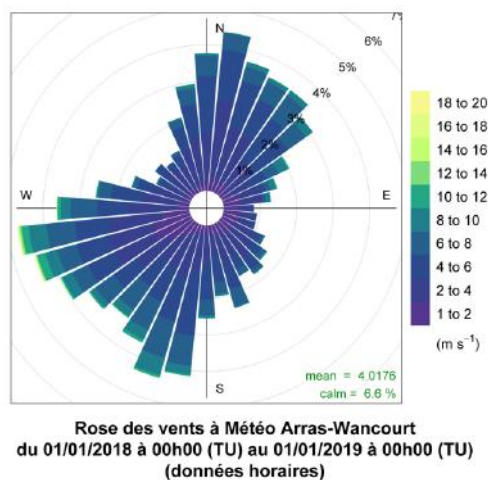
Les bâtiments sont caractérisés par leur empreinte au niveau du sol ainsi que leur hauteur.

Les sources de pollution présentes dans le domaine d'étude sont uniquement les **voiries**, traitées sous forme de sources linéaires avec une **largeur définie** et un **débit de polluant** associé.

Les données de trafic utilisées pour estimer les émissions d'oxydes d'azote et de particules proviennent de comptages de véhicules circulant sur ces voiries.

Ces **comptages** permettent d'estimer le Trafic Moyen Journalier Annuel **TMJA** d'un tronçon routier correspond à **la moyenne sur une année du nombre de véhicules circulant sur ce tronçon, tous sens confondus**. A l'aide du logiciel Circul'Air et en utilisant des profils temporels de trafic, ces TMJA nous permettent de calculer les émissions de polluants de chaque voirie pour chaque type de véhicule.

Dans cette étude, le **taux de poids lourds, de bus et d'autobus** sera fixé dans chacune des simulations aux **valeurs moyennes en situation de trafic urbain**, soit respectivement : 0,05%, 0,005% et 0,004%. La méthode d'estimation de ces émissions routières est conforme à la méthodologie européenne COPERT V.



La **météorologie** utilisée est constituée de **séries horaires de mesures sur une année** (vitesse et direction du vent, hauteur de couche limite, longueur de Monin-Obukhov pour caractériser la stabilité atmosphérique). Dans cette étude, les données proviennent de la station météo France de référence de Arras-Wancourt pour l'année 2019.

Aussi, afin de rendre les résultats des simulations comparables, **ces données météo seront les mêmes dans toutes les simulations**.

La pollution de fond est aussi à prendre en compte dans les simulations pour estimer la quantité de polluants qui entrent dans le domaine lorsque celui se trouve dans une zone urbaine. La pollution de fond introduite dans les simulations de cette étude concerne les concentrations de **dioxyde d'azote (NO₂)** et de **particules PM₁₀ en moyennes annuelles**, par direction de vent, des données horaires des mesures de la station Atmo Hauts-de-France de référence de Saint-Laurent-Blangy (AR2) pour l'année 2019. Comme pour les données météorologiques **ces données de pollution de fond seront les mêmes dans toutes les simulations**.

1.3. Annexe 3 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D dans les rues canyon aux points d'intérêt 4,5 et 7



Les points d'intérêt 4, 5 et 7, en jaune dans la figure ci-contre, présentent la particularité de se trouver dans une rue de ce type : des bâtiments sont situés des deux côtés de la rue, seules les voiries sont différentes, 2x2 voies, 1 voie et 2 voies, respectivement. Comme expliqué précédemment, la variation de la hauteur des bâtiments change le rapport d'aspect de la rue canyon. (voir paragraphe 2.3.1)

Les figures 20 et 21 montrent que l'impact de la hauteur du bâti sur les concentrations est plus important lorsque le TMJA est élevé.

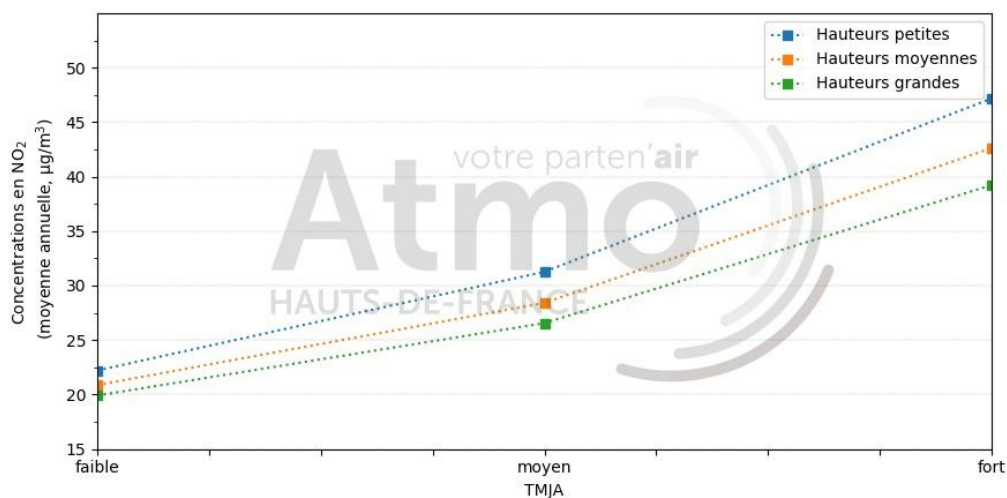


FIGURE 20 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2m en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 4.

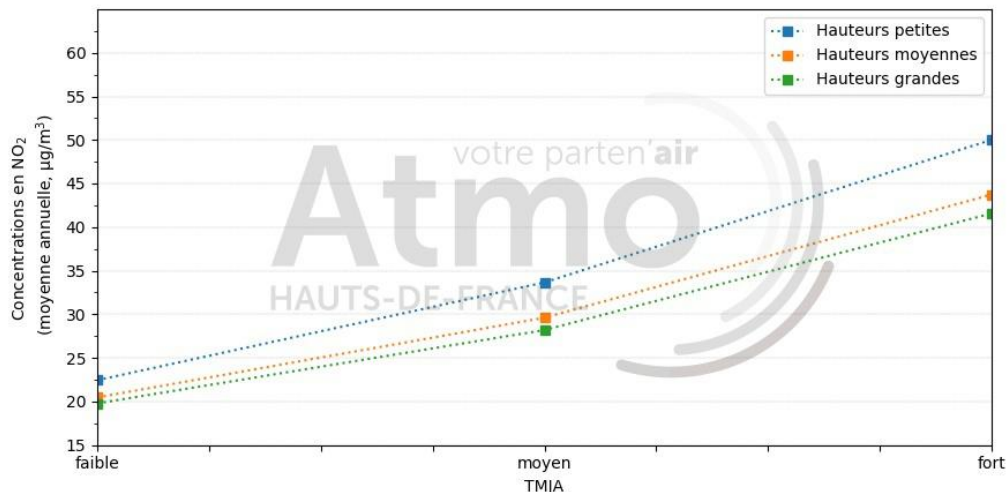


FIGURE 21 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 7

En effet, lorsque le TMJA est faible, la différence de concentrations en dioxyde d'azote entre les 3 hauteurs est faible, environ 1,5 µg/m³ de différence. Lorsque le TMJA est moyen, la différence augmente avec un écart d'environ 5 µg/m³ entre les hauteurs grandes et petites. Pour finir, lorsque le TMJA est fort, la différence entre les concentrations avec des bâtiments de 19 mètres (hauteurs grandes) et de 4 mètres (hauteurs petites) continue d'augmenter avec un écart d'environ 8 µg/m³.

Les particules PM₁₀ suivent la même tendance mais les écarts de concentrations entre les scénarios sont moins importants que pour le dioxyde d'azote comme le montre la figure suivante :

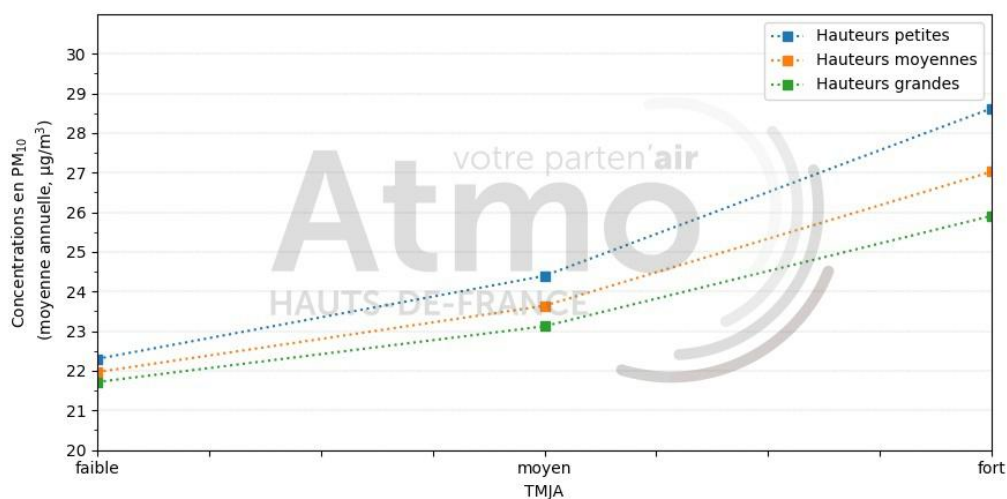


FIGURE 22 – Concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 4

Pour un trafic faible, la variation de concentrations entre les hauteurs grandes et petites est minime avec moins d' $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A TMJA moyen, cette différence augmente à $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Enfin, à TMJA fort, l'impact de la hauteur est plus important avec un écart de presque $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les résultats au point d'intérêt 5 sont différents et montrent la complexité et la variété des écoulements du vent à l'échelle d'un quartier.

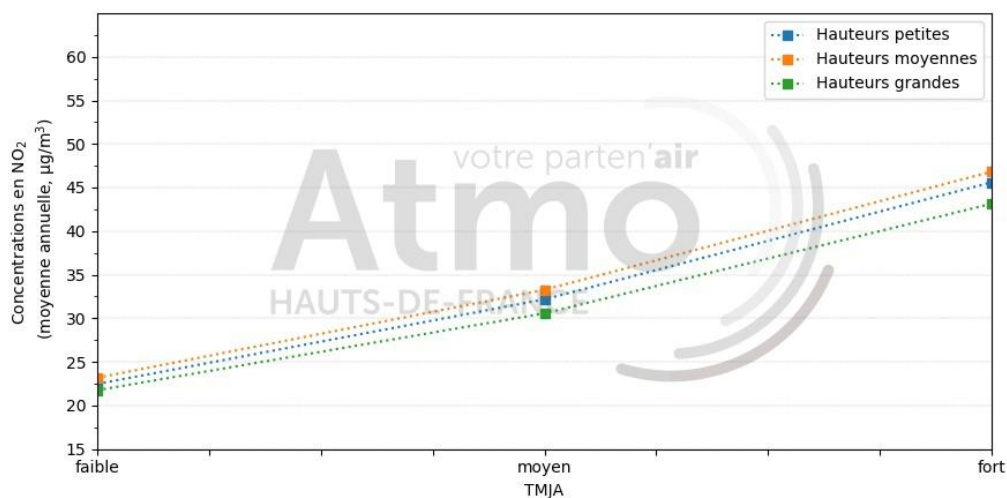


FIGURE 23 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 5

En effet, comme le montre la figure 23, au point d'intérêt 5, les concentrations en NO_2 sont proches mais les concentrations les plus élevées sont obtenus avec des bâtiments à hauteurs moyennes dans cette rue.

