



Impact de la mise en service du tramway angevin

sur la qualité de l'air au niveau
de 6 voies de circulation

février 2013 - rapport final



sommaire

synthèse	1
introduction	6
dispositif de mesure.....	7
les sites de trafic sélectionnés	7
le dispositif mis en œuvre.....	10
la période de mesure	15
récapitulatif des mesures	15
les résultats de la campagne de mesure 2012	16
conditions météorologiques durant la campagne 2012	16
les niveaux de benzène	18
les niveaux de dioxyde d'azote	20
les niveaux de monoxyde de carbone.....	26
les niveaux de particules fines	29
évaluation de la contribution de « l'effet tramway » sur les niveaux de pollution enregistrés	33
approche par modélisation statistique.....	33
approche par modélisation déterministe.....	35
résultats de la modélisation OSPM	37
conclusions.....	40
annexes	41
annexe 1 : Air Pays de la Loire	42
annexe 2 : techniques d'évaluation.....	43
annexe 3 : types des sites de mesure	44
annexe 4 : polluants	45
annexe 5 : correction des concentrations de NO ₂ mesurées par tube passif	47
annexe 6 : résultats des tests statistiques	49
annexe 7: description technique de la modélisation des rues "canyons"	51
annexe 8 : méthodologie de récupération des données géométriques des rues "canyons"	52
annexe 9 : accord mesure/modèle	55
annexe 10 : seuils de qualité de l'air 2012	56
bibliographie	57

contributions

Coordination de l'étude - Rédaction : Valérie Viranaiken, Modélisation : Florence Guillou, Exploitation statistique : Frédéric Penven, Mise en page : Bérangère Poussin, Exploitation du matériel de mesure : Arnaud Tricoire et équipe métrologie opérationnelle, Validation : François Ducroz / Arnaud Rebours.

conditions de diffusion

Air Pays de la Loire est l'organisme agréé pour assurer la surveillance de la qualité de l'air dans la région des pays de la Loire, au titre de l'article L. 221-3 du code de l'environnement, précisé par l'arrêté du 3 août 2010 pris par le Ministère chargé de l'Écologie.

A ce titre et compte tenu de ses statuts, Air Pays de la Loire est garant de la transparence de l'information sur les résultats des mesures et les rapports d'études produits selon les règles suivantes :

Air Pays de la Loire, réserve un droit d'accès au public aux résultats des mesures recueillies et rapports produits dans le cadre de commandes passées par des tiers. Ces derniers en sont destinataires préalablement.

Air Pays de la Loire a la faculté de les diffuser selon les modalités de son choix : document papier, communiqué, résumé dans ses publications, mise en ligne sur son site Internet www.airpl.org, etc...

Air Pays de la Loire ne peut en aucune façon être tenu responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels Air Pays de la Loire n'aura pas donné d'accord préalable.

remerciements

Nous tenons à remercier Messieurs Gobin et Lemasle d'Angers Loire Métropole pour leur collaboration à l'installation de nos laboratoires mobiles et à la fourniture des données de comptage.

synthèse

contexte → modéliser les effets des politiques de déplacement pour appuyer les collectivités

La surveillance de la qualité de l'air dans les villes et l'amélioration de la connaissance de la pollution urbaine constitue un enjeu essentiel à l'heure actuelle.

Les collectivités locales souhaitent la mise en œuvre d'outils et d'analyses leur permettant d'évaluer les impacts futurs de leurs politiques (notamment les Plans de déplacement urbain) en matière de qualité de l'air, afin de les ajuster au mieux.

Dans cette perspective, Air Pays de la Loire et Angers Loire Métropole ont collaboré sur ce sujet à plusieurs reprises :

- en 2006, lors d'une étude de la qualité de l'air dans les rues « canyons » de l'agglomération, en vue d'une évaluation de l'impact de la mise en œuvre du Plan de Déplacement Urbain sur la qualité de l'air dans 200 rues ;
- en 2008, pour une campagne de mesure dans six rues de l'agglomération d'Angers, constituant la première phase de la présente étude (avant mise en place du tramway). Ses résultats étant destinés à être mis en perspective avec les mesures intervenant une fois le tramway mis en service.

objectifs → étude de l'évolution de la qualité de l'air de six rues concernées par la mise en place du tramway

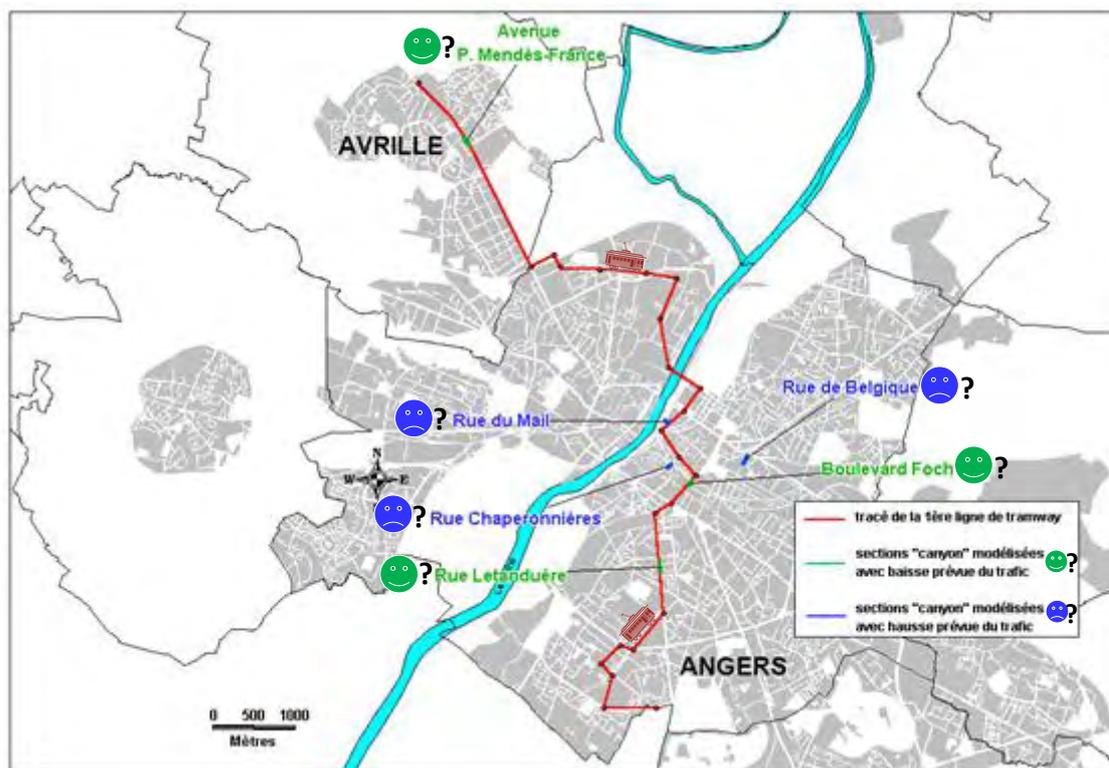
Après la mise en service d'un tramway en 2011 à Angers, l'objectif de l'étude réalisée en 2012 est :

- d'évaluer dans six rues représentatives, les évolutions des niveaux de qualité de l'air ;
- de comparer les résultats à ceux obtenus lors de la première étude en 2008 ;
- d'isoler l'impact de différents paramètres (« effet tramway », pollution de fond, caractéristiques du parc automobile, météorologie) sur les résultats observés.

Les mesures ont été réalisées sur les six axes de circulation déjà étudiés en 2008 :

• **trois axes empruntés par la ligne de tramway et susceptibles d'enregistrer une amélioration de la qualité de l'air :** 😊?, le boulevard Foch et la rue Letanduère à Angers, l'avenue Mendès France à Avrillé ;

trois axes susceptibles d'enregistrer une dégradation de leur qualité de l'air suite à des reports de circulation : 😞?, les rues Chaperonnière, du Mail et de Belgique.



Axes de circulation étudiés avant et après la mise en place du tramway

moyens mesures de polluants d'origine automobile et modélisations

des mesures de polluants d'origine automobile dans six rues

En 2008, la première campagne de mesure s'était déroulée en partie pendant des vacances scolaires (12 au 27 avril 2008), des ponts et des jours fériés. Afin d'avoir des conditions de trafic et météorologiques comparables, et en accord avec Angers Loire Métropole, la campagne de 2012 a été réalisée du 30 avril au 31 mai 2012 hors période scolaire mais présentant 2 jours fériés le 1^{er} et 8 mai. Les vents ont soufflé essentiellement du secteur Sud-Ouest en 2008 et du Nord en 2012. Il a fait plus chaud en mai 2012 (température moyenne de 14 °C) par comparaison à avril 2008 (10.2°C). Les polluants étudiés sont ceux caractéristiques de la pollution d'origine automobile.

Afin de connaître les évolutions de trafic entre les deux campagnes, des comptages ont été à nouveau réalisés en 2012.

Comme en 2008, les sites de Foch et Letandière ont été équipés d'analyseurs automatiques enregistrant en continu les niveaux de dioxyde d'azote (NO₂), de particules fines PM10 et de monoxyde de carbone (CO).

En complément, des mesures de benzène et de dioxyde d'azote ont été effectuées dans chacune des six rues à l'aide de tubes à diffusion passive sur quatre séquences d'une semaine, du 26 avril au 24 mai 2012.



Laboratoire mobile dans le boulevard Foch



Analyseurs automatiques dans la rue Letanduère



Tubes à diffusion passive mesurant le NO2 dans leur boîte de protection

des modélisations pour évaluer la contribution de l'« effet tramway »

Deux méthodes ont été utilisées afin d'isoler l'impact de la mise en place du tramway par rapport à d'autres facteurs :

- une approche par modélisation statistique: le principe est de calculer les concentrations de polluants qui auraient été mesurées en 2012 si la ligne de tramway n'avait pas été mise en place ;
- une approche par modélisation déterministe, via le logiciel OSPM (Operational Street Pollution Model) : qui permet quantifier les contributions respectives des quatre facteurs principaux à l'origine de l'évolution des niveaux de pollution (météorologie, pollution de fond, parc automobile et conditions de trafic, ce dernier étant représentatif de l' « effet tramway »).

résultats → diminution de la pollution et effet positif du tramway

une diminution des niveaux pour tous les polluants

La comparaison des mesures réalisées en 2008 et 2012 montre une diminution des niveaux pour tous les polluants mesurés. Celle-ci est à lier à plusieurs paramètres qu'il est nécessaire d'isoler pour prendre la mesure de leurs impacts respectifs.

type de rue	nom de la rue	benzène	NO ₂	CO	PM ₁₀
😊 ?	boulevard Foch	↘	↘	↘	↘
😊 ?	rue Letanduère	↘	↘	↘	↘
😊 ?	avenue Mendès France	↘	↘		
😞 ?	rue Chaperonnière	↘	↘		
😞 ?	rue du Mail	↘	↘		
😞 ?	rue de Belgique	↘	↘		

- 😊 ? axes susceptibles d'enregistrer une amélioration de la qualité de l'air
- 😞 ? axes susceptibles d'enregistrer une dégradation de leur qualité de l'air
- ↗ augmentation des niveaux de polluants
- ↘ baisse des niveaux de polluants

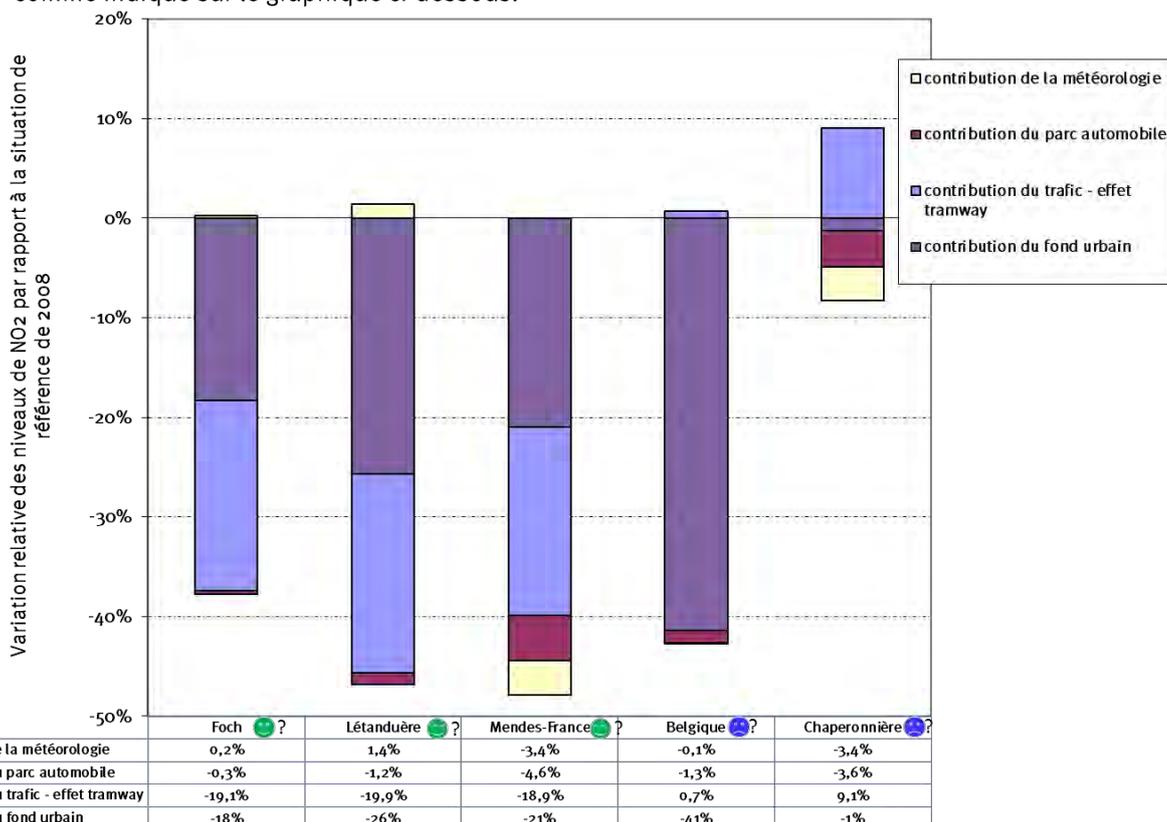
Évolution des niveaux de polluants entre 2008 et 2012

la mise en évidence de l'effet positif du tramway sur les niveaux de pollution

La modélisation statistique réalisée pour les rues Foch et Letanduère sur les concentrations de dioxyde d'azote, monoxyde de carbone et particules fines PM₁₀ fait ressortir que les niveaux mesurés sont inférieurs à ceux calculés pour une situation 2012 sans tramway. Si les conditions de circulation dans ces deux axes n'avaient pas été modifiées, les niveaux de pollution (tous polluants confondus) en 2012 auraient été 1.2 fois plus élevés dans le boulevard Foch et 1.4 fois plus élevés dans la rue Letanduère.

La modélisation déterministe montre que de façon globale les deux paramètres les plus influents sur l'évolution de niveaux de dioxyde d'azote entre 2008 et 2012 sont les conditions de trafic (« effet tramway ») et la pollution de fond.

Les contributions relatives de l'un ou l'autre des paramètres sont variables en fonction des rues comme indiqué sur le graphique ci-dessous.



Variations des concentrations de NO₂ induites par les différentes contributions, par rapport à la situation de référence de 2008

conclusions et perspectives → une amélioration de la qualité de l'air en partie due au tramway

Grâce aux campagnes de mesure réalisées en 2008 et 2012 et aux modélisations associées, cette étude a mis en évidence l'impact de la mise en service du tramway sur la qualité de l'air dans les six rues étudiées.

Les trois axes qui étaient susceptibles a priori d'enregistrer une amélioration de leur qualité de l'air – les rues Foch, Letanduère et Mendès France - ont constaté l'effet bénéfique attendu.

La modélisation statistique réalisée pour les rues Foch et Letanduère montre que si les conditions de circulation n'avaient pas été modifiées positivement par la mise en service du tramway, les niveaux de polluants mesurés en 2012, auraient été significativement plus élevés que ceux de 2008. (-20 % en moyenne pour le boulevard Foch et -40 % en moyenne pour la rue Letanduère).

Cet « effet tramway » est confirmé par la modélisation déterministe réalisée pour le dioxyde d'azote, qui montre un effet bénéfique sur la qualité de l'air d'environ 20 %.

Les trois axes qui étaient susceptibles de subir une dégradation de leur qualité de l'air suite à des reports de circulation - les rues Chaperonnière, du Mail et de Belgique - enregistrent malgré tout une amélioration de la qualité de leur air entre 2008 et 2012. Cette baisse des niveaux de pollution est attribuable à la baisse de la pollution urbaine de fond observée entre les deux périodes d'étude.

A l'avenir, ce type d'étude associant des campagnes de mesure couplées à des études de modélisation pourrait être étendu à d'autres projets urbains permettant ainsi de quantifier l'impact de ces projets sur la qualité de l'air.

introduction

Selon la réglementation, la surveillance de la qualité de l'air doit notamment fournir des renseignements dans les endroits où s'observent les plus fortes concentrations de polluants atmosphériques auxquelles la population est exposée. En agglomération, il s'agit des rues soumises aux rejets atmosphériques de la circulation.

L'amélioration de la connaissance de la pollution urbaine et notamment de proximité routière constitue un axe de travail prioritaire pour Air Pays de la Loire dont un des objectifs prévoit de mieux répondre aux attentes des collectivités locales sur l'impact de leurs politiques de déplacements.

Dans ce cadre, en 2006, Air Pays de la Loire a réalisé en collaboration avec Angers Loire Métropole, une étude de la qualité de l'air dans les rues « canyons » de l'agglomération angevine. Un des objectifs de cette étude était d'évaluer, par modélisation, l'impact de la mise en œuvre du Plan de Déplacement Urbain sur la qualité de l'air dans 200 rues [16].

Cette étude avait montré que la réduction de la pollution sur la période 2002-2015 proviendrait pour une large part du renouvellement du parc de véhicules. Toutefois la mise en œuvre du projet de PDU devait également contribuer à améliorer la qualité de l'air dans les rues de l'agglomération angevine. Suite à ces premiers résultats, les élus d'Angers Loire Métropole ont souhaité les préciser et poursuivre l'investigation par la réalisation d'un suivi de la qualité de l'air dans certaines rues.

Ainsi une 1^{ère} campagne de mesure a été réalisée en 2008 dans 6 rues de l'agglomération d'Angers afin d'évaluer les niveaux de pollution générée par le trafic, avant la mise en place du tramway prévue en 2011. Une seconde phase de mesures, après la mise en œuvre de la ligne de tramway, a été programmée en 2012.

Ce rapport présente le dispositif mis en œuvre lors des deux campagnes de mesure puis les résultats en termes d'évolution des niveaux de pollution et de quantification de l'impact de la ligne de tramway sur les niveaux de pollution.

dispositif de mesure

les sites de trafic sélectionnés

choix des axes

Les 3 tronçons sélectionnés en lien avec une baisse attendue de la pollution sont le boulevard Maréchal Foch entre la rue Saint-Haubin et la rue Saint-Julien, la rue Letanduière entre l'avenue de Chanzy et la rue du général Bizot et l'avenue Mendès-France entre la rue de la gare et l'avenue de la petite Garde. Ces tronçons de rues ont été retenus par les élus d'Angers Loire Métropole et Air Pays de la Loire en 2007. Plusieurs raisons ont conduit au choix de ces rues : diminution importante de la pollution selon la modélisation suite à la mise en œuvre du plan de déplacements urbains[16], concentrations potentiellement élevées en polluants en raison des niveaux de trafic et de confinement, voie emblématique du centre-ville d'Angers pour le boulevard Foch, forte fréquentation piétonnière et/ou automobile par les habitants de l'agglomération. La Figure 1 localise ces 3 portions étudiées.

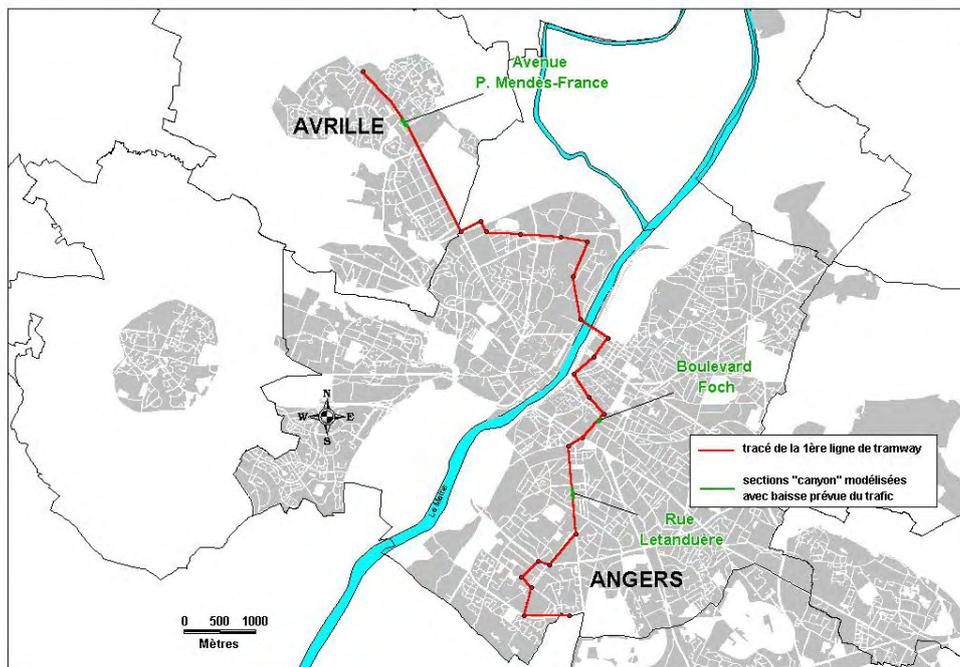


Figure 1 : localisation du boulevard Foch, de la rue Letanduière et de l'avenue Mendès-France

Pour ce qui est des axes susceptibles d'enregistrer une hausse de la pollution, ils ont été choisis en prenant en compte, à la fois, l'augmentation significative du trafic simulée par les modèles due aux reports de trafic et le caractère canyon minimal ($H/L > 0.5$) de ces rues. Les rues Chaperonnière, du Mail et de Belgique ont été choisies (cf. Figure 2).

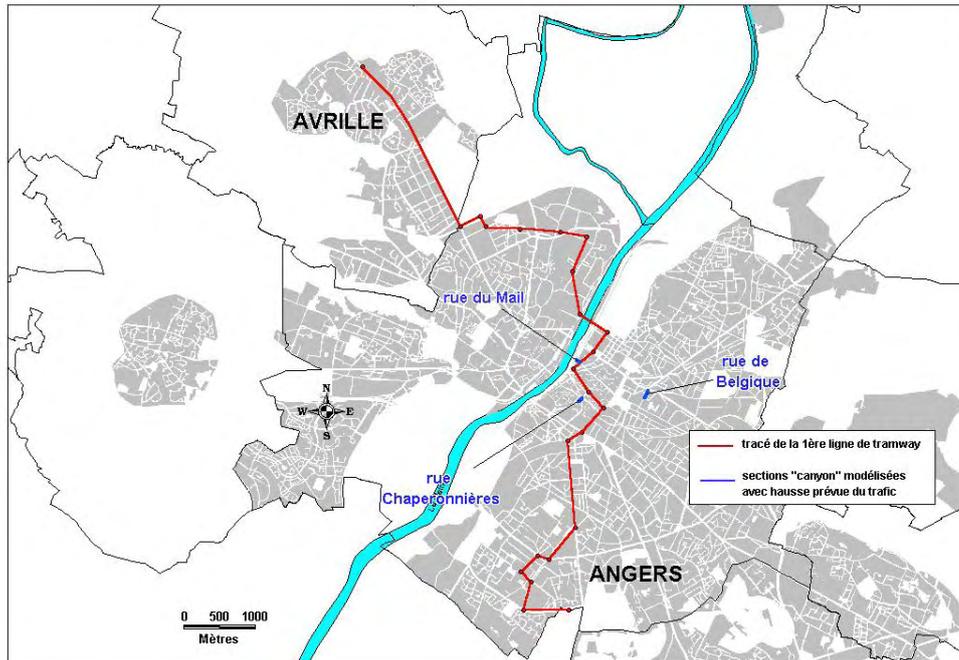


Figure 2 : localisation des rues de Belgique, Chaperonnière et du Mail

Afin de pouvoir faire une comparaison fiable avant/après mise en place de la ligne de tramway, les points de mesure de 2012 ont été placés aux mêmes endroits, voir le plus proche possible, des sites de mesure de 2008.

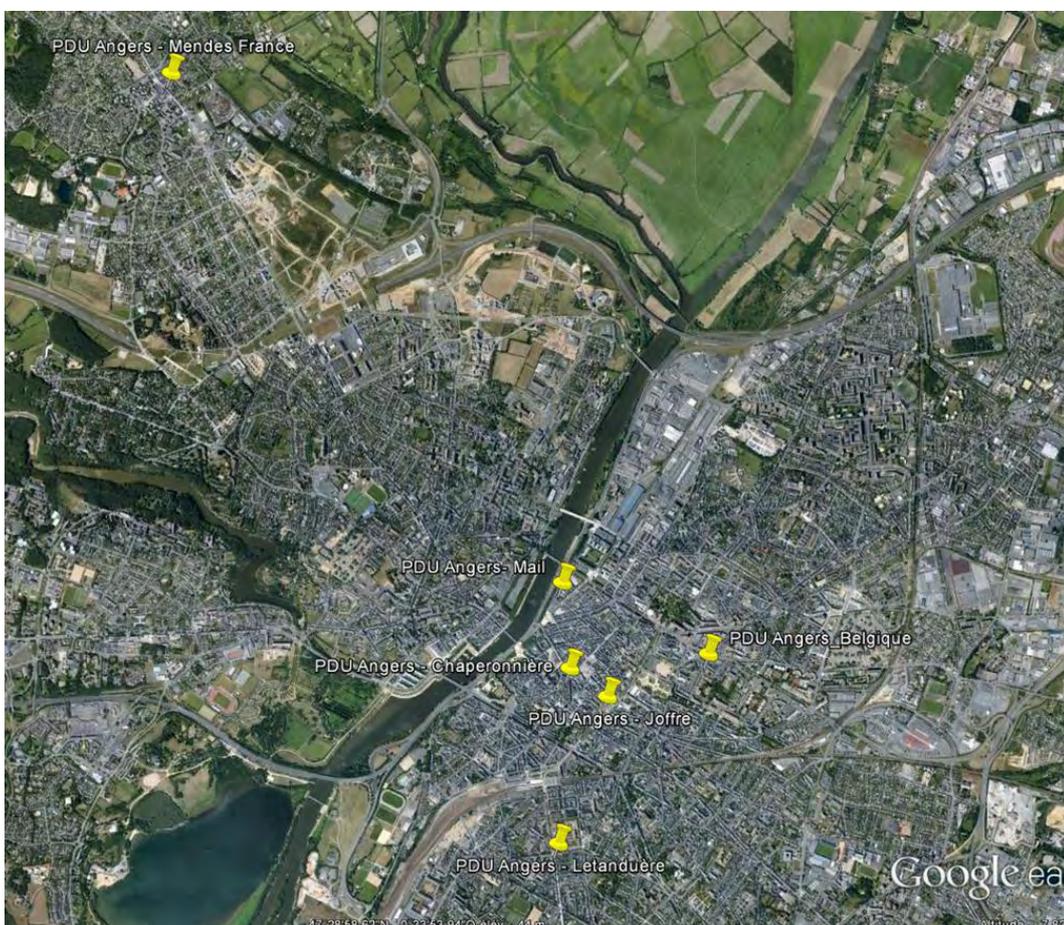


Photo 1 : localisation des 6 sites de mesure

évolution du trafic sur les 6 axes étudiés entre 2008 et 2012

Dans le cadre de la nouvelle campagne de mesure de 2012, une nouvelle série de comptages routiers a été réalisée par les services techniques de la Ville d'Angers. Les comptages ont été effectués du 15 au 29 mai sur les axes Foch, Mendès France, Belgique, Chaperonnière et Mail, et du 24 mai au 6 juin dans la rue Letanduère.

Le tableau suivant récapitule les données de comptage de 2008, de 2012 ainsi que les TMJA calculés par simulation pour l'année 2015 après mise en place du tramway.

	TMJA mesuré en 2008 (nb veh/j)	TMJA mesuré en 2012 (nb veh/j)	TMJA modélisé pour 2015 (nb veh/j)	Ecart attendu 2008-2015 (%)	Ecart mesuré 2008-2012 (%)
Boulevard Foch	17545	11708	13000	-26%	-33%
Rue Letanduère	5464	1282	1000	-82%	-76%
Avenue Mendès France	16230	7051	7000	-57%	-57%
Rue de Belgique	1127	768	10000	233%	-32%
Rue Chaperonnière	3911	3887	7000	133%	-0,6%
Rue du Mail	–	46	7000	–	–

Tableau 1 : synthèse des TMJA modélisés pour 2015 et mesurés en 2008 et 2012

Remarque : dans le cas de la rue du Mail, les données de comptage ne figurent pas dans le tableau car les points de comptage de 2008 et 2012, ne sont pas identiques. Les différences de TMJA ne seront donc pas interprétables pour évaluer l'impact de la mise en place du tramway sur cette rue.

D'après ces mesures, on constate une réduction de – 0.6 % à – 76 % du trafic sur tous les axes étudiés alors que les simulations prévoyaient une augmentation du trafic dans les rues de Belgique et Chaperonnière.

Sur le boulevard Foch, la rue Letanduère et l'avenue Mendès France, la réduction de TMJA mesurée concorde avec les prévisions du modèle. Cette baisse du trafic est liée principalement au partage des voies de circulation avec le tramway. Rue de Belgique, le trafic a diminué de plus de 30%.

Dans la rue Chaperonnière, le trafic n'a que très peu diminué. Cependant, le carrefour sur lequel débouche cet axe a été modifié (rue Chaussée Saint Pierre fermée à la circulation) entraînant des embouteillages plus fréquents. Par ailleurs, la circulation des bus a augmenté sur cette voie (Angers Loire Métropole communication personnelle).

le dispositif mis en œuvre

les principaux polluants d'origine automobile

Des mesures horaires d'oxydes d'azote, de poussières fines (PM₁₀), de monoxyde de carbone (CO) ont été réalisées à l'aide d'analyseurs automatiques sur 2 des axes étudiés : boulevard Foch et rue Letanduère. Ces données ont été complétées par des mesures hebdomadaires par tubes à diffusion passive, de benzène et de dioxyde d'azote sur l'ensemble des 6 rues sélectionnées.

des mesures de NO_x, CO, PM₁₀, en continu

Les oxydes d'azote (NO_x) sont mesurés selon la norme NFX 43.018 ; le monoxyde de carbone selon la norme EN 14626. Les poussières fines de diamètre inférieur à 10 µm (PM₁₀) sont mesurées en utilisant la méthode gravimétrique TEOM (pesées à fibration de fréquence) ajustées avec un module additionnel FDMS (Filter Dynamics Measurement System).

Le suivi du bon fonctionnement des analyseurs est périodiquement réalisé, notamment lors d'opérations de vérification ou d'étalonnage. Ces opérations peuvent être manuelles ou automatiques, réalisées sur site ou télécommandées.

Les opérations d'étalonnage sont effectuées avec des étalons de transfert raccordés au laboratoire d'étalonnage de niveau 2 d'Air Pays de la Loire (airpl.lab). Ce laboratoire est accrédité Cofrac 17025 dans le domaine " chimie et matériaux de référence – mélanges de gaz " depuis le 1^{er} août 2004.



Photo 2 : analyseur d'oxydes d'azote

des mesures indicatives de benzène par tubes à diffusion passive

Cette méthode de prélèvement consiste à laisser diffuser le benzène de l'air extérieur à travers une membrane poreuse et à le piéger sur un adsorbant contenu dans un tube à diffusion. Le benzène est ainsi retenu et s'accumule sur la cartouche d'adsorbant. Dans le cadre de cette campagne, les tubes radiaux du type « Radiello ® » ont été utilisés. Les performances de ces tubes ont été évaluées lors de différents tests de validation menés en chambre d'exposition [1], [2], [3] ainsi que lors de campagnes de mesure sur le terrain [4]. Avec ce type de tubes, l'adsorption se fait sur toute la surface du cylindre, comme présenté sur la Figure 3.

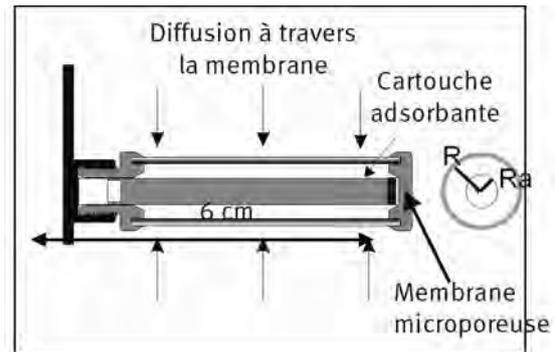


Figure 3 : tubes à diffusion passive installés dans leur boîte de protection

Ce mode de prélèvement nécessite de longues périodes d'exposition des tubes : dans le cadre de cette campagne d'essai, les tubes ont été exposés sur sites durant 7 jours. Les concentrations obtenues correspondent donc à des **teneurs moyennes sur 7 jours**.