1.4. Annexe 4 : Impact de la hauteur des bâtiments - Interprétation détaillé des résultats dans les rues canyons

Dans une étude de modélisation 3D, Chan (2003) utilise un modèle constitué de 4 immeubles positionnés les uns derrière les autres et perpendiculaires à la direction du vent. Une source d'émission linéaire se trouve entre les immeubles 2 et 3 :

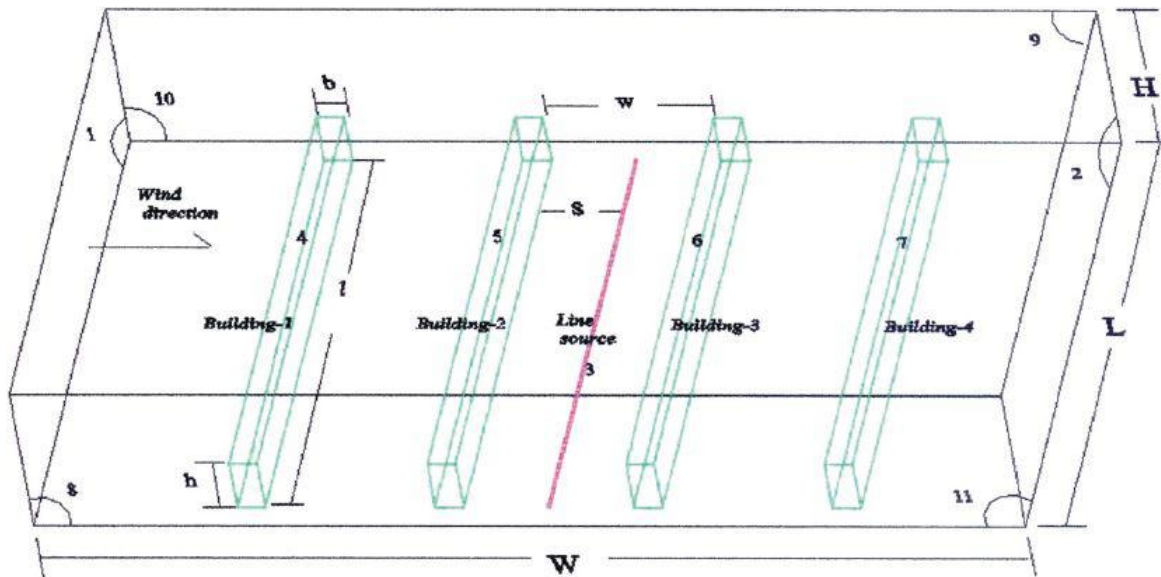


FIGURE 24 – Modèle de simulation de l'étude de CHAN (2003)

Grâce aux modélisations effectuées dans cette étude, Chan (2003) a représenté les concentrations entre les immeubles 2 et 3 en fonction du rapport d'aspect h/w et donc des différents régimes d'écoulement présentés ci-dessous.

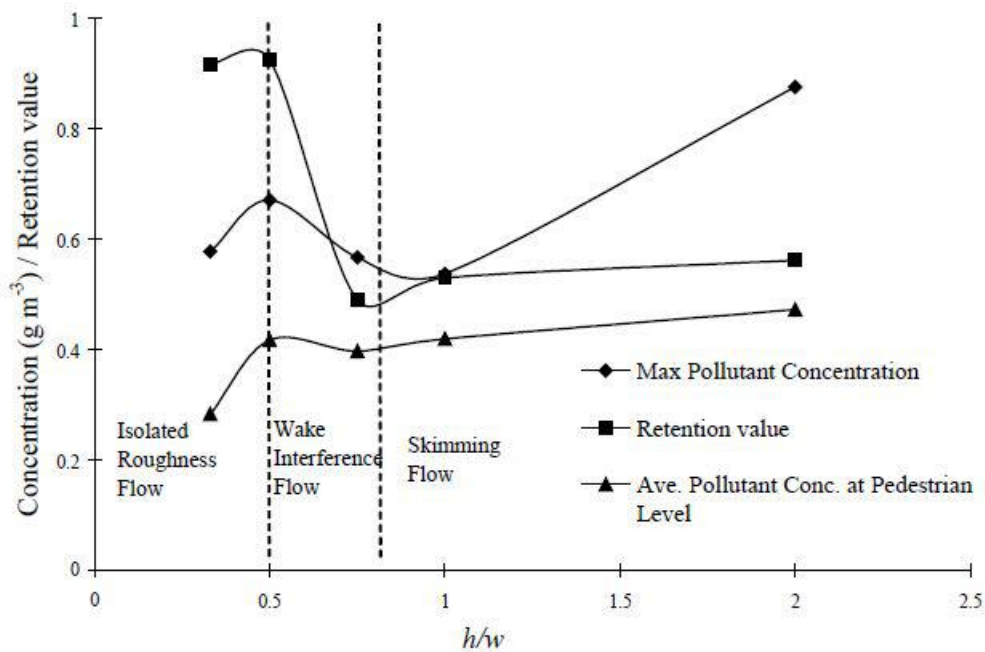


FIGURE 25 – Différents niveaux de concentrations en fonction des régimes d'écoulement et du rapport d'aspect. CHAN (2003)

La courbe de la moyenne des concentrations à hauteur des piétons en fonction du rapport d'aspect (courbe où les points sont des triangles) sur la figure 25 montre que, dans cette étude, les concentrations minimales en polluant sont obtenues pour un rapport d'aspect h/w d'environ 0,3 dans le cadre d'un écoulement de rugosité isolé. ("Isolated Roughness Flow")

Les concentrations en polluant augmentent jusqu'à un rapport d'aspect de 0,5, puis diminuent dans la phase de régime "Wake interference flow" jusqu'à h/w environ égal à 0,75. Les concentrations en polluant augmentent à nouveau dans un régime d'écoulement "skimming flow" pour atteindre leur valeur maximale pour un rapport d'aspect égal à 2.

Dans l'étude 3D MISKAM, la largeur des rues ne varie pas dans cette part. C'est seulement la hauteur des bâtiments qui varient selon 3 valeurs (4 mètres, 13 mètres et 19 mètres). A largeur w constante, le rapport d'aspect h/w augmente si la hauteur h augmente.

Aux points d'intérêt 4, 5 et 7 situés dans des rues canyon de 30 mètres de largeur et de 24 mètres de largeur, le rapport d'aspect pour des hauteurs de bâtiments moyennes et grandes classent les avenues canyon de l'étude dans un régime d'écoulement "wake interference flow" et correspondent à la zone de décroissance des concentrations en polluant.

Cela peut expliquer pourquoi les concentrations en polluant diminuent aux points d'intérêts 4 et 7 lorsque la hauteur des bâtiments augmente. L'étude de ce quartier virtuel présente un cas complexe d'écoulement "wake interference flow" pour des hauteurs moyennes et grandes.

A ces hauteurs, l'écoulement est turbulent au pied des bâtiments de ces points d'intérêts et un tourbillon se forme. L'augmentation de la hauteur est donc intéressante dans ces deux avenues mais cet effet bénéfique ne peut pas être généralisé pour toutes les avenues comme nous le montre les résultats du point 5.

Avec des bâtiments à hauteurs petites dans ce quartier virtuel, la formation de tourbillons au pied des bâtiments n'a pas lieu et explique pourquoi les concentrations en polluants sont plus élevées aux points d'intérêts 4 et 7.

	Avenue au point 4			Avenue au point 7 et Rue au point 5		
Distance bâti/route	moyenne (10 m)			moyenne (10 m)		
Largeur de l'avenue (W)	30 m			24 m		
Hauteur des bâtiments (H)	petite (4 m)	moyenne (13 m)	grande (19 m)	petite (4 m)	moyenne (13 m)	grande (19 m)
Rapport d'aspect (H/W)	0,13	0,43	0,63	0,17	0,54	0,79
Régime d'écoulement	Isolated roughness flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Wake interference flow

TABLE 11 – Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4 et 7

1.5. Annexe 5 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'auto-route aux points d'intérêt 1 et 2

Au niveau des points d'intérêts 1 et 2 situés le long de l'autoroute, les concentrations en dioxyde d'azote suivent la même tendance que précédemment avec des concentrations plus faibles lorsque la hauteur des bâtiments est élevée (19 mètres) quel que soit le trafic.

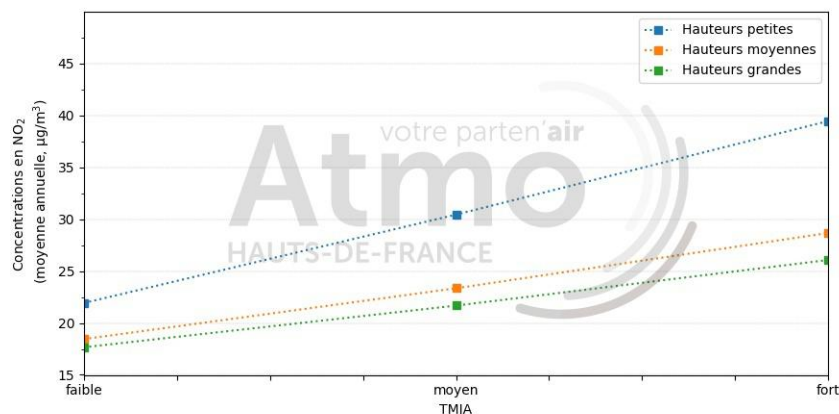


FIGURE 26 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 1

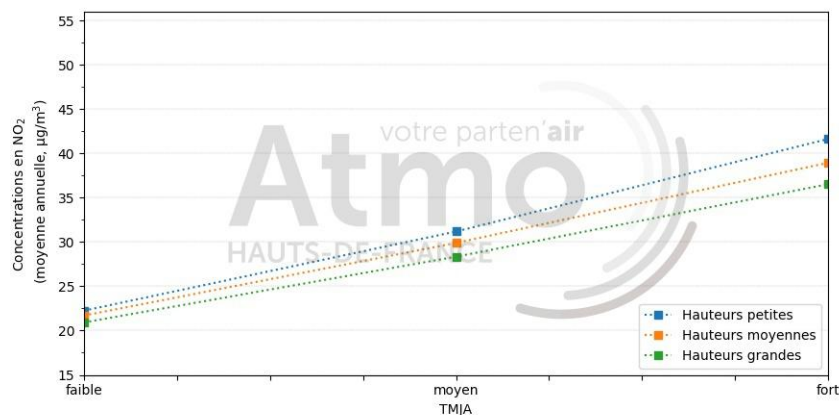


FIGURE 27 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 2

Au point 1 (Figure 26), situé au pied du bâtiment qui longe l'autoroute, pour des TMJA forts, les concentrations en dioxyde d'azote sont beaucoup plus élevées lorsque les hauteurs des bâtiments sont petites. Environ 13 µg/m³ de plus, que lorsque les bâtiments sont hauts.