Cette méthode de mesure est considérée comme une mesure indicative (incertitude inférieure à 30 %) au sens de la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008.

La cartouche exposée est ensuite envoyée au laboratoire d'analyse d'Airparif (Lasair) : les composés adsorbés y sont désorbés thermiquement puis analysés par chromatographie gazeuse avec détection FID [5].

Pour cette étude chaque site de mesure était doté de deux tubes à diffusion (doublons). L'écart de concentration entre ces 2 mesures permet d'évaluer la répétabilité de la technique de mesure. Sur la totalité des doublons mis en place l'écart relatif moyen entre deux tubes ne dépasse pas 10 % (6.1 %) ; l'écart absolu maximal en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ demeurant inférieur à $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de benzène. Ceci confirme la bonne répétabilité de la méthode diffusive pour la mesure du benzène. La moyenne des doublons a donc été considérée dans l'étude.

des mesures indicatives de dioxyde d'azote par tubes à diffusion passive

Le principe de mesure est identique à celui du benzène par tubes à diffusion c'est-à-dire une diffusion moléculaire du dioxyde d'azote présent dans l'air vers une surface adsorbante recouverte d'une adsorbant spécifique au NO₂. Comme pour le benzène, les tubes sont exposés 7 jours. Les concentrations mesurées correspondent donc à des teneurs moyennes sur 7 jours. Les tubes utilisés dans cette étude sont commercialisés par la société Passam® et analysés par le laboratoire d'Airparif (Lasair). Ils font l'objet de plusieurs études de validation [6], [7], [8], [9]. Comme pour les mesures de benzène, chaque site a été doté de 2 tubes à diffusion afin de pouvoir évaluer la répétabilité de la méthode de mesure. Sur la totalité des doublons installés, l'écart relatif moyen entre 2 tubes est de 7 %. Ceci confirme la bonne répétabilité de cette méthode. Pour l'étude, la moyenne des doublons a donc été utilisée.

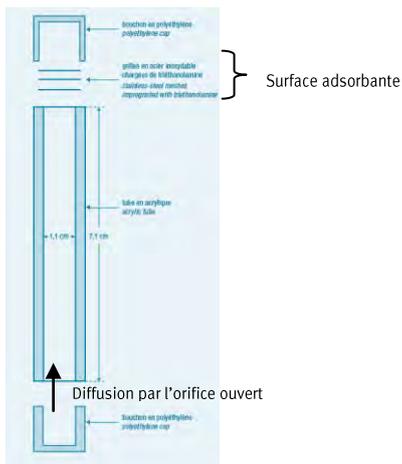


Figure 4 : schéma d'un tube Passam

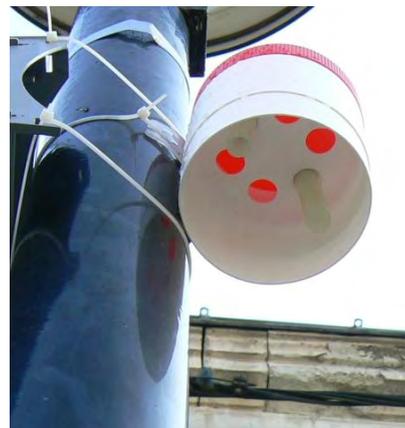


Photo 3 : tubes Passam dans sa boîte de protection

En 2012 sur les sites de la rue Letanduère et du boulevard Foch, les niveaux de NO₂ ont été mesurés à la fois par analyseurs automatiques mais aussi par prélèvement sur tubes passifs. La comparaison des concentrations de NO₂ relevées par ces 2 méthodes montre des surestimations systématiques des niveaux mesurés par les tubes. Les mesures par analyseurs étant considérées comme méthode de référence, cette différence de concentration traduit l'existence d'un biais de mesure sur les prélèvements de NO₂ réalisés sur tube PASSAM. Ce constat a également été fait par d'autres AASQA [12], [13]. Il a été décidé de « corriger » les teneurs en NO₂ mesurées par tubes à diffusion. La méthode utilisée est présentée en annexe 5.

répartition du dispositif sur le terrain

Le boulevard Maréchal Foch: instrumenté d'un laboratoire mobile, les oxydes d'azote, les poussières fines (PM10) et le monoxyde de carbone y sont mesurés. Des mesures de benzène et NO2 (en 2012) par tubes à diffusion passive y ont été également effectuées. La localisation du site a été validée avec Angers Loire Métropole et la ville d'Angers lors d'une visite sur site le 10 octobre 2007. Le laboratoire mobile a été installé à droite du Magasin Eurodif (cf. Photo 4).



Photo 4 : emplacement de la remorque laboratoire au niveau du 23 boulevard Foch

La rue Letanduère : instrumentée également d'une remorque laboratoire contenant des analyseurs automatiques d'oxydes d'azote, de poussières fines (PM10) et de monoxyde de carbone. Ces mesures horaires sont également complétées par des mesures hebdomadaires de benzène et NO₂ (en 2012) par tubes à diffusion passive. Les analyseurs ont été installés au droit du 90 rue Letanduère (localisation validée avec Angers Loire Métropole et la ville d'Angers (Photo 5).



Photo 5 : emplacement de la remorque laboratoire au niveau du 90 rue Letanduère

L'avenue Mendès France à Avrillé : équipée de tubes à diffusion passive mesurant le dioxyde d'azote et le benzène. Le point de mesure utilisé en 2008 et situé au 56 de l'avenue n'existant plus, les tubes à diffusion ont été installés au plus proche, sur un lampadaire au 78 avenue Mendès France.



Photo 6 : emplacement des tubes à diffusion au 78 avenue Mendès France

Les rues de Belgique, du Mail et Chaperonnière ont été pourvues chacune de tubes à diffusion passive mesurant la teneur hebdomadaire en benzène et dioxyde d'azote (cf. photos suivantes) au même emplacement en 2008 et 2012.



Photo 7 : tubes à diffusion dans la rue Chaperonnière



Photo 8 : tubes à diffusion passive dans la rue du Mail



Photo 9 : tubes à diffusion passive dans la rue de Belgique

la période de mesure

La campagne d'étude de 2012 s'est déroulée du 26 avril au 24 mai. Durant cette période, les analyseurs automatiques situés boulevard Foch et rue Letanduère, ont fonctionné en continu. Pour ce qui est des prélèvements sur tubes à diffusion, 4 séquences d'échantillonnage ont été effectuées (cf. tableau suivant) :

périodes
du 26 avril au 3 mai
du 3 au 10 mai
du 10 au 16 mai
du 16 au 24 mai

Tableau 2 : séquences de prélèvement sur tubes à diffusion

récapitulatif des mesures

Site de mesure	Polluants mesurés	Appareillage mis en œuvre	Périodes de mesure
Boulevard Maréchal Foch	NOx, PM10, CO, NO2, benzène	Laboratoire mobile Tubes à diffusion passive	30/04/ au 31/05/12 26/04 au 24/05/12
Rue Letanduère	NOx, PM10, CO, NO2, benzène	Analyseurs automatiques Tubes à diffusion passive	30/04/ au 31/05/12 26/04 au 24/05/12
Avenue Mendès France (Avrillé)	NO2, benzène	Tubes à diffusion passive	26/04 au 24/05/12
rue Chaperonnière	NO2, benzène	Tubes à diffusion passive	26/04 au 24/05/12
rue du Mail	NO2, benzène	Tubes à diffusion passive	26/04 au 24/05/12
rue de Belgique	NO2, benzène	Tubes à diffusion passive	26/04 au 24/05/12

Tableau 3 : dispositif mis en place

les résultats de la campagne de mesure 2012

conditions météorologiques durant la campagne 2012

Selon Météo France, la répartition des précipitations sur le mois de mai a été assez hétérogène. Après une fin d'avril très pluvieuse, le début mai est humide avec de fréquentes averses les 1, 3 et 4. Une perturbation balaie ensuite la région, du 18 au 20, associée à des pluies importantes.

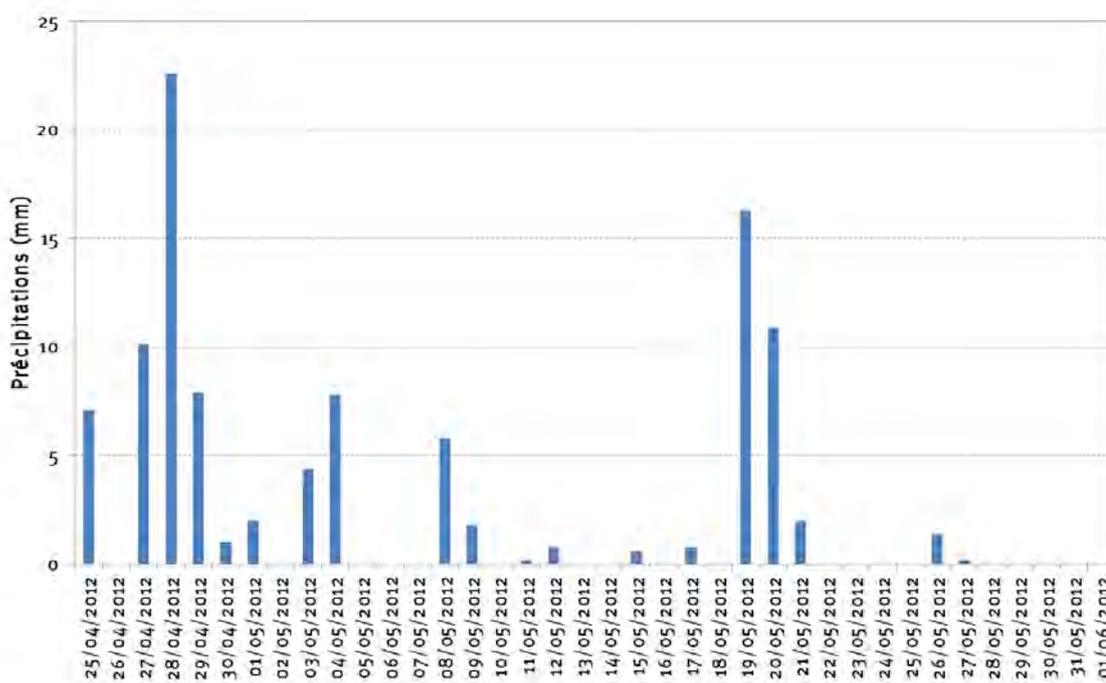


Figure 5 : précipitations enregistrées par la station Météo France de Beaucouzé entre le 25 et le 1 juin 2012 (source Météo France)

Au cours du mois de mai, les températures varient de 9 à 23°C. Les 1^{ère} et 2^{nde} décades sont fraîches avec des températures minimales de 3°C atteintes entre le 14 et le 16. La dernière décade est par contre plus chaude avec une remontée des températures jusqu'à 22 °C le 25 mai.

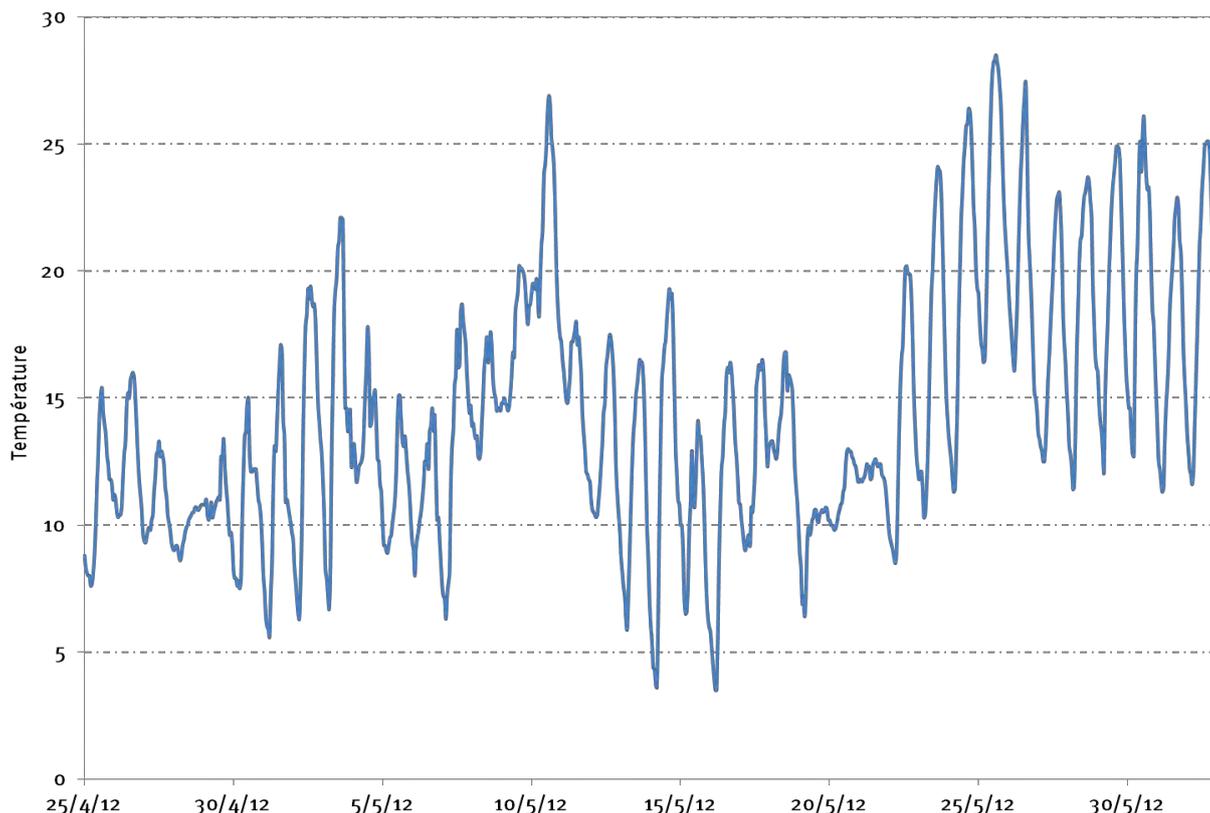


Figure 6 : évolution des températures horaires enregistrées par la station Météo France de Beaucouzé entre le 25 et le 1 juin 2012 (source Météo France)

Par ailleurs, l'ensoleillement a été plus généreux en fin de mois sur la région. Les vents ont soufflé principalement du nord-ouest.

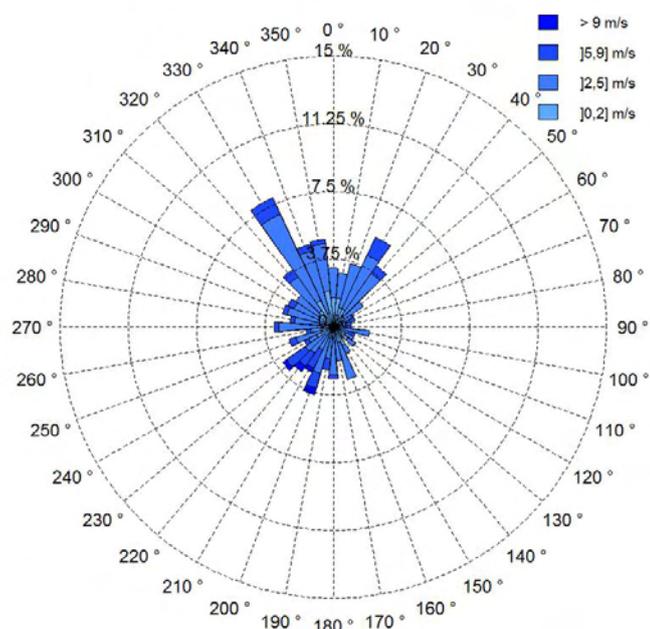


Figure 7 : rose des vents enregistrée à la station Météo France de Beaucouzé du 26 avril au 31 mai 2012

les niveaux de benzène

concentrations relevées en 2012

Le graphique suivant présente les niveaux hebdomadaires en benzène, prélevés sur les tubes passifs sur les 6 axes sélectionnés, durant les 4 séquences d'étude. Les concentrations enregistrées par tubes passifs sur le site urbain du Musée des Beaux-Arts figurent également sur le graphique, à titre comparatif.