Cet écart est beaucoup moins important au niveau du point 2 dans une zone éloignée des bâtiments, au pied de la haie qui longe l'autoroute. (Figure 27)

1.6. Annexe 6 : Impact de la hauteur des bâtiments - Interprétation détaillé des résultats au bord de l'autoroute

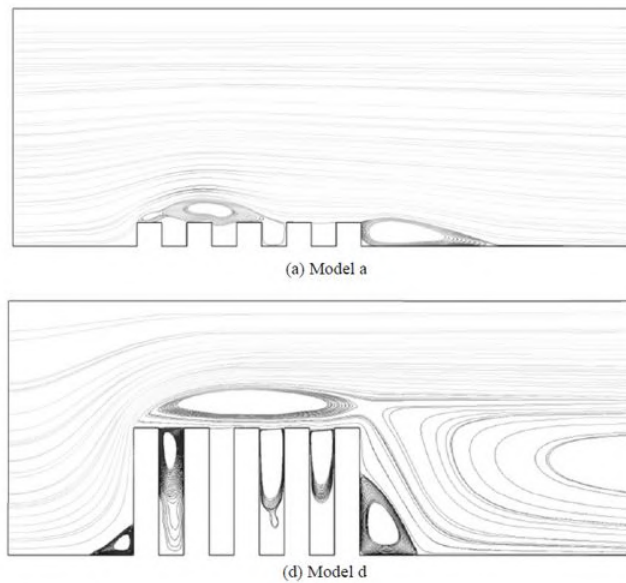


FIGURE 28 – Écoulement du vent dans une rue avec des bâtiments à hauteurs faibles (a) et à hauteurs élevées (d) (MEI et al. (2016))

La figure 28 montre un vortex (zone de recirculation) allongé derrière le dernier immeuble quand l'air s'écoule autour des immeubles à petites hauteurs. Quand les hauteurs sont élevées un vortex se forme devant le premier immeuble touché par le vent et derrière le dernier immeuble. Par ailleurs, un vortex se forme au-dessus des 3 immeubles quand la hauteur est petite et au-dessus des 5 immeubles quand la hauteur est grande. Ce vortex fait bien obstacle à l'entrée des particules dans le canyon profond comme le montre la figure 29.

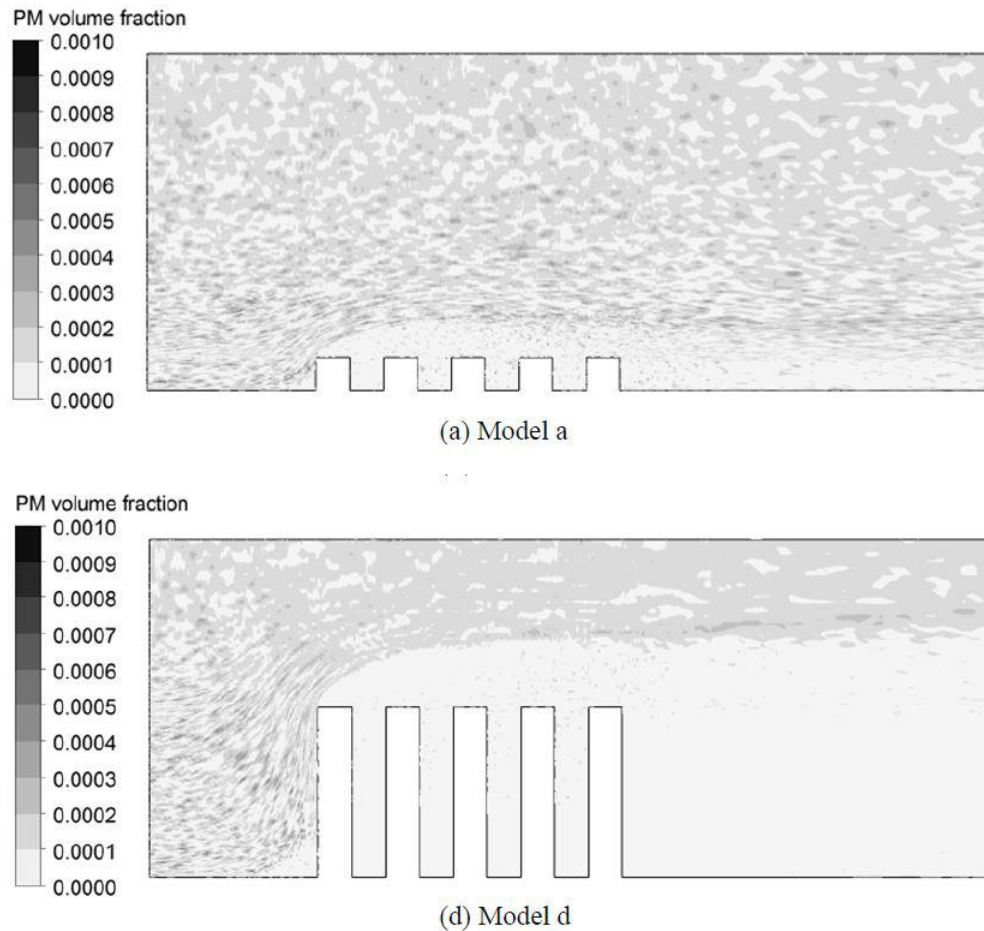


FIGURE 29 – Fraction volumique de particules PM dans une rue avec des bâtiments à hauteurs faibles (a) et à hauteurs élevées (d) (MEI et al. (2016))

Le modèle d) de la figure ci-dessus présente l'efficacité de transport des particules la plus faible et la concentration la plus basse. Plus précisément, l'efficacité de transport traduit la capacité des particules à sortir de la rue canyon. C'est-à-dire que peu de particules rentrent dans ce canyon profond mais une fois qu'elles y sont rentrées, elles restent bloquées sous l'effet canyon. Au contraire, le modèle avec les immeubles à hauteurs faibles expose l'efficacité de transport la plus haute, mais la concentration dans les rues canyon de ce modèle est élevée.

Cette notion d'efficacité de transport est observable sur les cartes de concentrations présentées précédemment dans la figure 6 pour le dioxyde d'azote et la figure 7 pour les particules PM_{10} , au niveau de l'autoroute. En effet, lorsque les hauteurs sont petites les particules sont dispersées efficacement par l'écoulement du vent. Au contraire, lorsque les hauteurs sont grandes les particules sont perturbées par le vortex qui se crée autour du bâtiment. Ce tourbillon améliore la qualité de l'air au pied du bâtiment mais repousse et fait stagner la pollution au centre de l'autoroute. L'efficacité de transport est donc moins importante lorsque la hauteur du bâtiment est grande.

La figure 26 confirme l'explication apportée par Mei et al. (2016) et permet de faire l'hypothèse qu'au niveau du point 1, au pied du bâtiment, un vortex est créé devant le bâtiment lorsque les hauteurs sont moyennes et grandes. Par contre lorsque les hauteurs sont petites, le tourbillon ne se forme pas ce qui explique les concentrations beaucoup plus élevées au pied du bâtiment lorsque la hauteur est petite.

1.7. Annexe 7 : Impact de la hauteur des bâtiments - Détail des résultats des modélisations 3D dans une zone ouverte au point d'intérêt 3

Le point d'intérêt 3 se trouve dans une zone ouverte directement impactée par les vents dominants d'Ouest/Sud-Ouest. Les écarts des moyennes annuelles des concentrations en NO_2 et PM_{10} sont proches comme le montrent les figures 30 et 31.

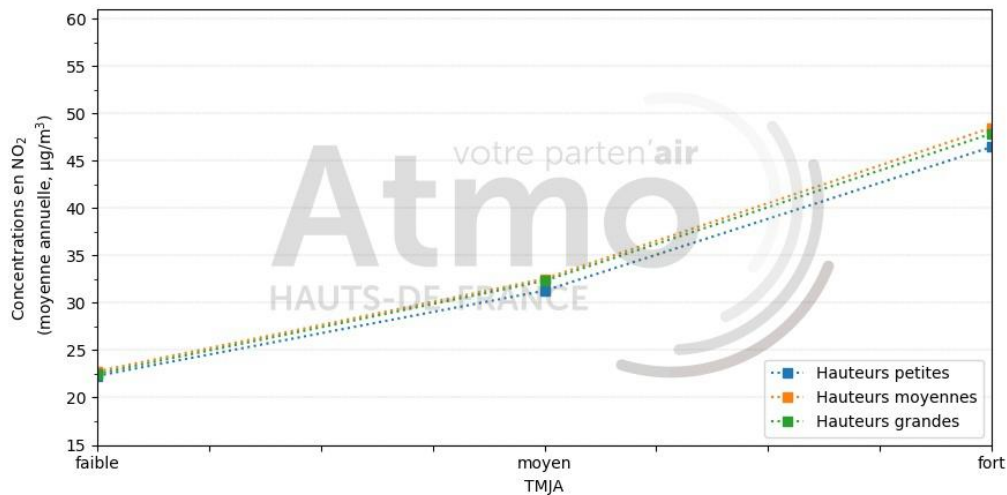


FIGURE 30 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3

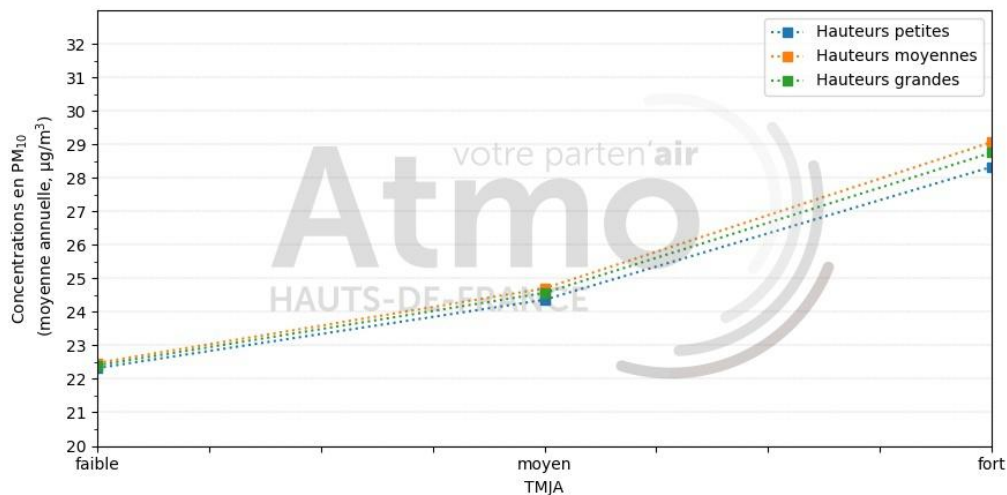


FIGURE 31 – Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 3

Au niveau de cette zone ouverte, la hauteur des bâtiments a un impact minime sur les concentrations en polluant

(dioxyde d'azote NO_2 et particule PM_{10}). Ceci s'explique par le fait que ces points se trouvent dans une zone qui n'est pas influencée par les bâtiments et aucun obstacle ne vient perturber la dispersion des polluants.

La figure 32 montre des résultats dans une autre type de zone ouverte : une cour ouverte au niveau du point d'intérêt 6. A ce point d'intérêt, les concentrations en NO_2 sont proches car le volume de la cour permet de disperser les polluants.

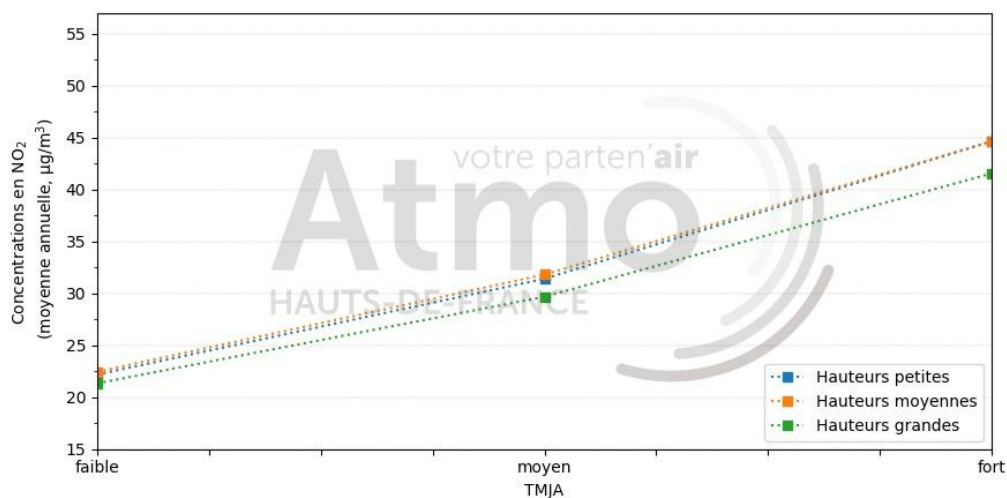


FIGURE 32 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 en fonction des TMJA pour différentes hauteurs de bâtiments au point 6

1.8. Annexe 8 : Non-uniformité des hauteurs de bâti pour une meilleure qualité de l'air

La publication de Chan (2001) conforte les résultats de nos modélisations 3D sur le quartier-test. En effet, Chan (2001) a travaillé sur un modèle numérique 3D de rue canyon afin d'identifier les géométries de rue qui entraînent une mauvaise dispersion des polluants et ainsi éviter ces configurations dans la construction de nouveaux quartiers.

Le schéma 33 ci-dessous présente le modèle de canyon utilisé pour l'étude.

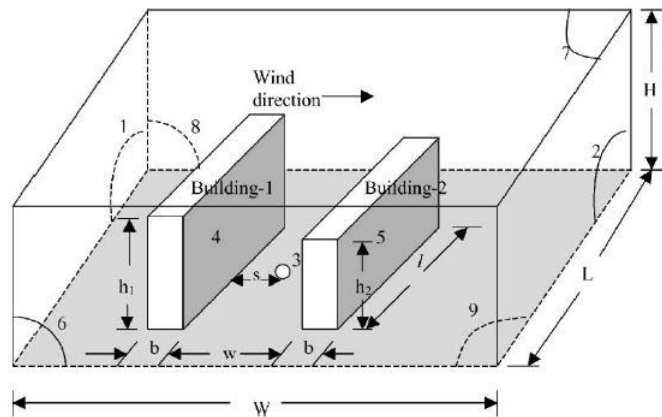


Fig. 1. Schematic diagram of canyon model with the system surfaces.

FIGURE 33 – Schéma d'une rue canyon d'après CHAN (2001)

Cette étude montre que l'uniformité dans la hauteur des bâtiments, la largeur et la longueur de la rue canyon doit être évitée. La **non-uniformité**, c'est-à-dire une hauteur différente des deux côtés de la rue, **assure une meilleure ventilation dans les rues canyons**. Le ratio h_2/h_1 critique présentant les concentrations maximales se situe entre 1 et 1,25 (figure 33).

Ce ratio est aussi représenté en abscisse du graphique de la figure 34. En effet, les immeubles élevés ne favorisent pas le blocage des polluants tant que les rapports h/w (hauteur/largeur de la rue) et h_2/h_1 restent dans des gammes de valeurs qui favorisent la transition du flux de stagnation et de la zone de blocage sous le vent.

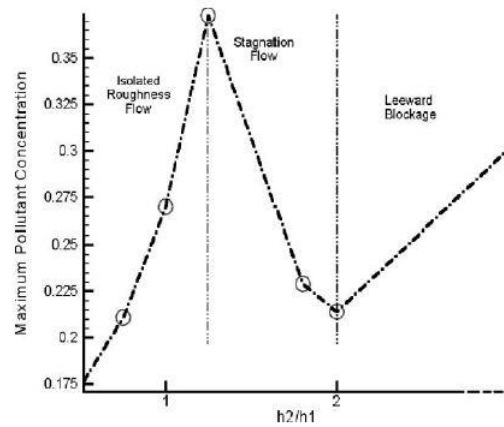


FIGURE 34 – Concentration en polluant pour des rapports h_2/h_1 différents

Mei et al. (2016) tire les mêmes conclusions (figure 35) en montrant que la concentration de particules dans les rues canyons du modèle des immeubles à hauteurs décroissantes sont plus faibles (figure 35, b) que ceux observés dans le modèle avec hauteurs croissantes (figure 35, c).

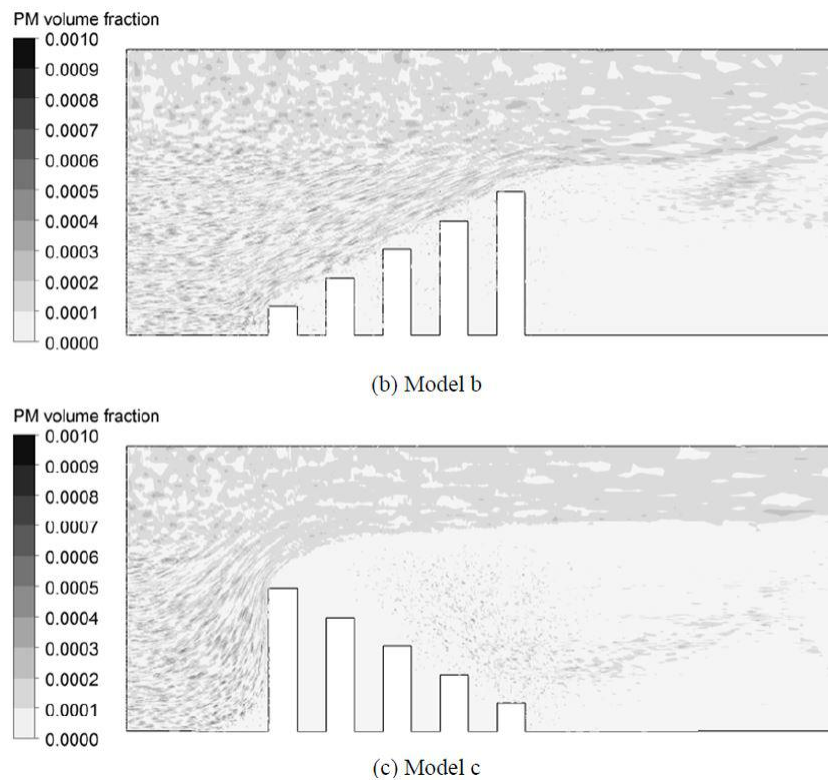


FIGURE 35 – Fraction volumique de particules PM dans une rue avec des bâtiments à hauteurs croissantes (b) et à hauteurs décroissantes (c)

1.9. Annexe 9 : Zone à enjeux dans une rue canyon

Les cartes de concentrations des figures 36 et 37 montrent un effet canyon. Sur la figure 36 l'effet canyon a lieu au niveau du boulevard à 4 voies. Le vent venant de l'Ouest, les concentrations en oxyde d'azote sont accumulées contre les bâtiments situés à gauche du boulevard (en amont du vent, sous le vent) sous l'effet du vortex qui tourbillonne dans la rue. Les concentrations en polluant sur le trottoir des points d'intérêts 3 et 4 (situé en aval du vent) sont donc plus faibles que celles du trottoir situé en amont du vent.

Les particules PM_{10} sous l'action d'un vent du Sud forme un effet canyon derrière le bâtiment qui longe l'autoroute et dans le boulevard à 2 voies du point d'intérêt 7.

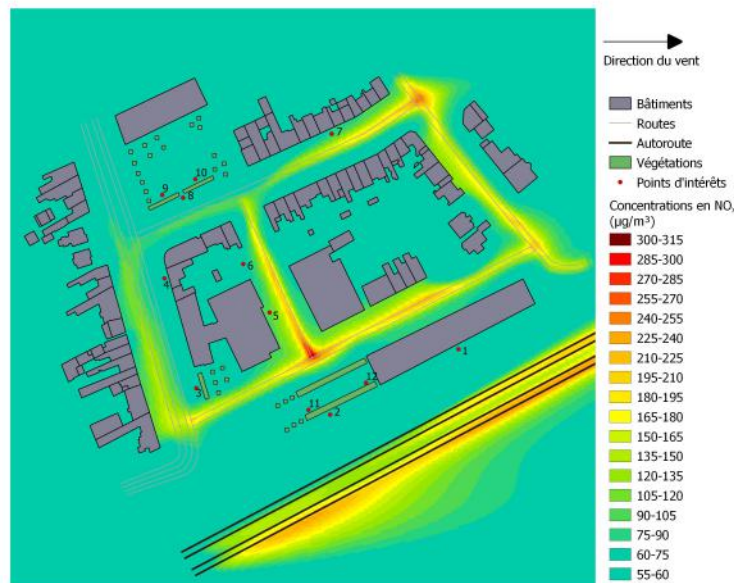


FIGURE 36 – Concentrations en oxydes d'azote NO_x entre 1 et 2 mètres sous un vent d'Ouest avec des hauteurs grandes et des TMJA forts