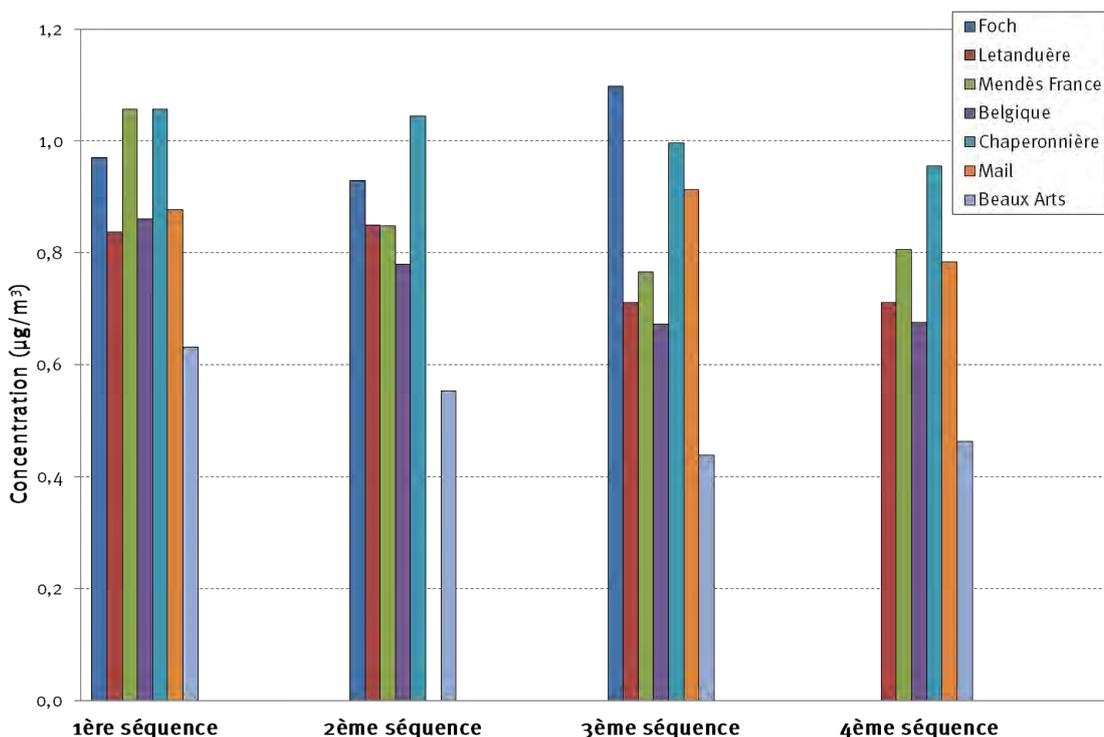


Figure 8 : concentrations hebdomadaires en benzène mesurées du 26 avril au 24 mai 2012

Les 6 sites se répartissent selon 2 gammes de concentrations :

- les sites du boulevard Foch, de l'avenue Mendès France, et des rues Chaperonnière et du Mail présentent des concentrations moyennes comprises entre 0,9 et 1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
- les sites des rues Letanduère, de Belgique, avec des teneurs moyennes plus faibles respectivement de 0,8 et 0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour comparaison, la concentration moyenne en benzène relevée sur le site urbain des Beaux-Arts est de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A titre indicatif, les valeurs enregistrées en 2012 restent près de 2 fois inférieures à l'objectif de qualité fixé à 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle. Les risques de dépassement de la valeur limite fixée à 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle restent donc très faibles.

comparaison 2008/2012

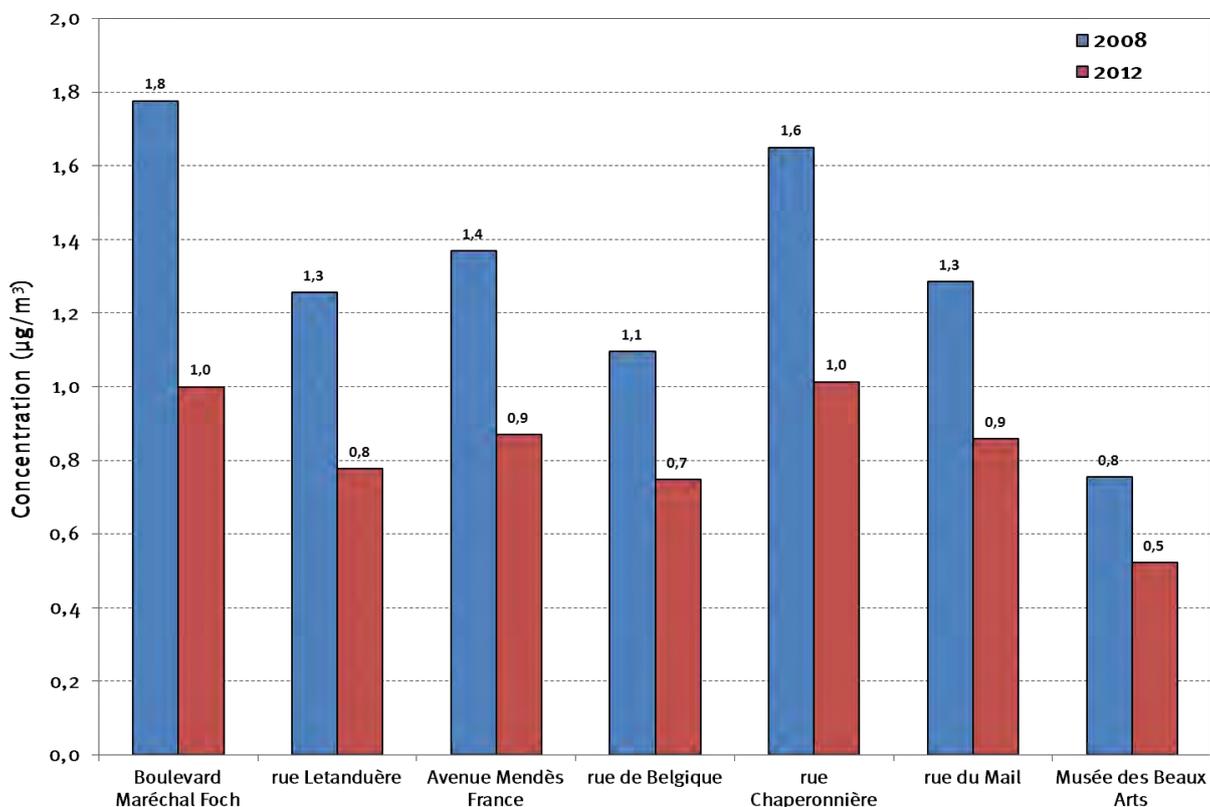


Figure 9 : comparaison des niveaux moyens de benzène enregistrés avant et après la mise en place de la ligne de tramway

On note une diminution des niveaux de benzène sur tous les sites de trafic étudiés.

C'est sur le site du boulevard Foch qu'est enregistrée la plus forte baisse (44%). Dans les rues Letanduère et Mendès France, on relève une diminution de 36 à 38% des concentrations de benzène.

A noter qu'une baisse globale des niveaux de benzène est mesurée depuis 2000 suite aux progrès réalisés dans la motorisation et l'amélioration des carburants (cf. Figure 10).

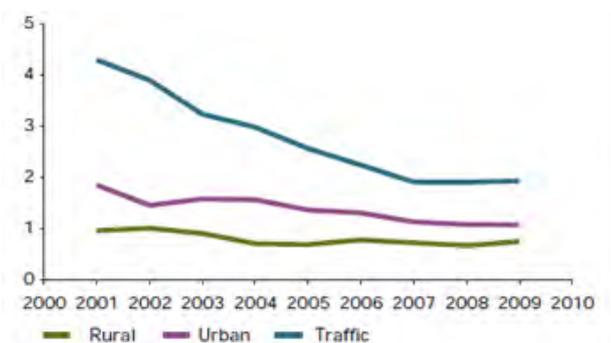


Figure 10 : concentrations moyennes annuelles en benzène en Europe de 1999 à 2009 (source Agency, European Environment. Air quality in Europe – 2011 report. 2011).

les niveaux de dioxyde d'azote

concentrations relevées en 2012

Les résultats des 6 sites de mesure durant les 4 séquences de prélèvement, sont représentés sur l'histogramme de la Figure 11.

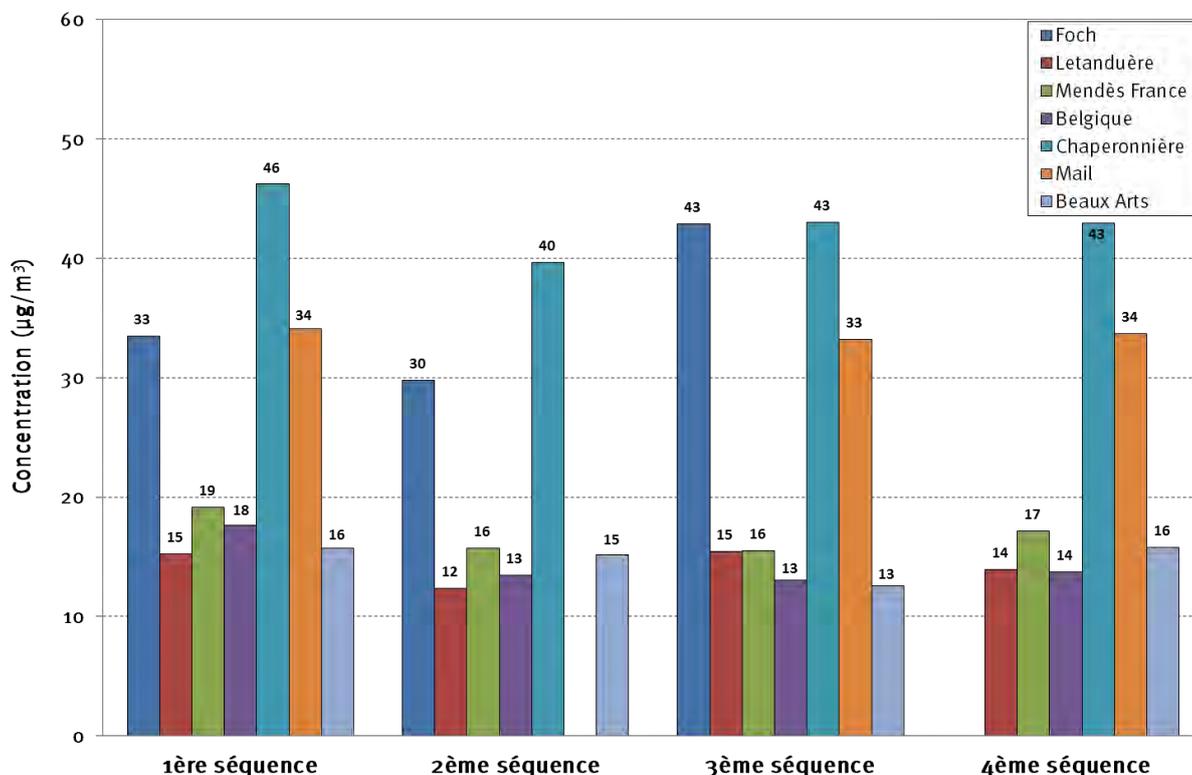


Figure 11 : concentrations hebdomadaires en NO₂ corrigées, mesurées par tubes à diffusion passive, du 26 avril au 24 mai 2012

Remarque : les mesures de NO₂ sur le site de Foch lors de la 4^{ème} séquence ne sont pas disponibles pour cause de vandalisme sur les tubes passifs.

Remarque : seules les concentrations relevées sur les sites de trafic ont été corrigées. Les teneurs mesurées sur le site urbain des Beaux-Arts à Angers, n'ont donc pas été modifiées (cf. annexe).

Au cours des 4 semaines de prélèvement, les niveaux sur chacun des sites ont peu évolué. On note une légère diminution des concentrations lors de la 2^{ème} séquence, pouvant correspondre à une baisse du trafic due au pont du 8 mai.

La rue de la Chaperonnière est l'axe pour lequel les concentrations en NO₂ sont les plus élevées, sur les 4 séquences d'échantillonnage, avec une moyenne de 43 µg/m³, soit des niveaux près de 3 fois plus élevés que les teneurs enregistrées sur le site urbain des Beaux-Arts (15 µg/m³). Le boulevard Foch et la rue du Mail ont des niveaux moyens en NO₂ comparables, respectivement de 35 et 34 µg/m³.

Enfin les rue de Letandière et de Belgique ainsi que l'avenue Mendès France ont des niveaux comparables avec des moyennes comprises entre 14 et 17 µg/m³. Sur ces 3 axes, les niveaux sont du même ordre de grandeur que le niveau de fond (Beaux-Arts).

Sur les graphiques suivants sont présentés l'évolution des moyennes journalières et des maxima horaires journaliers mesurés sur les sites du boulevard Foch et de la rue Letandière à l'aide des analyseurs automatiques. A titre de comparaison, figurent également les concentrations mesurées sur les sites de trafic cours de la résistance (Vieux Saint Louis) à Laval et de Victor Hugo à Nantes ainsi que celles enregistrées sur le site urbain des Beaux-Arts.

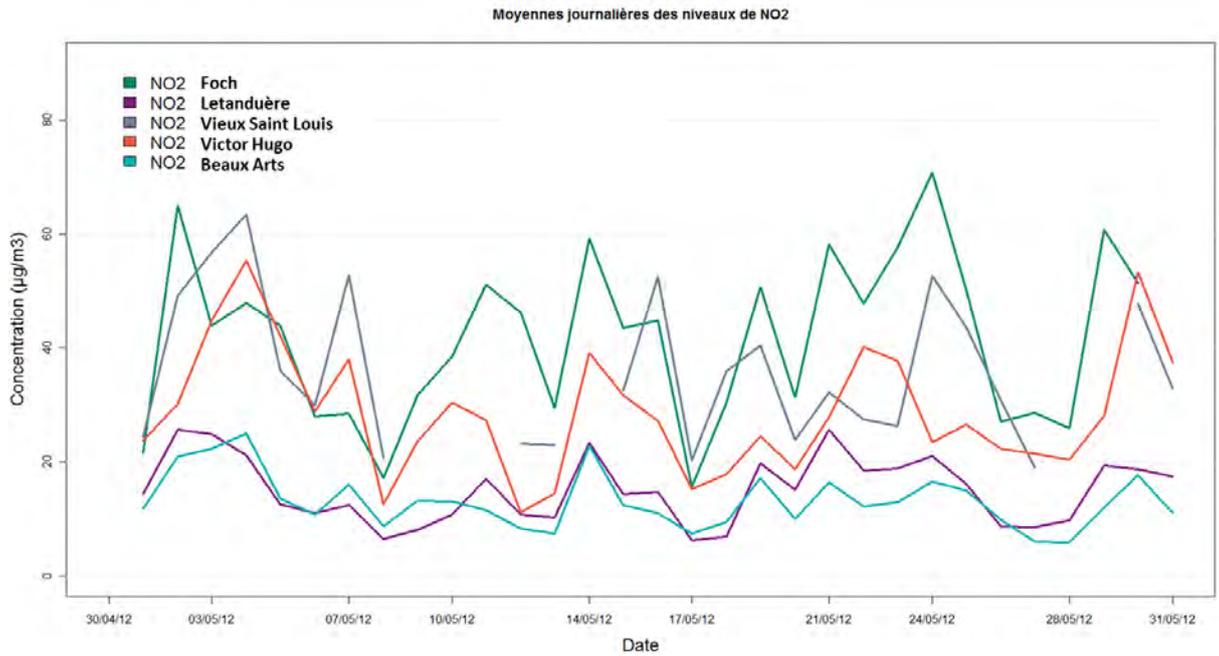


Figure 12 : moyennes journalières en NO₂ du 30 avril au 31 mai 2012

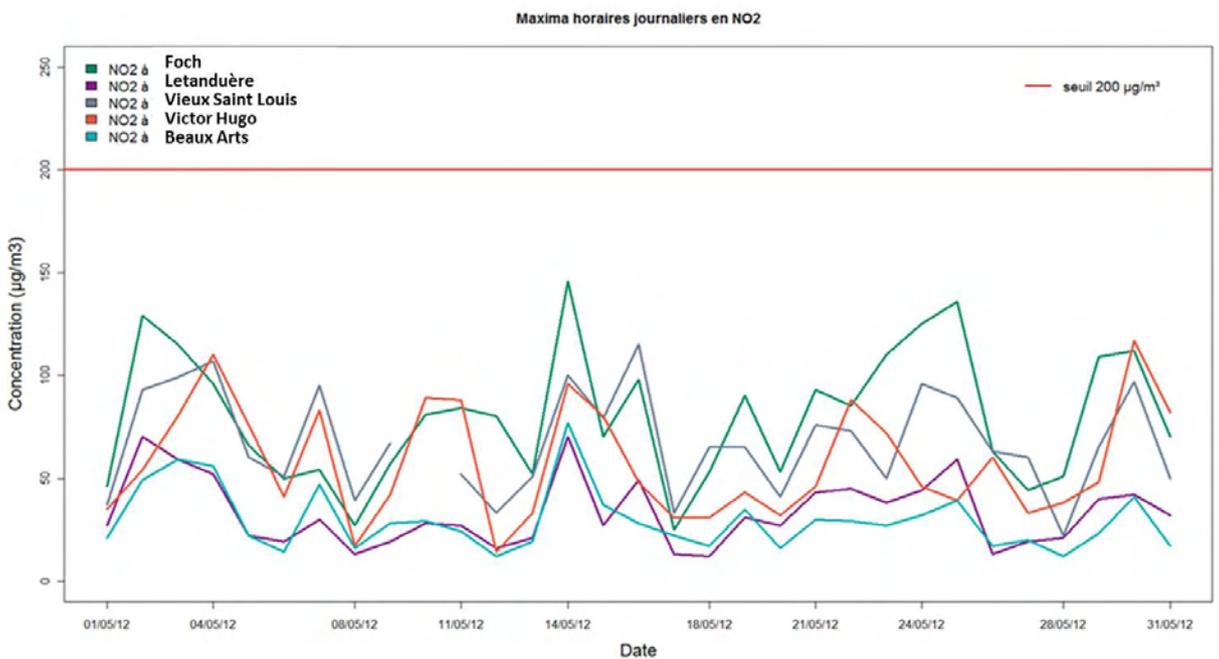


Figure 13 : maxima horaires journaliers en NO₂ du 30 avril au 31 mai 2012

Les niveaux les plus élevés sont enregistrés boulevard Foch et sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés sur le site de trafic du cours de la résistance (Vieux Saint Louis). Il est à noter que la valeur limite fixée à 40 µg/m³ en moyenne sur l'année a été dépassée en 2011 respectivement sur les sites du cours de la résistance à Laval et boulevard Victor Hugo à Nantes.

On note une diminution des concentrations journalières en NO₂ entre le 3 et le 10 mai, correspondant à la baisse du trafic lors du pont du 8 mai.

Les moyennes journalières sur le boulevard Foch sont plus de 2 fois supérieures à celles de la rue Letanduère et suivent l'évolution des concentrations enregistrées à Nantes sur le site de Victor-Hugo. Les niveaux relevés sur le site de Létanduère restent faibles et comparables aux teneurs enregistrées sur un site urbain.

Aucun dépassement du seuil d'information de la population n'a été relevé lors de la période de mesure. Les concentrations horaires maximales enregistrées sur le boulevard Foch et la rue Létanduère sont respectivement de 146 et 70 µg/m³.

évolution des niveaux de NO₂ entre 2008 et 2012 comparaison des données brutes entre 2008 et 2012

Afin de comparer les niveaux enregistrés en 2008 et 2012, les concentrations de NO₂ prélevées sur tubes en 2008 ont été elles aussi corrigées selon la méthode présentée en annexe 5.

Les graphiques ci-dessous présentent les moyennes de 2008 et de 2012 ainsi que l'évolution des profils journaliers en NO₂.

Remarque : en 2008, les mesures de trafic dans la rue du Mail, n'ont pas été réalisées au même endroit que la pose des tubes passifs. Les données de TMJA de 2008 n'ont donc pas été prises en compte dans la procédure de correction des concentrations de NO₂.

Remarque : en 2008, il n'y avait pas eu de tubes passifs de poser sur les sites de Foch et Letanduère, c'est pourquoi les concentrations moyennes mesurées par analyseur automatique ont été reportées sur le graphique de la Figure 14.

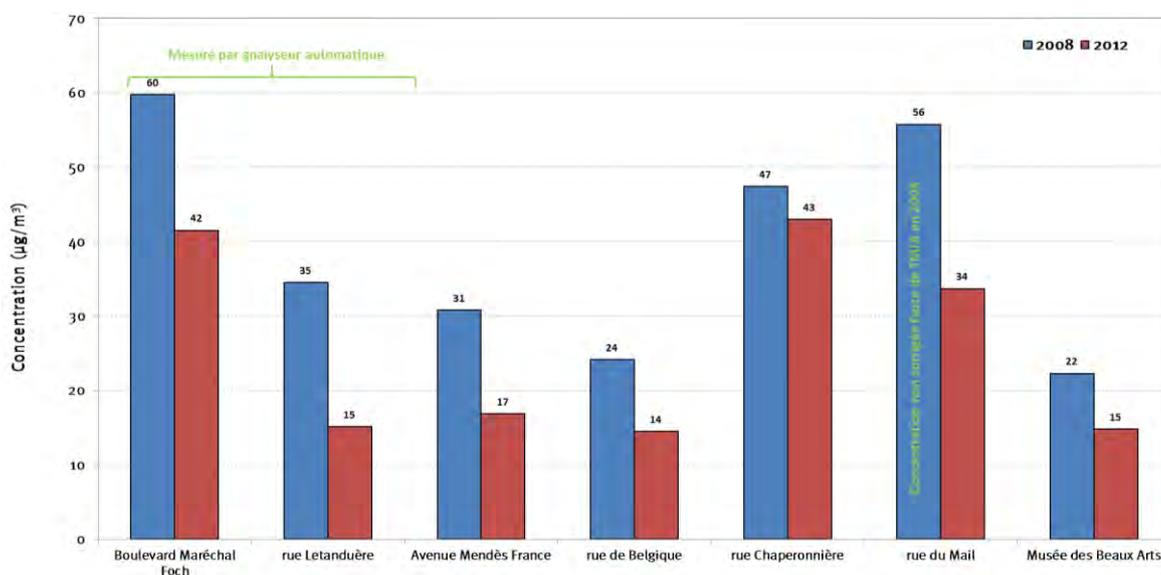


Figure 14 : comparaison des niveaux moyens de NO₂ enregistrés avant et après la mise en place de la ligne de tramway

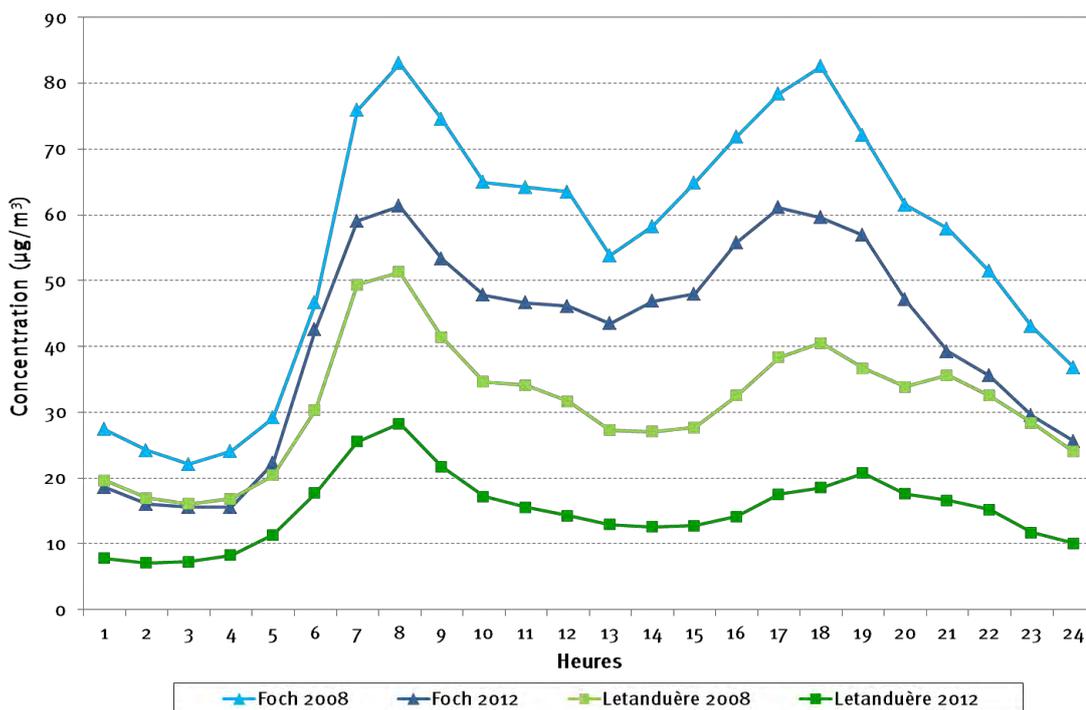


Figure 15 : comparaison des profils journaliers en NO2 sur le boulevard Foch et la rue Letanduère, entre 2008 et 2012

Comme pour les concentrations de benzène, nous constatons une diminution des niveaux de NO2 sur l'ensemble des sites de trafic étudiés entre 2008 et 2012. Les plus fortes baisses sont enregistrées sur les sites de Foch (- 41%), Letanduère (-59%) et Mendès France (-45%). Dans le rue de Belgique et du Mail, la baisse enregistrée est comprise entre 27 et 40%. A l'inverse, les niveaux de NO2 sur le site de Chaperonnière évoluent peu avec une diminution de l'ordre de 9 %.

	Diminution du TMJA 2008 – 2012 (%)	Diminution des niveaux de NO2 2008 – 2012 (%)
Boulevard Foch	- 33 %	-40,8 %
Rue Letanduère	-76 %	-58,7 %
Avenue Mendès France	-57 %	-45,2 %
Rue de Belgique	-32 %	-40,0 %
Rue Chaperonnière	-0,6 %	-9,4 %
Rue du Mail	-	-27,4 %

Tableau 4 : pourcentage de diminution des TMJA et des niveaux NO2 entre 2008 et 2012

Comme exposé dans le Tableau 4 précédent, la diminution des concentrations de NO2 est corrélée avec la baisse du trafic. La plus forte baisse du trafic est enregistrée pour la rue Letanduère : cette voie est en effet aujourd'hui essentiellement empruntée par les riverains. Si la part de la diminution du trafic est importante, cette diminution des niveaux de NO2 pourrait également être à relier à l'évolution du parc automobile.

comparaison statistique des concentrations entre 2008 et 2012

Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par une étude statistique dont le but est d'évaluer la significativité de la baisse des teneurs de NO₂ enregistrée et de comparer la distribution des 2 séries de données.

Ces tests nécessitant un nombre de données important pour être réalisables, seules les mesures effectuées par analyseur automatique sur les sites de Foch et Létanduère en 2008 et 2012 ont été utilisées.

La pollution mesurée sur un site de trafic peut être considérée comme la pollution d'origine locale due au trafic de proximité additionnée de la contribution de la pollution de fond (cf. Figure 16).

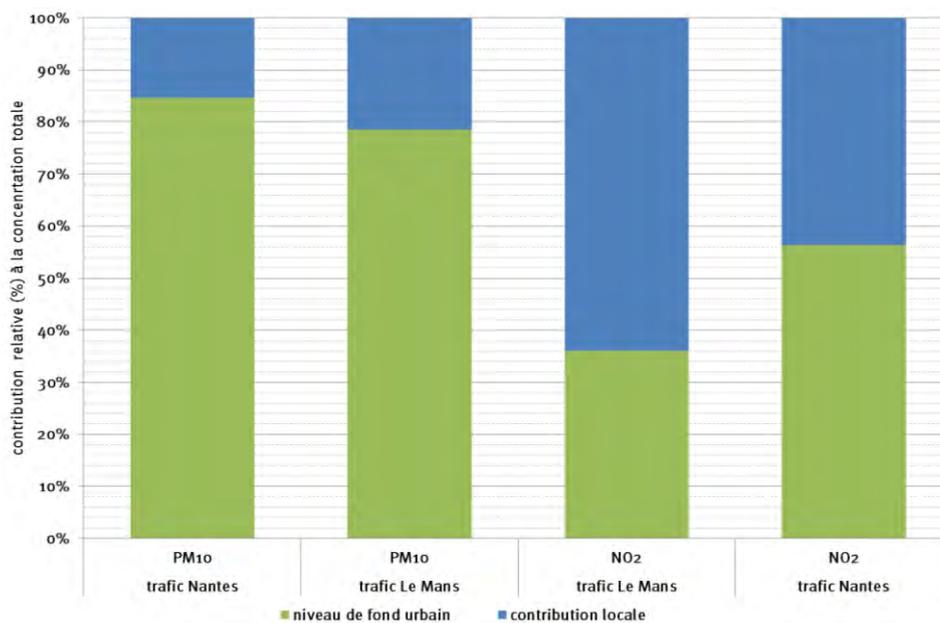


Figure 16 : contribution de la pollution locale et la pollution de fond à la pollution mesurée sur les sites de trafic de Nantes et du Mans

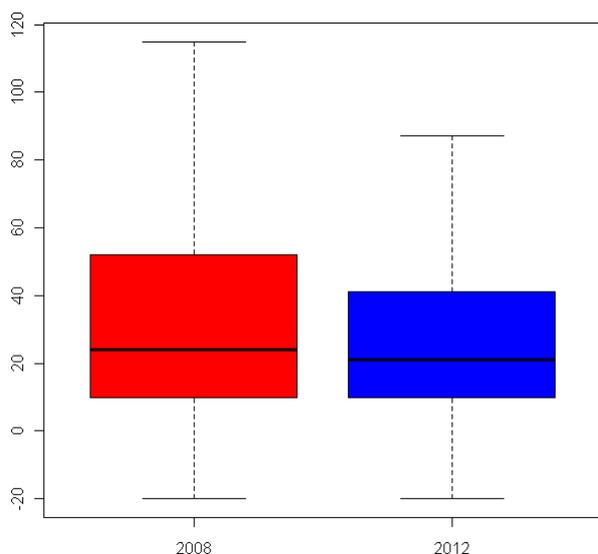
Afin d'évaluer l'évolution de la contribution locale liée au trafic dans la rue et de s'affranchir d'une éventuelle évolution du niveau de pollution de fond, les tests statistiques n'ont pas été réalisés sur les concentrations brutes mais sur les différences entre les niveaux relevés sur le site de mesure et le site urbain des Beaux-Arts (qui sert de site de fond). Par exemple, dans le cas de l'avenue Foch, c'est la significativité de la différence entre

$$A: [NO_2_{\text{Foch}} - NO_2_{\text{Beaux Arts}}]_{2008} \text{ et } B: [NO_2_{\text{Foch}} - NO_2_{\text{Beaux Arts}}]_{2012}$$

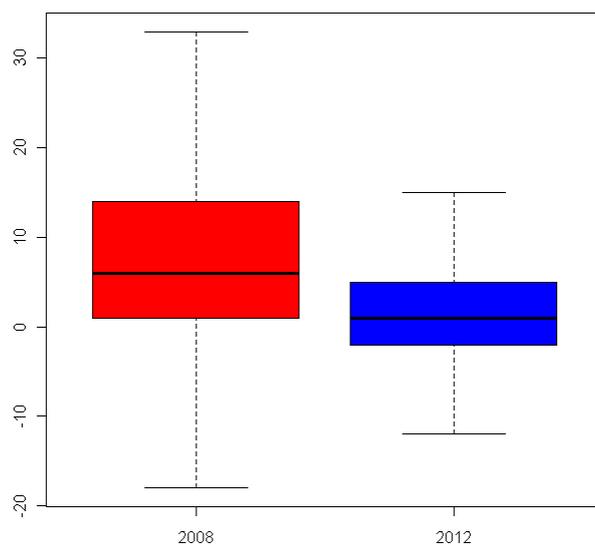
qui a été évaluée.

Le test statistique de Student ou t-test, a été utilisé. Il permet de comparer statistiquement les moyennes 2008 et 2012 des écarts $[NO_2_{\text{Foch}} - NO_2_{\text{Beaux Arts}}]$. Un exemple de résultats et d'interprétation du t-test est présenté en annexe 5.

D'après les résultats de ce test, les diminutions des niveaux de NO₂ liées relevées aussi bien sur le site de Foch que sur celui de Letanduère, entre 2008 et 2012 sont statistiquement significatives. Deux autres tests statistiques ont été réalisés (test de Kolmogorov-Smirnov sur la distribution et test du Chi² sur les écarts types) et confirment la significativité des différences entre 2008 et 2012. Les figures suivantes illustrent ces différences :



Box Plots des écarts de concentrations de NO₂ entre Foch et le site urbain des Beaux-Arts, en 2008 et 2012



Box Plots des écarts de concentrations de NO₂ entre Letanduère et le site urbain des Beaux-Arts, en 2008 et 2012

Tableau 5 : box plots des écarts de concentration de NO₂ [Site de trafic-Site urbain] en 2008 et 2012

On note, aussi bien sur le site de Foch que sur celui de Letanduère, un rétrécissement de 2008 à 2012 de l'étendue des données vers des concentrations en NO₂ plus proches des niveaux enregistrés sur un site urbain. Ces représentations statistiques montrent d'ailleurs que la diminution des concentrations moyennes et des niveaux de pointe est plus importante sur le site de Letanduère, ce qui rejoint les 1^{ers} résultats (cf. Tableau 4) et qui concorde avec l'importante baisse du trafic enregistré sur cet axe.

les niveaux de monoxyde de carbone

concentrations relevées en 2012

Les évolutions temporelles des moyennes journalières et des maxima horaires journaliers de CO mesurées sur les sites de Foch et de Létanduère sont présentées sur les deux graphiques ci-dessous. A titre de comparaison les mesures enregistrées sur le site de trafic nantais de Victor-Hugo ont été également rajoutées.