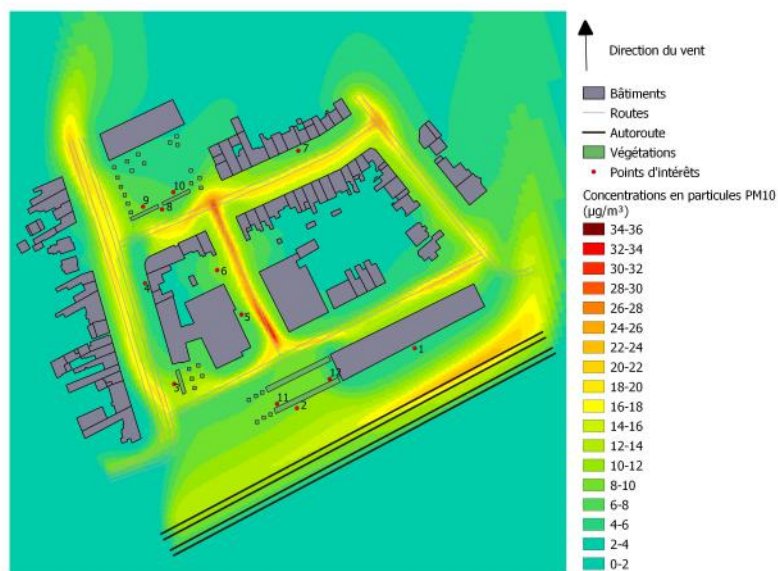
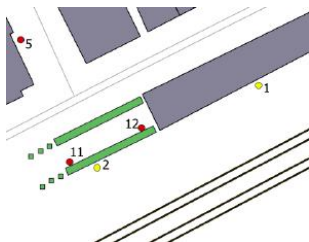


FIGURE 37 – Concentrations en particules PM_{10} entre 1 et 2 mètres sous un vent du Sud avec des hauteurs grandes et des TMJA forts

Ces deux cartes de concentrations montrent que **la vitesse et la direction du vent sont des paramètres clés** dans l'étude de la qualité de l'air des rues des quartiers. Ces paramètres ont un impact déterminant sur les concentrations en polluant du quartier. Une rue parallèle ou perpendiculaire au vent dominant aura des niveaux de concentrations très différents.

1.10. Annexe 10 : Impact de la distance du bâti à la route - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'autoroute aux points d'intérêt 1 et 2



Les points d'intérêts 1 et 2 sont situés le long de l'autoroute (en jaune sur l'image ci-contre).

Au niveau de ces deux points, les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote NO_2 et particules PM_{10} augmentent en fonction des TMJA comme le montrent les figures 38 et 39.

Les concentrations en polluant sont plus élevées lorsque les bâtiments sont proches des routes.

En effet, au point d'intérêt 1 (figure 38), lorsque le trafic est faible, une grande distance permet une baisse de concentrations en NO_2 d' $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à une distance moyenne et de $7,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à une distance faible. A TMJA fort, une grande distance permet une baisse de concentrations en NO_2 de $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à une distance moyenne et de $20,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à une distance faible.

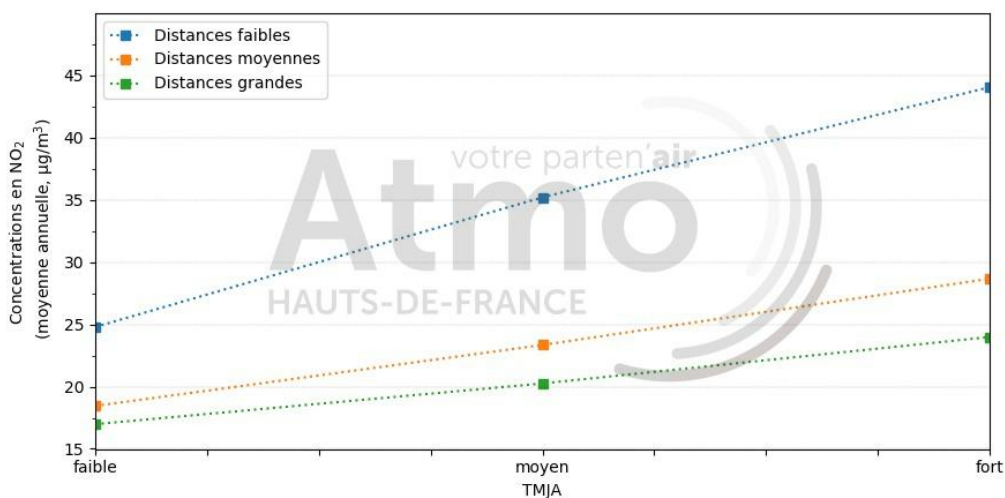


FIGURE 38 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 1.

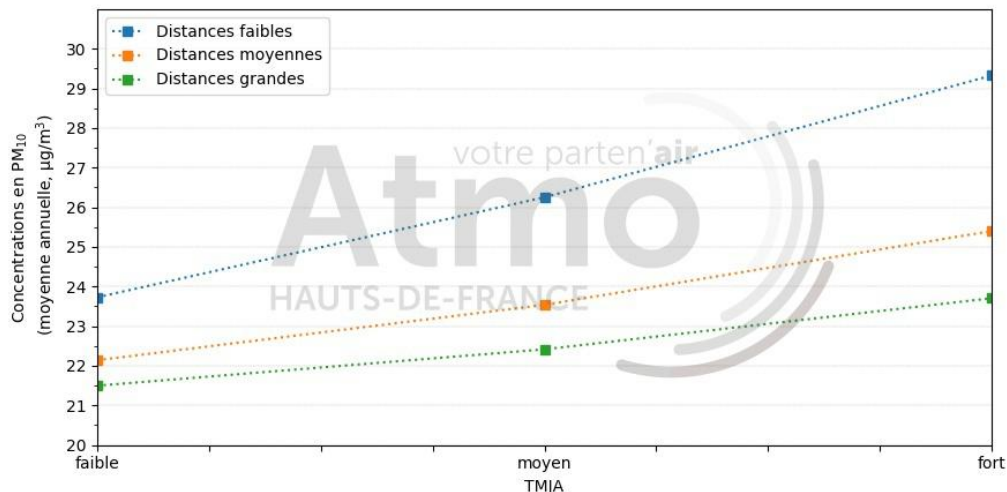


FIGURE 39 – Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 2.

Les particules fines PM_{10} et le dioxyde d'azote ont la même dynamique le long de l'autoroute avec une différence entre le minimum et le maximum des concentrations plus importantes pour le dioxyde d'azote car c'est un polluant caractéristique de la pollution routière.

Au niveau du point d'intérêt 2 (Figure 39), à TMJA faible, une distance grande permet une baisse de concentrations en PM_{10} de $0,6 \mu g/m^3$ par rapport à une distance moyenne et de $2,2 \mu g/m^3$ par rapport à une distance faible. A TMJA fort, une distance grande permet une baisse de concentrations en PM_{10} de $1,7 \mu g/m^3$ par rapport à une distance moyenne et de $5,6 \mu g/m^3$ par rapport à une distance faible.

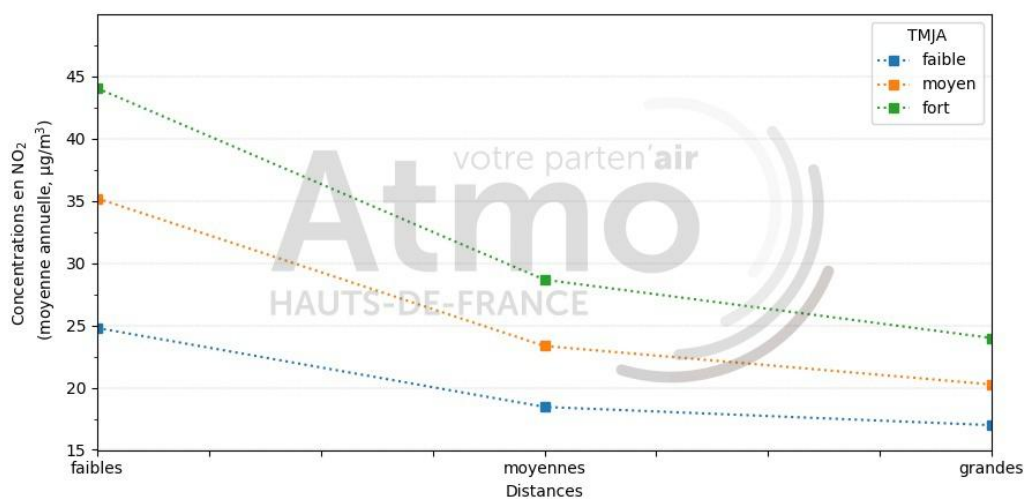


FIGURE 40 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des distances bâti/route pour des TMJA différents au point 1.

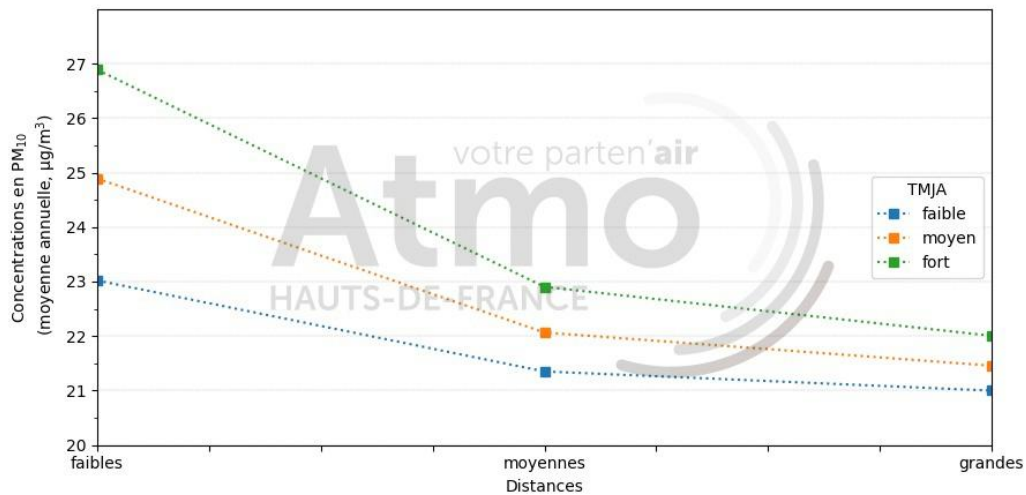


FIGURE 41 – Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 2.

Le graphe de la figure 40 montre également l'impact du trafic moyen journalier annuel : au point 1, à distances grandes, l'écart de concentrations en dioxyde d'azote s'élève à $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Plus les TMJA sont élevés, plus la distance entre le bâtiment et la route doit être grande pour tendre vers la pollution de fond.

1.11. Annexe 11 : Impact de la distance du bâti à la route - Détail des résultats des modélisations 3D dans les avenues et rues canyons aux points d'intérêt 4,5 et 7



Les points d'intérêts 4, 5 et 7 (voir points en jaune ci-contre) sont tous situés dans des rues canyons, seul le type de voies diffère.