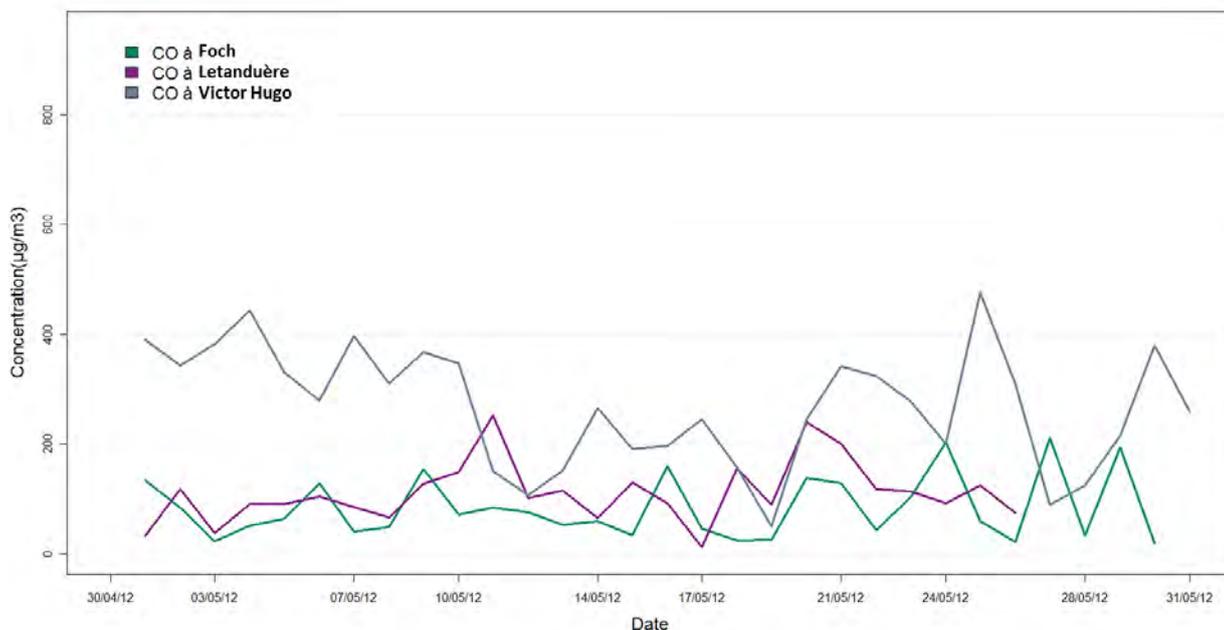


Figure 17 : moyennes journalières en CO du 30 avril au 31 mai 2012

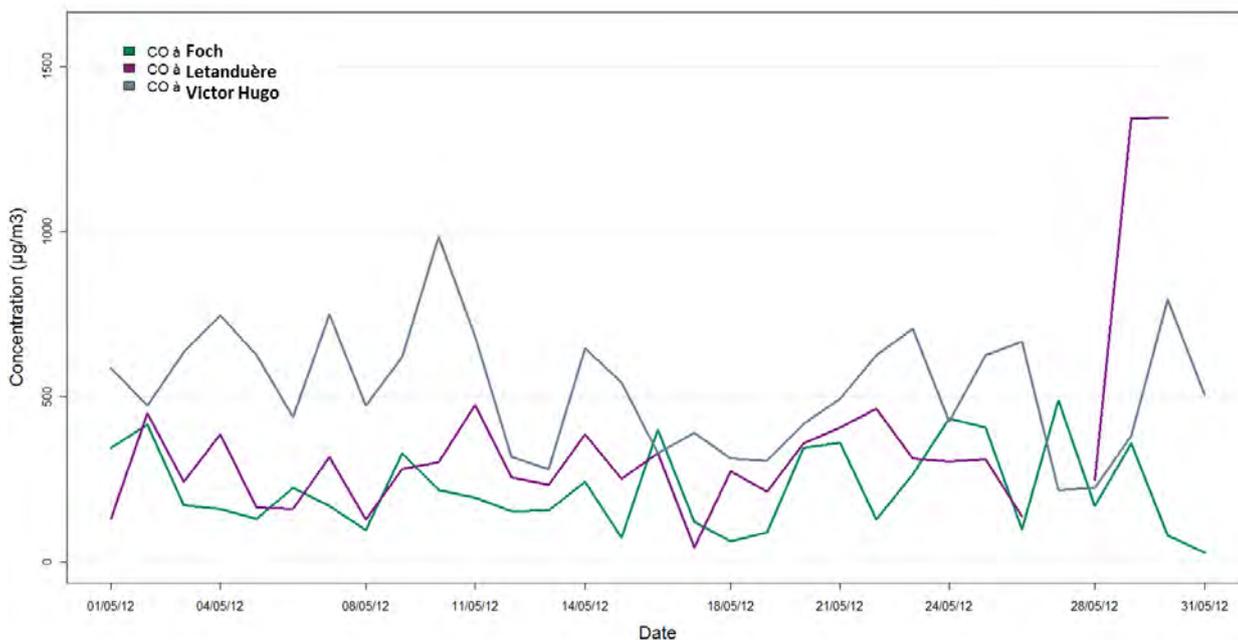


Figure 18 : maxims horaires journaliers en CO, du 30 avril au 31 mai 2012

D'après ces graphiques, les niveaux enregistrés à Foch et Létanduère restent faibles avec des concentrations inférieures à $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En moyenne sur la période de mesure, les teneurs en CO sont entre 2 et 3 fois plus élevés sur le site de Victor-Hugo que sur Foch et Létanduère. La valeur limite de $10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur huit heures a été largement respectée. En effet la valeur 8-horaire maximale est de $1191 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (site de Létanduère), soit plus de 8 fois plus faible que la valeur limite.

évolution des niveaux de CO entre 2008 et 2012

comparaison des données brutes entre 2008 et 2012

Le tableau suivant résume les concentrations moyennes et les maxima horaires journaliers les plus élevés, enregistrés en 2008 et 2012 sur les sites de Foch et Létanduère.

	Concentration journalière moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Maximas horaire journalier ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	2008	2012	2008	2012
Boulevard Foch	483	83	1526	489
Rue Letanduère	341	134	1296	1344
Rue Victor Hugo (Nantes)	424	269	2529	983

Tableau 6 : comparaison des niveaux de CO mesurés en 2008 et 2012

Comme en 2008, les niveaux de CO mesurés en 2012 restent faibles sur les 2 rues étudiées. De fortes baisses sont enregistrées sur le boulevard Foch (-80 %) et la rue Letanduère (- 60 %). Les maxima horaires sont également plus bas en 2012 excepté sur le site de Letanduère où une concentration de plus de 1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été mesurée le 30 mai 2012 à 6h. Ces résultats rejoignent les conclusions tirées des comparaisons de concentrations de NO₂.

Si ces baisses des concentrations de CO peuvent s'expliquer par la diminution du trafic, elles peuvent également être liées à la baisse généralisée observée pour ce polluant (cf. Figure 19) et due la modernisation du parc automobile.

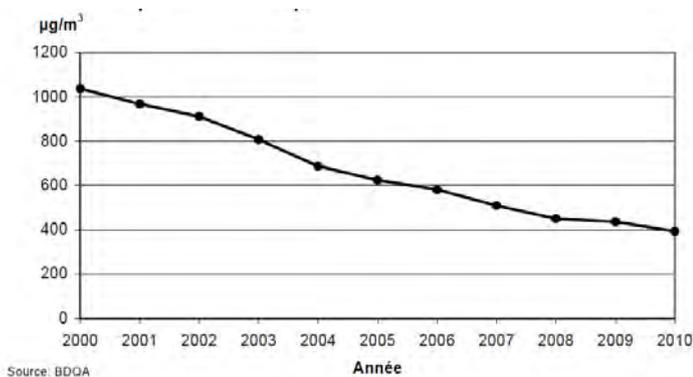
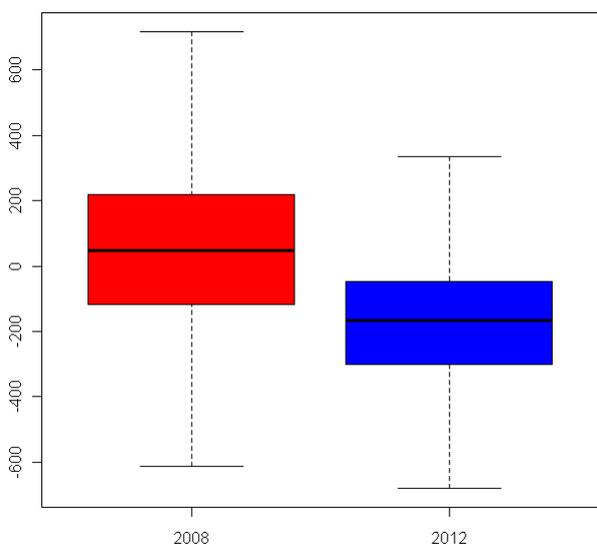


Figure 19 : évolution des concentrations de CO enregistrées sur les sites de trafic en France depuis 2000

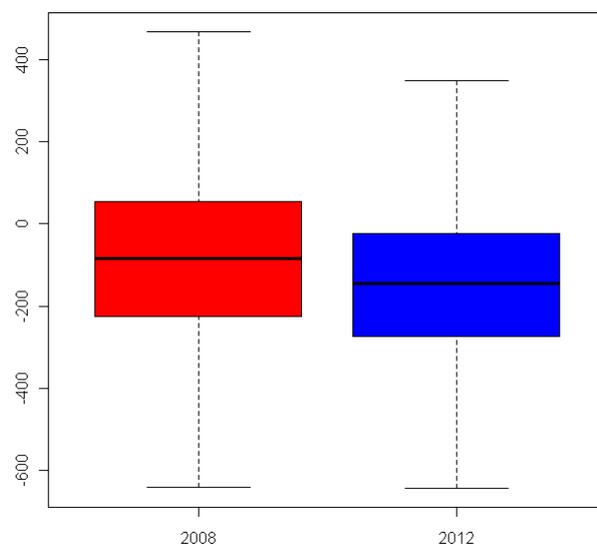
comparaison statistique des concentrations entre 2008 et 2012

Les mesures de CO étant réalisés uniquement en situation de proximité automobile, le site de trafic de Victor Hugo à Nantes a été utilisé comme site de référence afin de tenir compte de la baisse généralisée des teneurs en CO enregistrées au niveau national.

Les tests statistiques dont les résultats sont résumés en annexe 5, montrent que la différence des niveaux mesurés en 2008 et 2012 est statistiquement significative. Les figures suivantes représentent la distribution des écarts de concentrations d'une part entre le site du boulevard Foch et le site de Victor Hugo et d'autre part entre la rue Letanduère et le site Victor Hugo.



Box Plots des écarts de concentrations de CO entre Foch et le site de trafic nantais de Victor-Hugo, en 2008 et 2012



Box Plots des écarts de concentrations de CO entre Letanduère et le site de trafic nantais de Victor-Hugo, en 2008 et 2012

Tableau 7 : box plots des écarts de concentration de CO [Site de trafic-Victor Hugo] en 2008 et 2012

D'après ces box plots, la diminution des niveaux de CO est observable sur les 2 sites de trafic angevins. Ainsi en 2012, les teneurs en CO enregistrées sur le boulevard Foch sont inférieures à celles de Victor Hugo, alors qu'en 2008, leurs concentrations respectives étaient du même ordre de grandeur. La dispersion des mesures est également plus faible en 2012, surtout sur le site de Foch, suggérant des niveaux de pointe également en baisse en 2012.

les niveaux de particules fines

concentrations relevées en 2012

Comme en 2008, des analyses en continu des concentrations de particules fines PM10 ont été réalisées sur les sites de Foch et Letanduère. Les moyennes journalières et les maxima horaires mesurés sur ces 2 sites sont présentés sur les figures suivantes. A titre de comparaison, les mesures effectuées sur les stations fixes des Beaux-Arts et de Victor Hugo figurent également sur les graphiques.

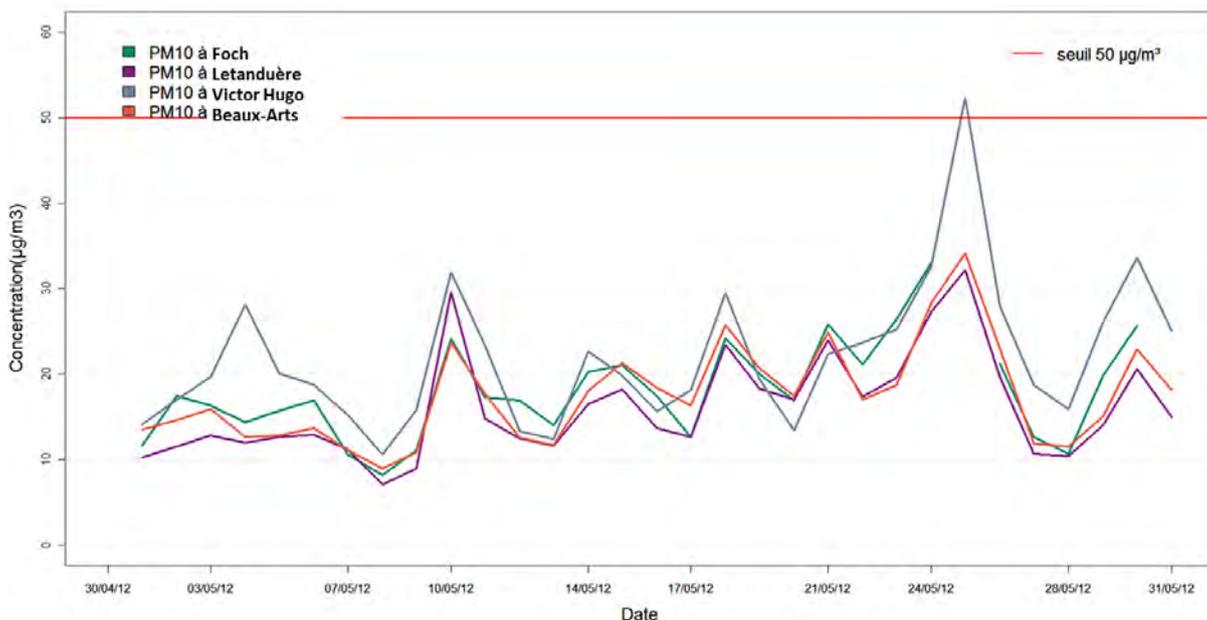


Figure 20 : moyennes journalières en PM10, du 30 avril au 31 mai 2012

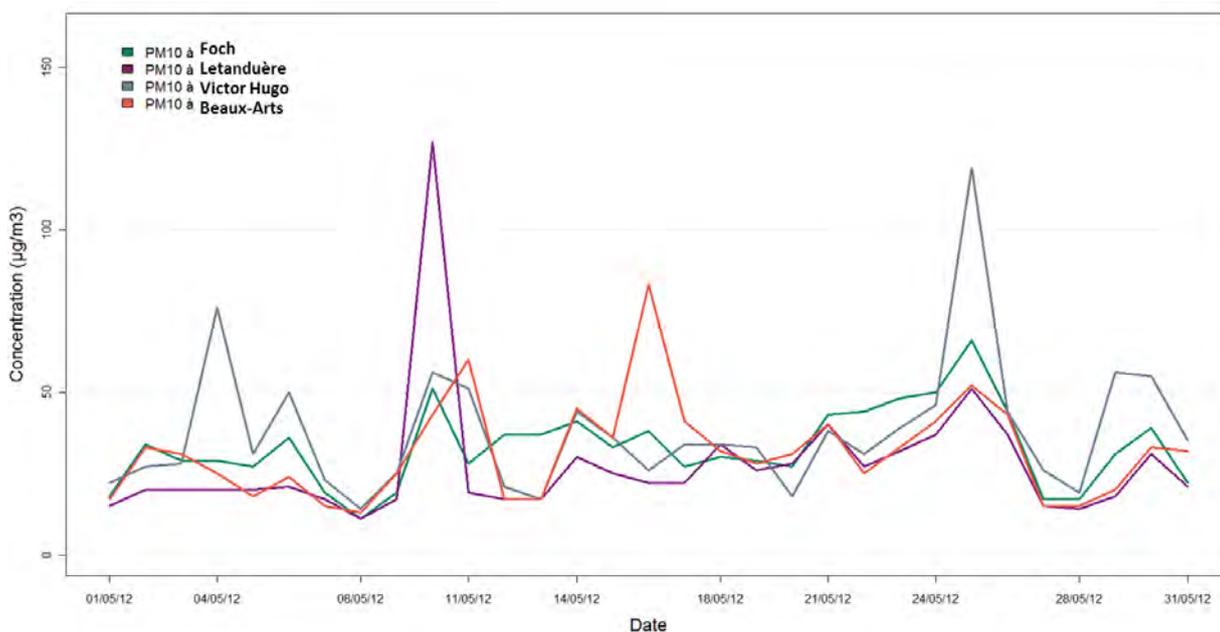


Figure 21 : maximas horaires journaliers en PM10, du 30 avril au 31 mai 2012

En 2012, sur la période d'étude, les niveaux à Foch et Letanduère restent comparables avec des moyennes respectives de 18 et 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les niveaux sur les 2 sites de trafic sont d'ailleurs du même ordre de grandeur que ceux relevés sur le site urbain des Beaux-Arts (17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et inférieurs à ceux mesurés sur le site de trafic de Victor Hugo (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

La valeur limite en moyenne journalière de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a été dépassée sur aucun des sites de trafic d'Angers pendant la campagne. On note toutefois un pic de pollution aux PM10 le 25 mai, sur Foch et Letanduère, avec des maxima horaires respectifs de 66 et 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces pics sont à mettre en relation avec un phénomène de pollution généralisé sur le Nord-Ouest de la France. Le seuil de recommandation et d'information (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne 24-horaire) a été dépassé dans la ville de Saint-Nazaire ce jour-là.

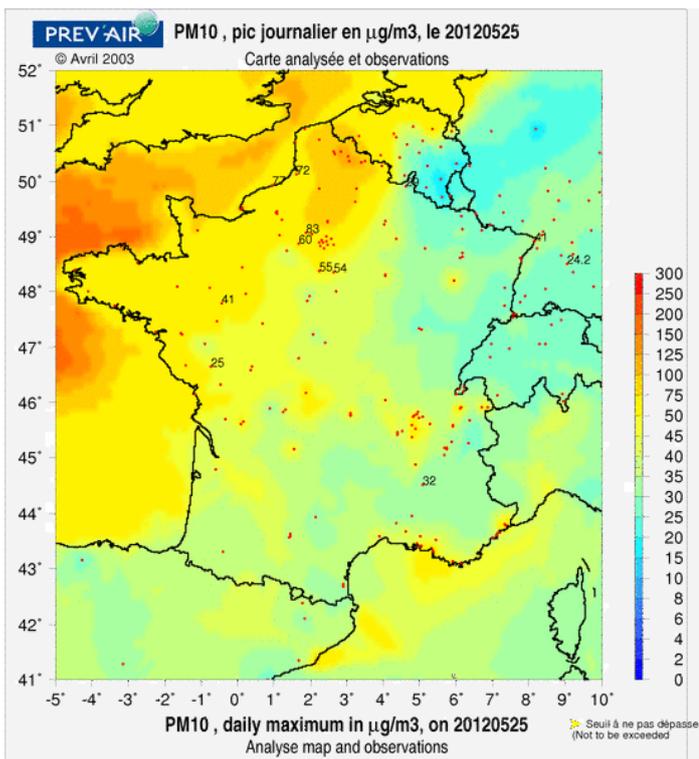


Figure 22 : niveaux des concentrations en PM10 sur la France, le 25 mai 2012

Par ailleurs, une concentration de 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été relevée rue Letanduère le 10 mai. Cette hausse subite des niveaux de particules fines reste très localisée (niveaux en PM10 à Foch de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et aux Beaux-Arts, de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et de très courte durée (entre 11h et 12h), laissant penser à un épisode parasite isolé dans cette rue et dans le temps.

évolution des niveaux de PM10 entre 2008 et 2012 comparaison des données brutes entre 2008 et 2012

	Concentration journalière moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Maximas horaire journalier ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	2008	2012	2008	2012
Boulevard Foch	22	18	80	66
Rue Létanduère	21	16	68	127
Beaux-Arts	16	17	67	83
Rue Victor Hugo (Nantes)	25	22	147	119

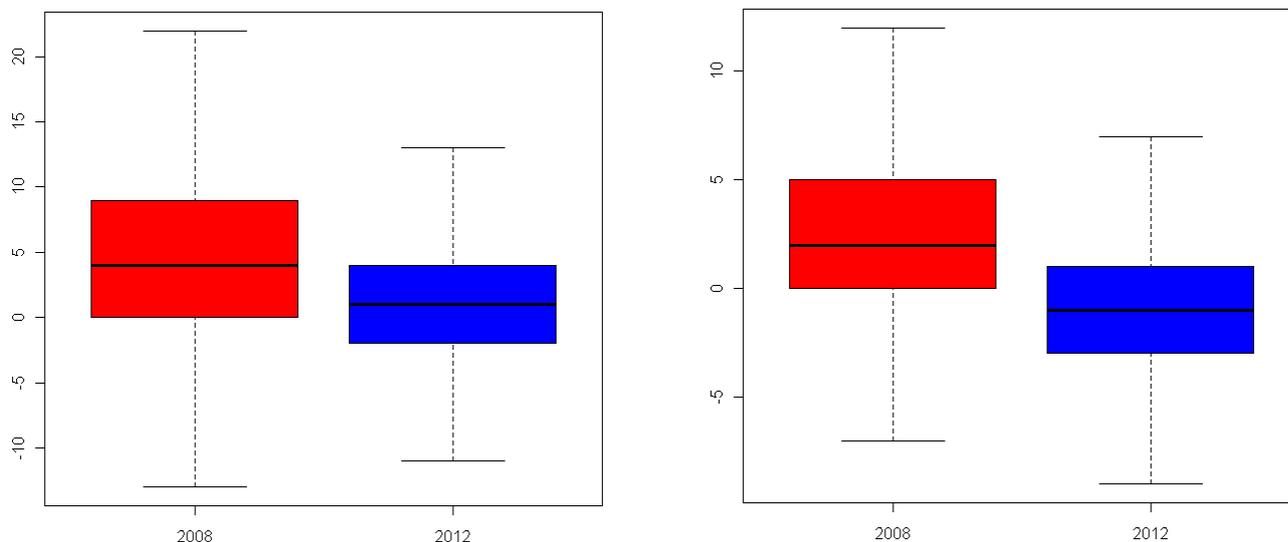
Tableau 8 : comparaison des niveaux de PM10 mesurés en 2008 et 2012

Les niveaux moyens boulevard Foch et rue Letanduère ont diminué de 18 à 24 % entre 2008 et 2012. Cette diminution des niveaux de PM10 est en accord avec la baisse générale de tous les autres polluants mesurés sur les 2 axes étudiés.

comparaison statistique des concentrations entre 2008 et 2012

Les résultats du test de Student montrent que les diminutions de concentration observées entre 2008 et 2012 sont statistiquement significatives (cf. annexe 6).

La représentation en box plot des écarts [Site de trafic- Beaux-Arts] figure ci-dessous :



Box Plots des écarts de concentrations de PM10 entre Foch et le site urbain des Beaux-Arts, en 2008 et 2012

Box Plots des écarts de concentrations de PM10 entre Letanduère et le site urbain des Beaux-Arts, en 2008 et 2012

Tableau 9 : box plots des écarts de concentration de PM10 [Site de trafic-Site urbain] en 2008 et 2012

Les niveaux médians de PM10 sur les sites de trafic de Foch et de Letanduère ont diminué en 2012 pour atteindre des concentrations comparables à celles mesurées sur le site des Beaux-Arts. La dispersion des mesures est également plus faible en 2012, surtout sur le site du boulevard Foch.

En résumé, la comparaison des mesures réalisées en 2008 et 2012 montrent une diminution statistiquement significative de tous les polluants ciblés, Benzène, NO₂, CO et PM₁₀. En parallèle, les données de trafic ont révélé une baisse de la circulation sur la plupart des axes étudiés (cas de la rue du Mail mis à part suite à un problème de comptage du TMJA en 2008).

Cette diminution de la fréquentation peut être un élément expliquant les niveaux plus faibles relevés en 2012, l'influence d'autres paramètres que sont la différence des conditions météorologiques, du parc automobile ou des périodes d'étude entre les 2 campagnes de mesure, peut interférer. Il est donc nécessaire de s'affranchir de ces paramètres pour isoler l'impact qu'a eu la modification des conditions de circulation lié à la mise en place de la ligne de tramway sur les niveaux de polluants.

évaluation de la contribution de « l'effet tramway » sur les niveaux de pollution enregistrés

La comparaison des mesures 2008/2012, présentée dans le chapitre précédent, a montré une diminution statistiquement significative des niveaux des différents polluants ciblés.

Toutefois, les effets des différences de conditions météorologiques, des périodes de mesure, de l'évolution du parc automobile et des conditions de trafic (périodes de vacances, jours fériés) entre les 2 horizons, peuvent interférer avec les effets de la mise en place de la ligne de tramway, rendant plus complexe l'interprétation de la diminution observée.

Afin de s'affranchir des potentiels effets de ces paramètres, une double approche a été réalisée :

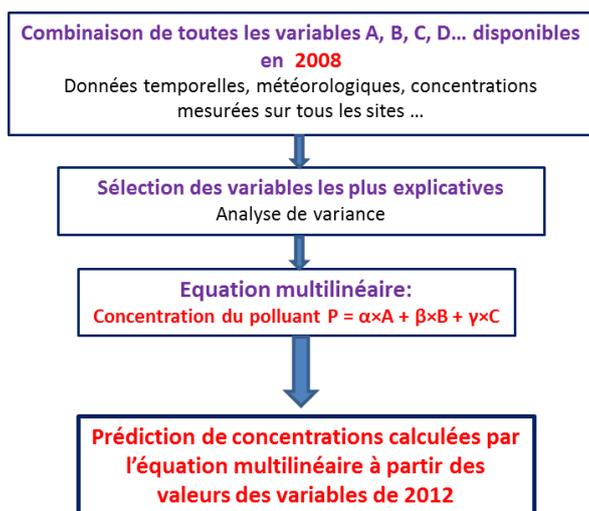
- une première méthode par modélisation statistique,
- une seconde approche par modélisation déterministe.

approche par modélisation statistique

objectif de l'approche statistique

Le but de cette approche est de calculer les concentrations de polluants que nous aurions mesurées en 2012 si la ligne de tramway n'avait pas été mise en place.

Pour cela, dans un 1^{er} temps, un modèle statistique (équation multilinéaire) est construit à partir de variables annexes (données temporelles, directions et vitesses des vents, concentrations mesurées sur tous les sites...) relatives à l'année 2008. Ensuite en actualisant les valeurs des variables annexes pour l'année 2012, l'équation multilinéaire nous permet de calculer des prédictions de concentrations pour l'année 2012. La figure suivante schématise ce raisonnement.



Une fois les prédictions de concentrations calculées, elles sont comparées aux concentrations réellement mesurées en 2012, sur la base de tests statistiques similaires à ceux présentés dans le chapitre précédent. Au final cette comparaison nous permet d'estimer l'impact des modifications de circulation liées à la mise en place de la ligne de tramway sur les niveaux de polluants.

Impact des conditions de circulation sur l'évolution des niveaux de NO₂, CO et PM₁₀

Le Tableau 10 présente les comparaisons des concentrations effectives mesurées en 2012 et les concentrations prédictives calculées à partir du modèle statistique élaboré avec les données de 2008.

La réalisation du t-test a montré, aussi bien que le site de Foch que sur celui de Letanduère, que les différences observées entre les mesures effectives et les concentrations calculées par le modèle de prédiction sont statistiquement significatives.

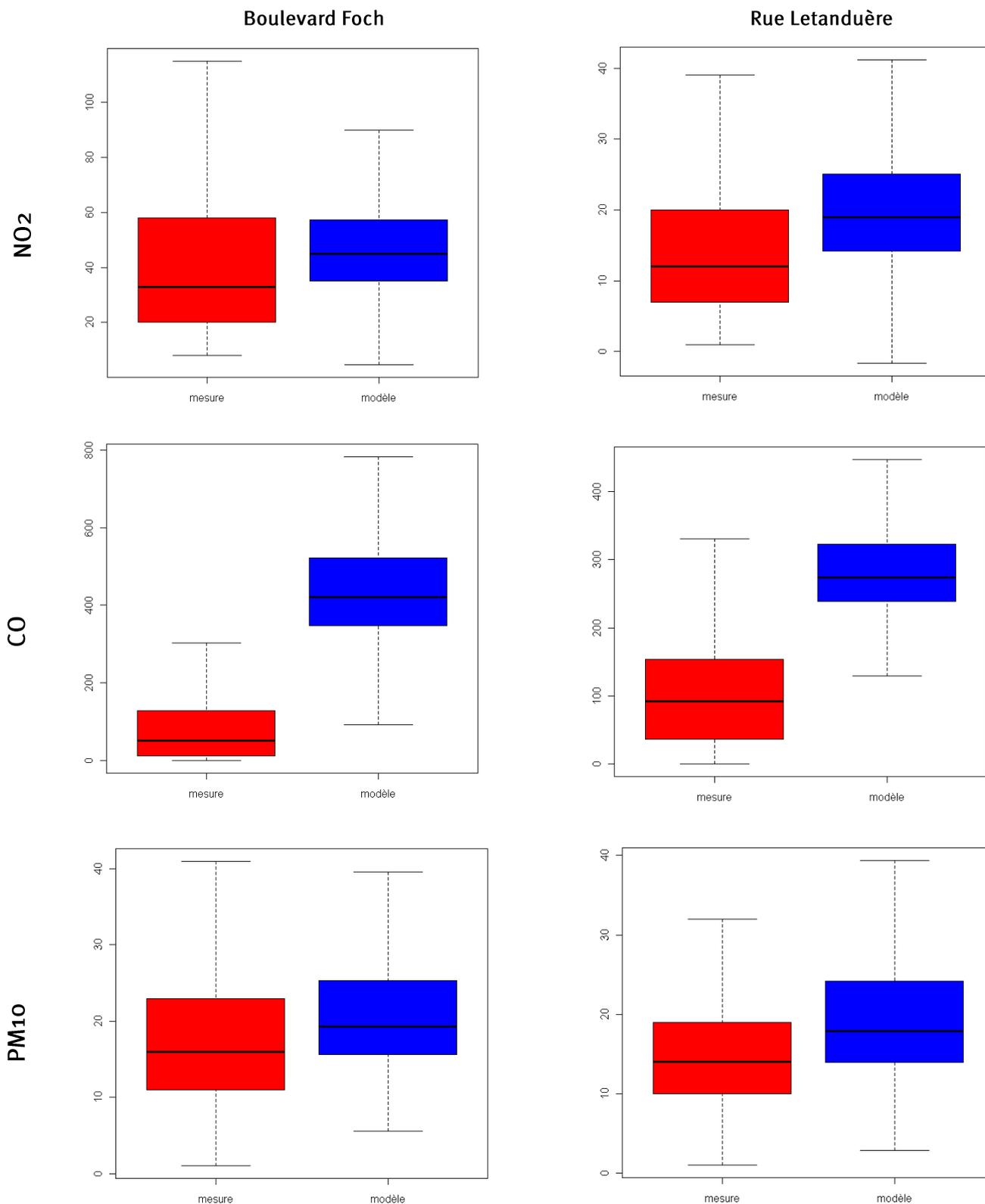


Tableau 10 : comparaison des box plots des concentrations de NO₂, CO et PM₁₀ mesurées en 2012 et calculées, sur les sites de Foch et Letanduère

impact des conditions de circulation sur les concentrations de NO₂

D'après le modèle de prédiction, si les conditions de circulation sur l'avenue Foch avaient été identiques à celles de 2008, le niveau moyen de NO₂ aurait été de 47 µg/m³, avec une valeur médiane à 45 µg/m³. En réalité, en 2012, la concentration moyenne de NO₂ mesurée est de 41 µg/m³ avec pour valeur médiane, 33 µg/m³.

Sur le site de Letanduère, alors que le modèle prédit une concentration moyenne de 21 µg/m³ et une teneur médiane de 19 µg/m³, les niveaux moyens et médians enregistrés sur site sont plus faibles respectivement de 15 et 12 µg/m³.

impact des conditions de circulation sur les concentrations de CO

Les box plots montrent que les concentrations de CO prédites par le modèle sont nettement supérieures à celles enregistrées sur les 2 sites de trafic ciblés. Les concentrations moyennes de CO mesurées sont respectivement 2 et 5 fois plus faibles que les teneurs calculées, sur les sites de Letanduère et de Foch.

impact des conditions de circulation sur les concentrations de PM₁₀

Les niveaux moyens de PM₁₀ calculés par le modèle de prédiction sont entre 16 et 25% plus élevés que les concentrations moyennes relevés sur le terrain en 2012.

En résumé, pour chacun des 3 polluants ciblés, les prédictions calculées par le modèle statistique sont supérieures aux valeurs réellement relevées en 2012. On constate par ailleurs que l'écart entre mesures et prédictions est plus important rue Letanduère : ce résultat est concordant avec la forte diminution du trafic dans cette rue (-76,5%).

En d'autres termes, si entre 2008 et 2012, les conditions de circulation dans les rues Foch et Letanduère n'avaient pas été modifiées, les niveaux de polluants mesurés en 2012, auraient été entre 1,3 et 5 fois plus élevés en fonction du polluant.

approche par modélisation déterministe

objectifs de l'étude de modélisation

Les mesures sur le terrain des concentrations de NO₂, CO et PM₁₀ ont montré une diminution des niveaux de polluants dans les 5 rues ciblées. L'étude par modélisation statistique a confirmé cette diminution des teneurs en polluants entre 2008 et 2012, dans le boulevard Foch et la rue Letanduère, et a permis d'identifier les modifications de trafic comme origine de cette décroissance.