Les points sont situés proches de voies avec des caractéristiques différentes : le point 4 proche d'un boulevard à 2x2 voies, le point 7 proche d'un boulevard à 2 voies et le point 5 proche d'une rue à 1 voie.

Les concentrations aux points 4 et 7 (figures 42 et 44) montrent des résultats semblables. Les concentrations en NO_2 augmentent en fonction des TMJA : l'impact des distances est corrélé aux trafic. Les concentrations en polluants sont plus faibles lorsque la distance entre le bâti et la route est grande. A distance faible et TMJA fort, le point 4 situé proche du boulevard à 2x2 voies présente un maximum des concentrations de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et le maximum des concentrations au point 7 situé dans un boulevard à 2 voies est de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les résultats présents dans les graphes pour ces deux points sont similaires avec une droite légèrement plus pentue entre les distances faibles et moyennes au niveau du point 7. La figure 10 de Jones et al. (2000) montre cette différence de pente entre les routes à plusieurs voies et les routes à une ou deux voies qui présente une décroissance faible des concentrations totales de particules jusqu'à une distance de 20 mètres à la route.

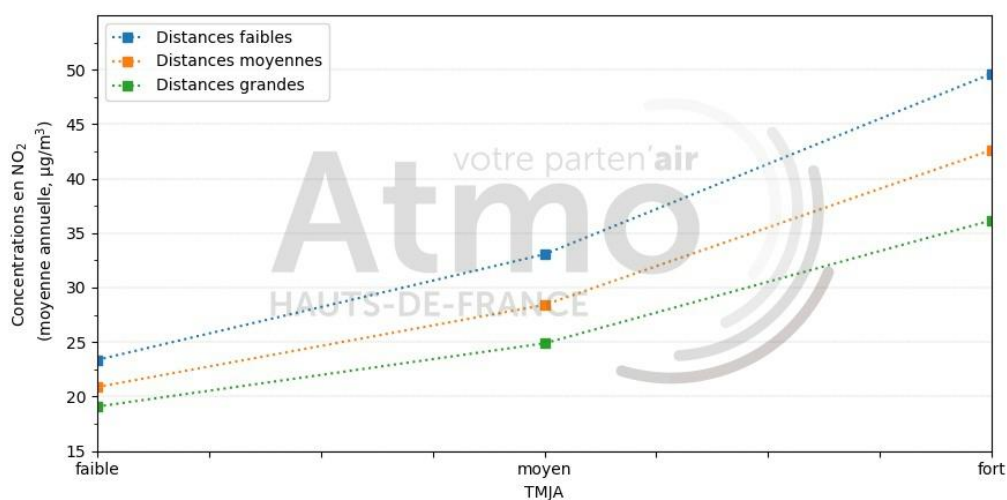


FIGURE 42 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 4.

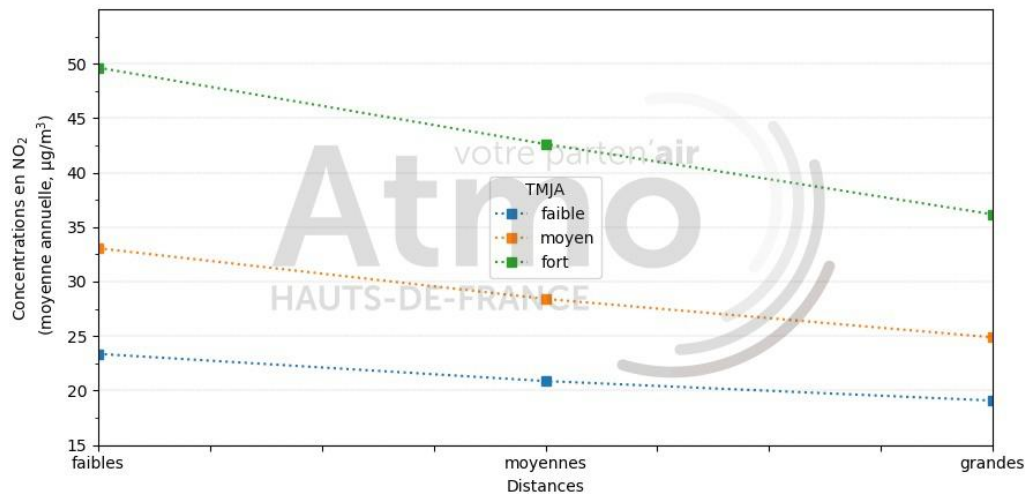


FIGURE 43 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 4.

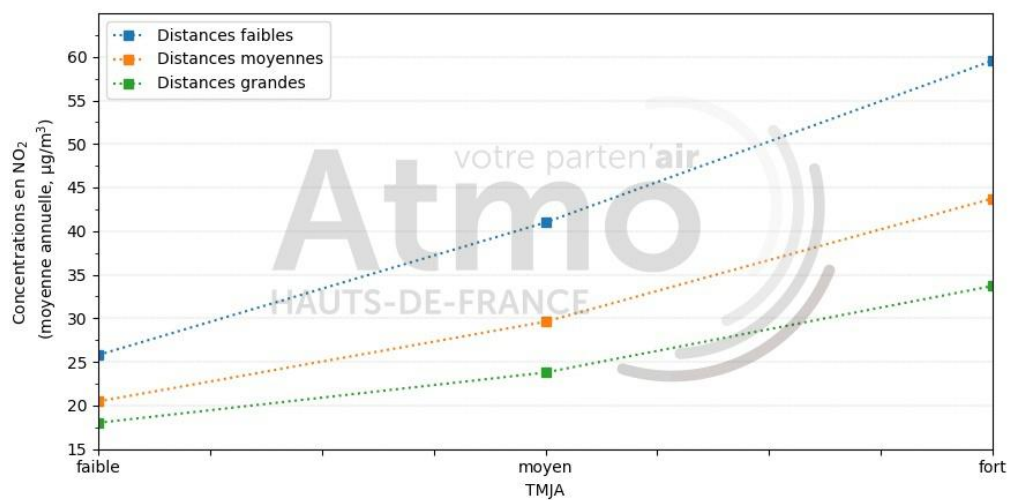


FIGURE 44 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 7.

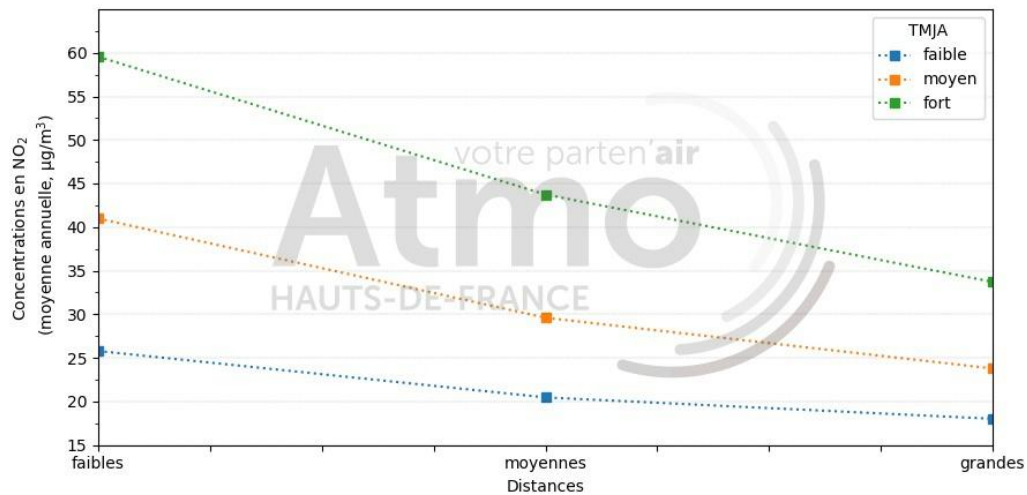


FIGURE 45 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 7.

Concernant le point 5, situé dans une rue à 1 voie, la tendance est la même que pour les points d'intérêts 4 et 7, mais les concentrations en NO₂ sont proches pour des distances faibles et moyennes.

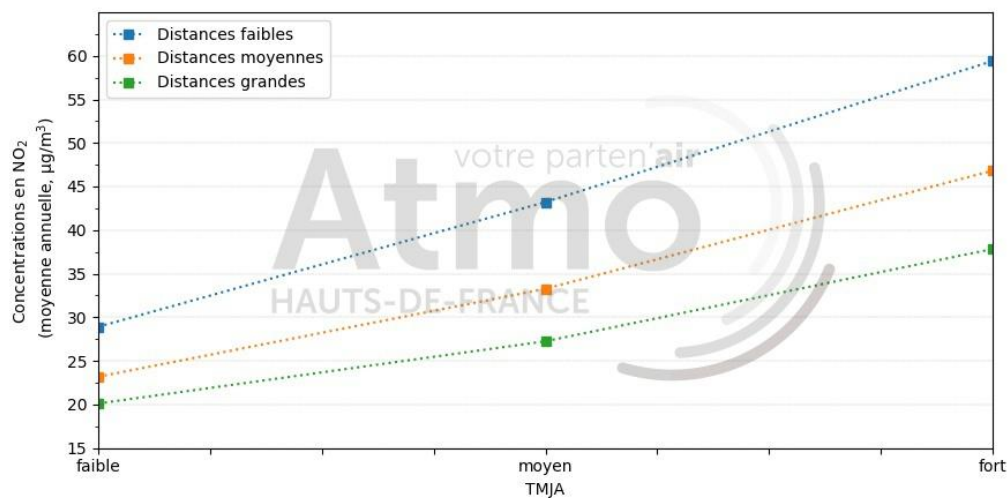


FIGURE 46 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes distances à la route au point 5.

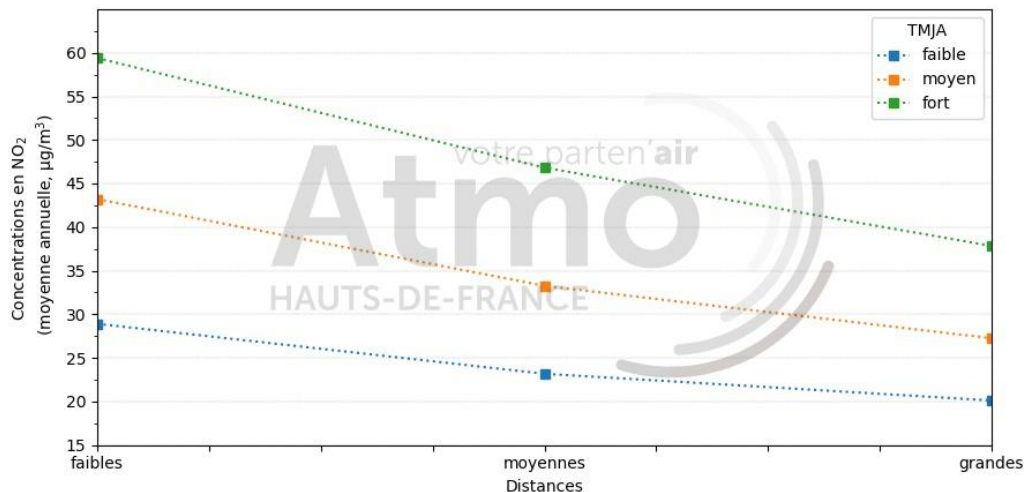


FIGURE 47 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 5.

Sur la figure 47, les concentrations en NO_2 ont la même dynamique pour tous les TMJA. La concentration diminue faiblement entre une distance faible et moyenne puis diminue de façon plus importante entre une distance moyenne et grande.

Le point d'intérêt 8, situé proche d'une zone ouverte, présente des pentes similaires aux points d'intérêt 4 et 7. Cependant, les concentrations maximales sont nettement plus faibles. (Figure 48)

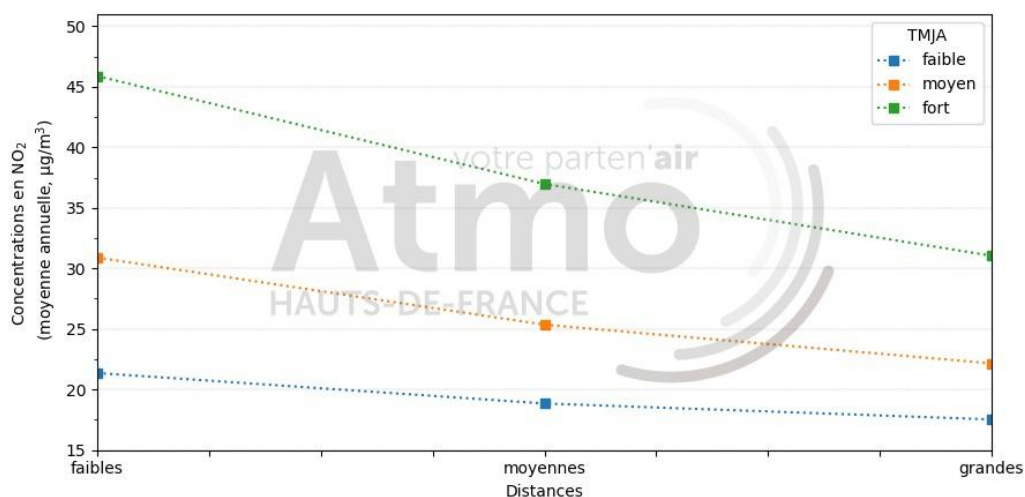


FIGURE 48 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des distances bâti route pour des TMJA différents au point 8.

1.12. Annexe 12 : Impact de la distance du bâti à la route - Interprétation détaillé des résultats dans les rues canyons



Les points d'intérêt 4, 5 et 7, en jaune dans la figure ci-contre, présentent la particularité de se trouver dans des rues canyons : des bâtiments sont situés des deux côtés de la rue, seules les voiries sont différentes, 2x2 voies, 1 voie et 2 voies, respectivement. Comme expliqué précédemment, la variation de la hauteur des bâtiments change le rapport d'aspect de la rue canyon. (voir paragraphe 2.3.1)

Dans cette partie du document, le paramètre de la hauteur h est constant et est fixé à une valeur moyenne de 13 mètres. Le paramètre de la largeur de la rue w évolue car il est lié à la distance du bâtiment à la route ($w = 2D + d$ avec D = distance du bâti au centre de la route et d = distance entre les voies).

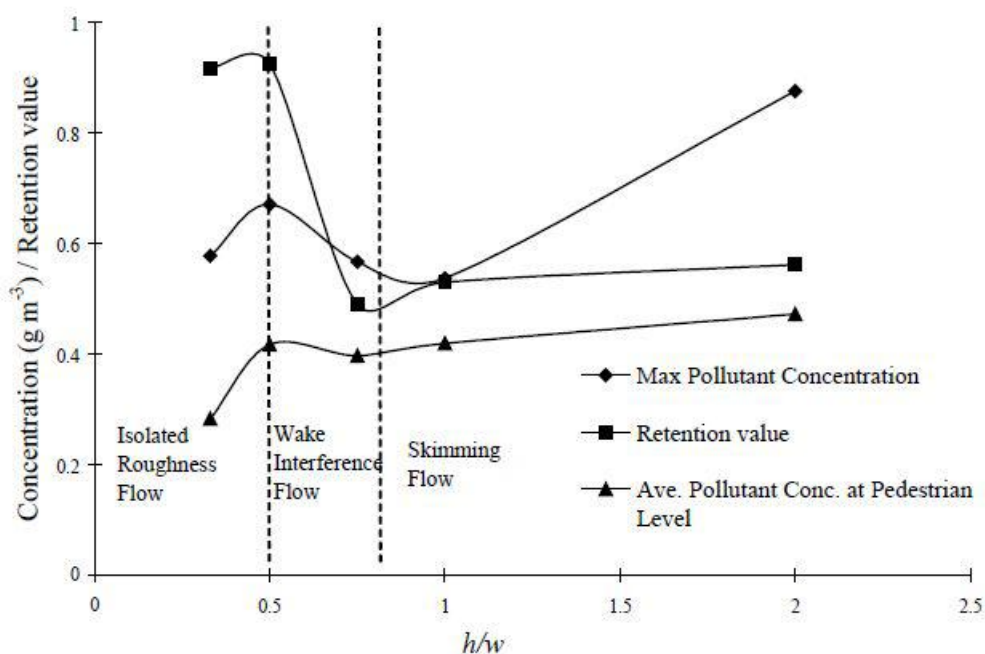


FIGURE 49 – Différents niveaux de concentrations en fonction des régimes d'écoulement et du rapport d'aspect. (source CHAN (2003))

Le tableau récapitulatif 12 et le graphe de la figure 49 expliquent les résultats obtenus sur les graphes du paragraphe 3.3.2. En effet, les écarts entre les concentrations à distance faible, moyenne et grande sur les figures 42, 44 et 47 s'expliquent par le changement des régimes d'écoulement rencontrés dans les rues en fonction de l'évolution de la largeur des rues. Par exemple, sur la figure 42, les concentrations en NO_2 sont proches pour des distances faibles et moyennes car le régime d'écoulement de la rue au point 5 est dans une phase intermédiaire complexe (régime

"wake interference flow" voir sur le tableau 12). A distance grande, les concentrations en NO₂ diminuent nettement car la rue est dans un régime d'écoulement "Isolated roughness flow".

	Avenue au point 4			Avenue au point 7			Rue au point 5		
Hauteur (H)	13 m			13 m			13 m		
Distance bâti/route	petite	moyenne	grande	petite	moyenne	grande	petite	moyenne	grande
Largeur de la rue (W)	22 m	30 m	39 m	14 m	23 m	31 m	17 m	24 m	32 m
Rapport d'aspect (H/W)	0,59	0,43	0,33	0,92	0,57	0,42	0,7	0,5	0,4
Régime d'écoulement	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Isolated roughness flow	Skimming flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow	Wake interference flow	Wake interference flow	Isolated roughness flow

TABLE 12 – Tableaux récapitulatifs des rapports d'aspects au point 4, 5 et 7

1.13. Annexe 13 : Impact de la végétation - Détail des résultats des modélisations 3D au bord de l'autoroute aux points d'intérêt 11 et 12



Le point 11 se trouve à l'extrémité gauche d'une haie de 8 mètres de haut et 3 mètres de largeur en bordure de l'autoroute. Le point 12 se trouve à l'extrémité droite de la même haie et proche du bâtiment qui longe l'autoroute.

Au niveau de la haie au bord de l'autoroute, les modélisations présentent des résultats variables. En effet, au point 11, les concentrations en dioxyde d'azote sont égales lorsque la densité de la végétation est faible et dense, quel que soit le trafic. Elles sont légèrement **plus faible** avec une densité de végétation **moyenne**.

Au contraire, au niveau du point d'intérêt 12, situé à l'extrémité droite de la haie et proche d'un bâtiment, les concentrations en dioxyde d'azote **sont plus faibles** quand la densité de végétation est **dense** et confondues quand la densité de végétation est faible et moyenne.

Au niveau de la haie au bord de l'autoroute, les modélisations présentent des résultats variables. En effet, au point 11, les concentrations en dioxyde d'azote sont égales lorsque la densité de la végétation est faible et dense, quel que soit le trafic. Elles sont légèrement **plus faible** avec une densité de végétation **moyenne** comme le montre la figure 50.

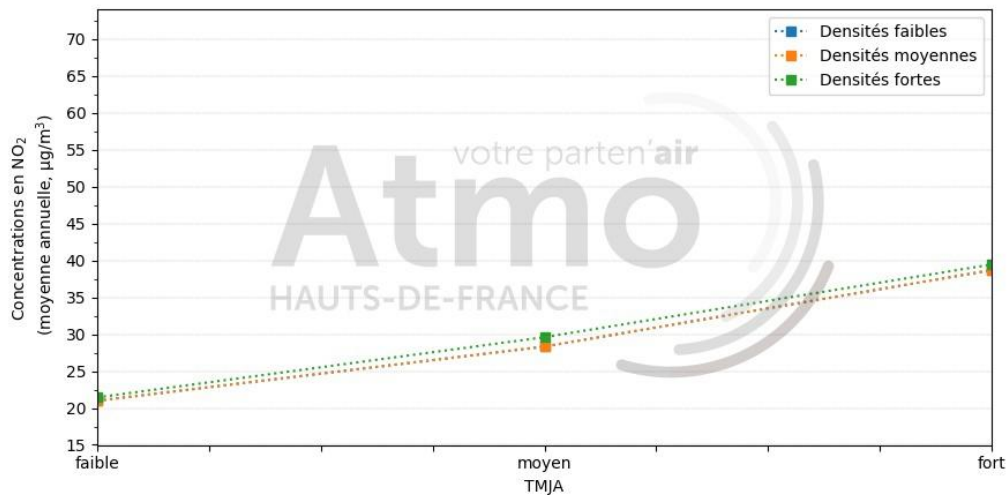


FIGURE 50 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 11.

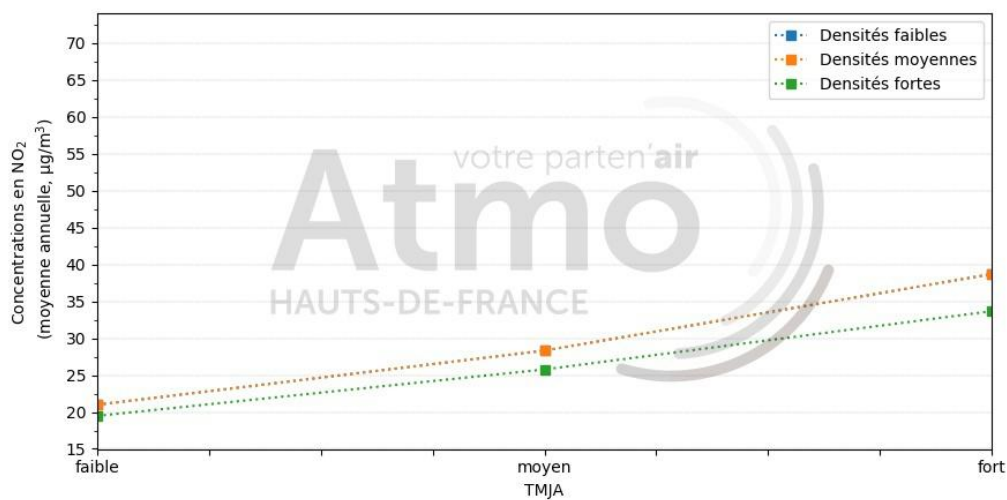


FIGURE 51 – Concentrations moyennes annuelles en NO₂ à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 12.

Au contraire, au niveau du point d'intérêt 12, situé à l'extrémité droite de la haie et proche d'un bâtiment, les concentrations en dioxyde d'azote **sont plus faibles** quand la densité de végétation est **dense** et confondues quand la densité de végétation est faible et moyenne. (Figure 51)

1.14. Annexe 14 : Impact de la végétation - Détail des résultats des modélisations 3D à proximité d'un boulevard à 2 voies



Le point d'intérêt 9 se trouve derrière une haie d'une hauteur de 6 mètres et d'une largeur de 2 mètres au carrefour entre le boulevard à 4 voies et le boulevard à 2 voies. Le point 10 est situé derrière une haie de même dimension le long du boulevard à 2 voies.

Aux points d'intérêt 9 et 10 présentés ci-dessus, placés dans une configuration de distance à la route moyenne de 10 mètres entre le bâti et le centre de la route, les concentrations sont les mêmes pour une densité faible et moyenne et sont plus faibles avec une densité végétale forte ($8 \text{ m}^2/\text{m}^3$) comme le montrent les graphes des figures 52 et 53.

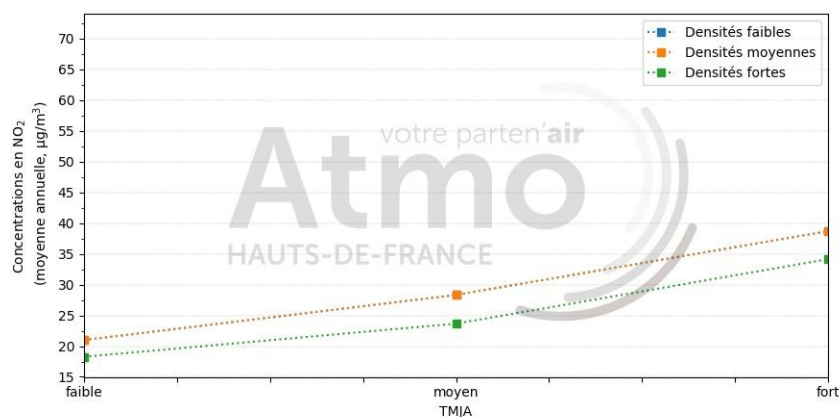


FIGURE 52 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 9.

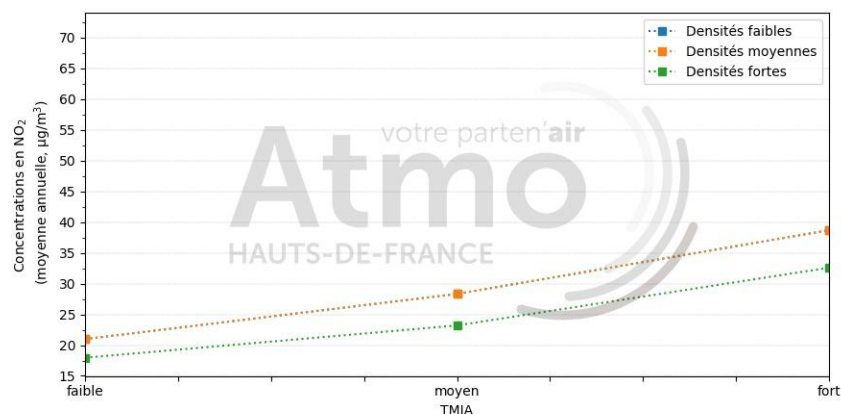


FIGURE 53 – Concentrations moyennes annuelles en NO_2 à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 10.

Concernant le dioxyde d'azote, au point 9, avec une haie à forte densité les gains en concentrations par rapport aux densités moyennes ou faibles varient de $2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des TMJA faibles à $4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des TMJA fort. (Figure 52) Pour les particules PM_{10} , les gains de concentrations s'échelonnent de $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des TMJA faibles, à $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec des TMJA forts. (Figure 54)

Au point 10, la diminution suit la même dynamique. Pour le dioxyde d'azote (Figure 53), les gains sont de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour des TMJA faibles, moyens et forts et pour les particules PM_{10} (Figure 55), de $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

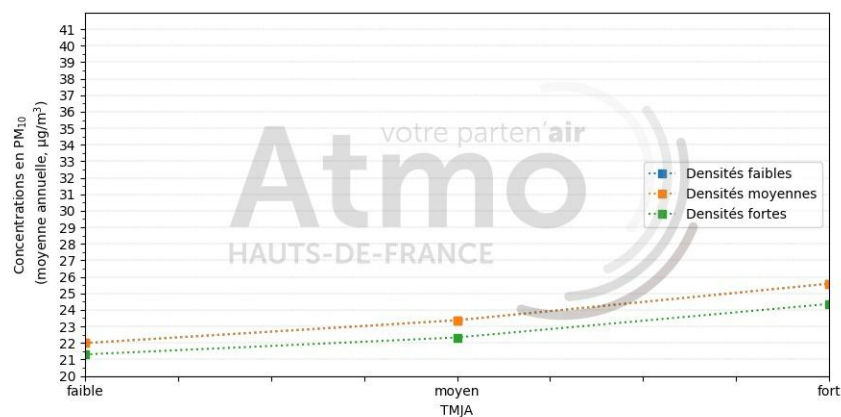


FIGURE 54 – Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 9.

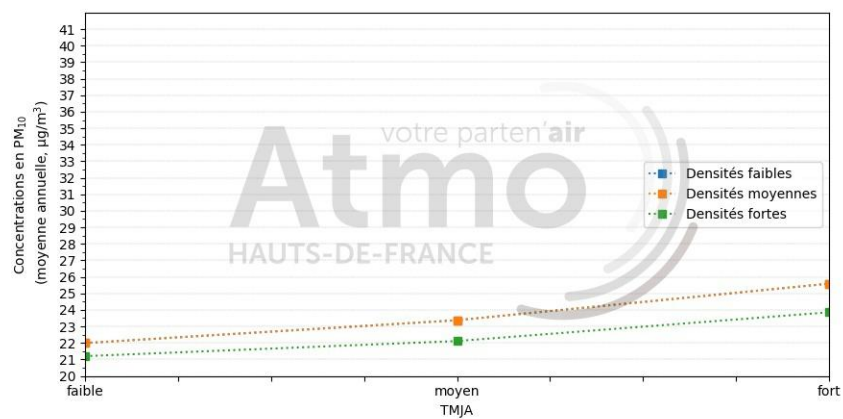


FIGURE 55 – Concentrations moyennes annuelles en PM_{10} à 2 mètres en fonction des TMJA pour différentes densités de végétation au point 10.

Bibliographie

- [1] Abhijith et al. « Air Pollution Abatement Performances of Green Infrastructure in Open Road and Built-up Street Canyon Environments - A Review ». In : *Atmospheric Environment* 162 (mai 2017), p. 71-86. doi : 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014.
- [2] Richard Baldauf. « Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality ». In : *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 52 (mai 2017), p. 354-361. doi : 10.1016/j.trd.2017.03.013.
- [3] Cerema. « Qualité de l'air et Plan local d'urbanisme ». In : (juin 2017).
- [4] Chan. « Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality ». In : *Atmospheric Environment* 35 (nov. 2001). doi : 10.1016/S1352-2310(01)00483-6.
- [5] Chan. « Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality - Part II : Multiple canopies and canyons ». In : *Atmospheric Environment* 37 (juin 2003), p. 2761-2772. doi : 10.1016/S1352-2310(03)00252-8.
- [6] Payam Dadvand et al. « Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (juin 2015). doi : 10.1073/pnas.1503402112.
- [7] Amini Ghasemian Masoud. « The influence of roadside solid and vegetation barriers on near-road air quality ». In : *Atmospheric Environment* 170 (sept. 2017), p. 108-117. doi : 10.1016/j.atmosenv.2017.09.028.
- [8] Peter James, Rachel Banay et al. « A Review of the Health Benefits of Greenness ». In : *Current Epidemiology Reports* 2 (juin 2015). doi : 10.1007/s40471-015-0043-7.
- [9] Peter James, Jaime Hart et al. « Exposure to Greenness and Mortality in a Nationwide Prospective Cohort Study of Women ». In : *Environmental health perspectives* 124 (avr. 2016). doi : 10.1289/ehp.1510363.
- [10] Sara Janhäll. « Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion ». In : *Atmospheric Environment* 105 (jan. 2015), p. 130-137. doi : 10.1016/j.atmosenv.2015.01.052.
- [11] S. Jones et al. « The Use of Measurement Programmes and Models to Assess Concentrations Next to Major Roads in Urban Areas ». In : *Environmental Monitoring and Assessment* 64 (sept. 2000), p. 531-547. doi : 10.1023/A:1006316713924.
- [12] Dan Mei et al. « Evaluating Dust Particle Transport Performance within Urban Street Canyons with Different Building Heights ». In : *Aerosol and Air Quality Research* 16.6 (2016), p. 1483-1496. doi : 10.4209/aaqr.2015.07.0436. url : <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.07.0436>.
- [13] Ian Neft et al. « Simulations of Aerosol Filtration by Vegetation : Validation of Existing Models with Available Lab data and Application to Near-Roadway Scenario ». In : *Aerosol Science and Technology* 50 (juin 2016). doi : 10.1080/02786826.2016.1206653.
- [14] Oke. « Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality ». In : *Energy and Buildings* 11 (mar. 1988). doi : 10.1016/0378-7788(88)90026-6.
- [15] Mathilde Pascal, Karine Laaidi et Pascal Beaudeau. « Intérêt des espaces verts et ombragés dans la prévention des impacts sanitaires de la chaleur et de la pollution de l'air en zones urbaines ». In : *Revue Forestière Française* (jan. 2018), p. 353. doi : 10.4267/2042/70007.
- [16] Sotiris Vardoulakis et al. « Modelling air quality in street canyons : A review ». In : *Atmospheric Environment* 37 (jan. 2003), p. 155-182. doi : 10.1016/S1352-2310(02)00857-9.



RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-hdf.fr

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air

199, rue Colbert – Bâtiment Douai

59000 Lille