Qu'en est-il sur les autres voies de circulation étudiées ? Par ailleurs, si les modifications de circulation constituent un facteur influent sur les niveaux de NO₂, est-ce plus précisément l'évolution du parc automobile entre 2008 et 2012 ou la mise en place de la ligne de tramway qui permet d'expliquer la diminution des concentrations de polluants ?

L'étude par modélisation déterministe permet de fournir des éléments de réponse à ces deux questions.

présentation du modèle

les rues "canyon"

Une rue "canyon" est bordée de bâtiments élevés et présente de ce fait une configuration encaissée. Elle est caractérisée par le rapport de la hauteur H des bâtiments sur la largeur L de la rue. Le régime d'écoulement de l'air dans la voie dépend de ce rapport. L'annexe 6 décrit en détail ces régimes [15].

le modèle OSPM : un outil adapté au calcul de la pollution dans les rues "canyon"

OSPM (Operational Street Pollution Model) est un logiciel destiné à la modélisation de la pollution atmosphérique dans les rues de configuration canyon. Il s'agit d'un modèle analytique reposant sur l'analyse physique de l'écoulement dans ce type de rue ainsi que des équations décrivant cet écoulement. La pollution totale modélisée résulte de la somme de la pollution de fond et de la pollution émise par les véhicules circulant dans la rue considérée (contribution directe issue des gaz d'échappement et contribution due à la re-circulation de l'air). Une description détaillée des hypothèses de modélisation prises en compte par OSPM est proposée en annexe 7.

Selon le NERI (National Environmental Research Institute – Danemark), OSPM a été testé et validé pour des rapports hauteur/largeur compris entre 0,5 et 2. **Il est donc adapté aux rues sélectionnées dans l'étude.**

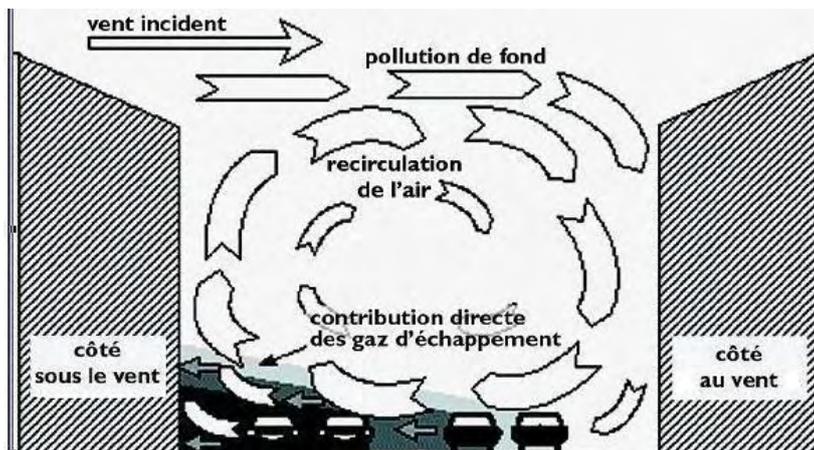


Figure 23 : principe d'entraînement des polluants dans une rue "canyon" par OSPM

les données d'entrée du modèle

OSPM est alimenté en données explicatives de la pollution : pollution ambiante de l'agglomération, météorologie, configuration de la rue et trafic routier.

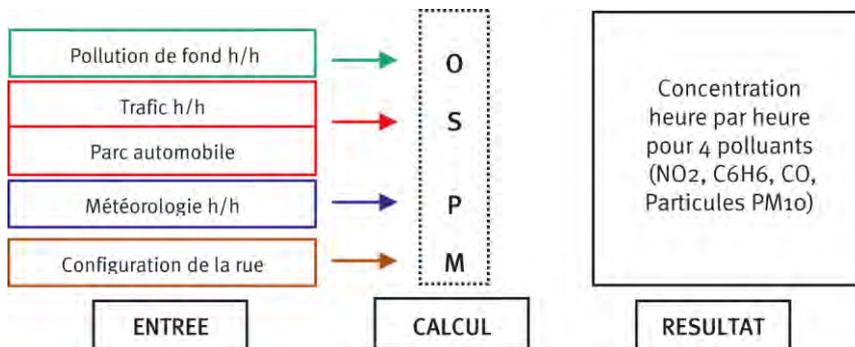


Figure 24 : entrées et sorties du modèle OSPM

Le modèle OSPM fournit en sortie les concentrations horaires en dioxyde d'azote, benzène, monoxyde de carbone et particules fines PM10.

Le NO₂ étant le seul polluant mesuré en commun dans les 5 rues étudiées et également en continu sur les sites urbains, seules ses concentrations ont fait l'objet du travail de modélisation par OSPM.

la configuration du bâti

Le calcul des données géométriques des rues a été réalisé par la Direction du Système d'Information Communautaire d'Angers Loire Métropole selon une procédure détaillée dans l'annexe 8. A l'issue de ce calcul, les paramètres fournis à Air Pays de la Loire sont les suivants :

- largeur moyenne de la rue (L) ;
- hauteur moyenne (H) des bâtiments de chaque côté de la rue ;
- rapport H/L de chaque côté de la rue ;
- orientation de la rue ;
- longueur totale de la rue.

Dans ce travail de modélisation, les configurations des rues étudiées en 2008 et 2012 ont été considérées identiques (pas d'élargissement des voies, ni de destruction du bâti).

résultats de la modélisation OSPM

la nature des résultats

Les concentrations de polluants calculées par OSPM sont données à une hauteur de 2 mètres au centre de la rue, sur le côté où sont installés les appareils de mesure. Du fait de l'intégration de paramètres moyens du bâti en entrée du modèle, la pollution est considérée comme homogène sur un même côté de rue.

l'accord mesure - modèle

La directive 2008/50/CE précise les objectifs de qualité des données modélisées pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant. L'incertitude pour la modélisation est définie comme l'écart maximal des niveaux de concentration mesurés et calculés.

En l'absence d'objectifs de qualité mensuels, ce sont les critères pour les concentrations annuelles, les plus exigeants, qui ont été retenus. Dans le cas du NO₂, polluant étudié dans ce travail de modélisation, un écart maximal de 30% entre les valeurs mesurées et calculées est désigné comme objectif de qualité. L'accord mesure/modèle, en moyenne sur les campagnes de 2008 et 2012, est conforme à cet objectif (cf. annexe 9).

présentation des différents scénarios étudiés

Le Tableau 11 synthétise les données utilisées pour caler les modélisations des concentrations en NO₂ de 2008 et pour construire les différents scénarios permettant l'évaluation de l'influence des 4 paramètres : Météo, Trafic en termes de fréquentation, Parc automobile et Pollution de fond.

La démarche consiste à calculer des niveaux de pollution en faisant varier un seul paramètre puis de les comparer avec la situation de référence de 2008.

	Conditions météorologiques	Trafic-fréquentation	Parc automobile	Pollution de Fond
Calage de la modélisation des concentrations de NO ₂ de 2008 – <u>situation de référence</u>	2008	2008	2008	2008
Calage de la modélisation des concentrations de NO ₂ de 2012	2012	2012	2012	2012
Evaluation de la contribution des conditions météorologiques	2012	2008	2008	2008
Evaluation de la contribution du trafic (TMJA) – « effet tramway »	2008	2012	2008	2008
Evaluation de la contribution de l'évolution du parc automobile	2008	2008	2012	2008
Evaluation de la contribution de la pollution de fond	2008	2008	2008	2012

Tableau 11 : présentation des différents scénarios de modélisation

Les données relatives au parc automobile de 2008 et de 2012 sont issues des données du parc roulant du CITEPA, actualisées tous les ans.

Concernant le paramètre « Pollution de fond », les données de fond sont issues des stations permanentes d'Air Pays de la Loire localisées dans l'agglomération angevine. En 2008 et 2012, ce sont les stations Monplaisir et Beaux-Arts qui ont été utilisées.

contribution des 4 paramètres influents

Le graphique suivant présente la variation relative (%) des concentrations en NO₂ obtenue dans chaque scénario par rapport au niveau de référence de 2008. Une variation négative se traduit par une diminution du niveau de NO₂ par rapport à la situation de référence de 2008. A contrario une variation positive se traduit par une augmentation par rapport à la situation de référence 2008.

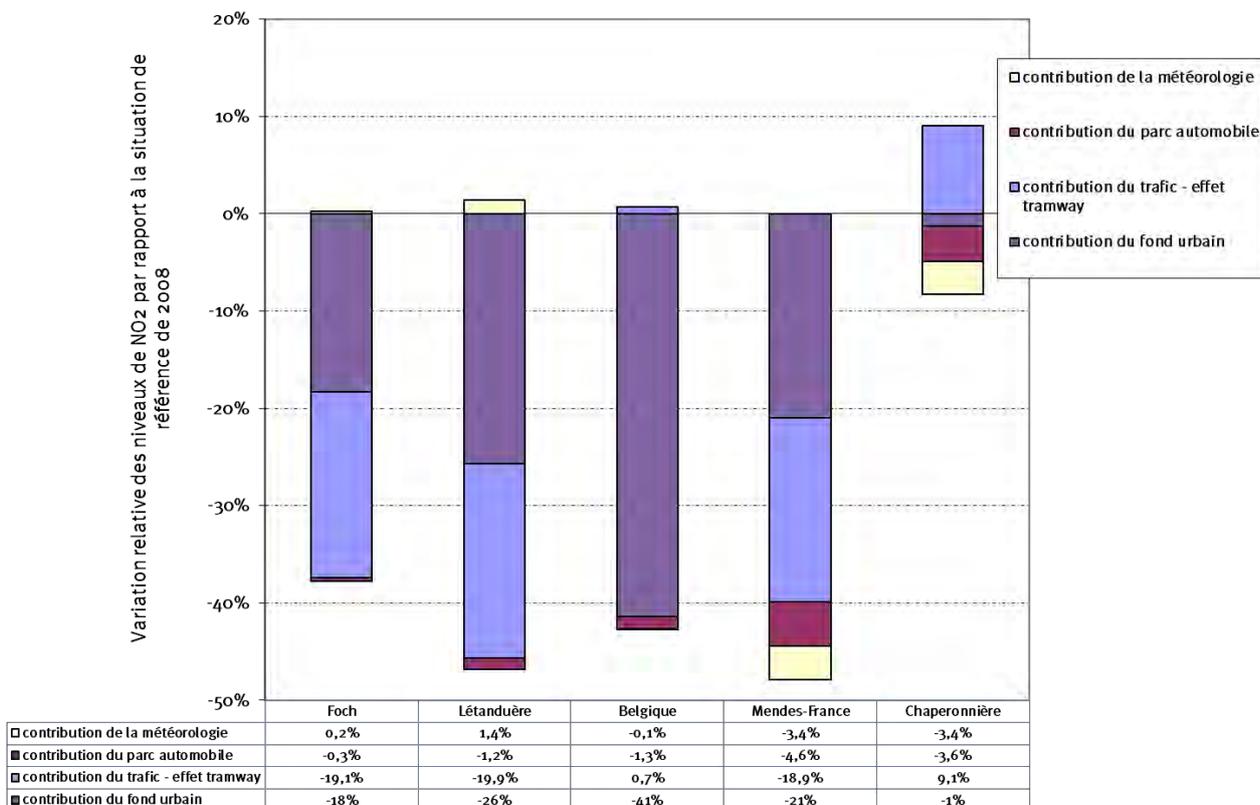


Figure 25 : variation des concentrations de NO₂ induites par les différentes contributions, par rapport à la situation de référence de 2008

Exemple de lecture du graphique dans le cas du scénario 1 dans la rue Foch : «Les conditions météorologiques de 2012 induisent une augmentation de 0.2% en NO₂ par rapport à la concentration de référence de 2008 ».

Exemple de lecture du graphique dans le cas du scénario 3 dans la rue Foch : « L'évolution des conditions de trafic en 2012 induisent une baisse de 19.1% en NO₂ par rapport à la concentration de référence de 2008 ».

- influence des conditions météorologiques : d'après les résultats, sur les 5 rues ciblées, les variations de concentrations par rapport à la situation de 2008 sont inférieures à |4%|. On note que pour les axes de Belgique, Mendès-France et Chaperonnière, les conditions météorologiques de 2012 ont été favorables à la diminution des niveaux de NO₂. La prédominance en 2012 de vents de secteur nord nord-ouest aura pu favoriser la dispersion des polluants dans la rue Mendès France.

- influence de l'évolution du parc automobile : les résultats de modélisation montrent que la modernisation du parc automobile entre 2008 et 2012 n'a qu'un faible impact sur les niveaux de NO₂ (variation < |5%|). Ceci est principalement dû au fait que les 4 années passées entre les 2 campagnes n'ont pas suffi à rénover complètement le parc. On note malgré tout que la contribution de ce facteur bien que faible, est positive sur tous les axes de circulation étudiés.

- influence de l'évolution des conditions de trafic : « effet tramway » : la diminution du trafic observée sur les sites de Foch, Letanduère et Mendès France a pour effet une réduction des teneurs en NO₂ de 19 à 20%. Rue de Belgique, le trafic n'a qu'un impact négligeable sur l'évolution des niveaux de NO₂. Enfin, dans la rue Chaperonnière, d'après le modèle, l'évolution des conditions de trafic (vitesse de circulation, évolution du profil journalier de fréquentation associée à une faible évolution de la fréquentation entre les 2 périodes de mesures) engendrerait une augmentation d'environ 10 % des teneurs en NO₂. Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution sachant que l'accord mesure/modèle dans cette rue est moins bon que dans les autres rues (cf. annexe 9).
- influence de l'évolution du niveau de pollution de fond : les mesures sur les sites permanents d'Air Pays de la Loire ont montré une réduction de la pollution en NO₂ du fond urbain comprise entre 60 et 62% par rapport à 2008. Le graphique montre que cette évolution du fond engendre, dans toutes les rues, une baisse de 1 à 41% des concentrations locales en NO₂ et donc une amélioration de la qualité de l'air.

En résumé, le trafic en termes de fréquentation (TMJA) et la pollution de fond sont les 2 paramètres les plus influents sur les niveaux de NO₂.

Dans les rues de Foch, Letanduère et Mendès France, l'évolution des conditions de trafic et la baisse du niveau de fond engendrent une diminution des concentrations de NO₂ et contribuent à part sensiblement égale (de l'ordre de 20 %) à cette baisse. Il est intéressant de noter que ces résultats sont en accord avec ceux obtenus lors de la première étude modélisation [16] qui indiquait que la pollution moyenne dans les 15 sections « canyons » parcourues par la ligne de tramway devrait diminuer en moyenne par rapport au scénario de référence de -9% à -26 % en considérant une hypothèse de diminution de la pollution de fond.

Pour la rue de Belgique, si l'impact du trafic est négligeable, c'est surtout la diminution des niveaux de fond qui entraîne une amélioration de la qualité de l'air sur cet axe avec une réduction des concentrations de NO₂ de 41%.

Enfin, dans la rue Chaperonnière, d'après le modèle, l'évolution des conditions de trafic (vitesse de circulation, évolution du profil journalier de fréquentation associée à une faible évolution de la fréquentation entre les 2 périodes de mesure) engendrerait une augmentation d'environ 10 % des teneurs en NO₂ compensée par les influences à la baisse de la météorologie, de l'évolution du parc et du fond urbain.

conclusions

Gâce aux campagnes de mesure réalisées en 2008 et 2012 et aux traitements associés, cette étude a permis d'évaluer l'impact de la mise en service du tramway sur la qualité de l'air dans les 6 rues déjà étudiées en 2008.

La mise en place de la première ligne de tramway dans les rues Foch, Letanduère, Mendès France a un effet bénéfique sur la qualité de l'air enregistrée sur ces axes de circulation. En effet la modélisation statistique montre que si entre 2008 et 2012, les conditions de circulation dans les rues Foch et Letanduère n'avaient pas été modifiées positivement par la mise en service du tramway, les niveaux de polluants mesurés en 2012, auraient été significativement plus élevés. Cet « effet tramway » est confirmé par la modélisation des niveaux de pollution au sein des rues qui montre un effet bénéfique sur la qualité de l'air d'environ 20 % pour le dioxyde d'azote.

Après la mise en place de la ligne de tramway, les rues Chaperonnières, de Belgique devaient, selon les prévisions, accueillir plus de véhicules suite à des reports de trafics. Dans ces rues, nous observons quand même une baisse des niveaux de pollution entre les campagnes 2008 et 2012. Cette baisse des niveaux de pollution est en revanche attribuable à la baisse de la pollution urbaine de fond que nous avons enregistrée entre le mois d'avril 2008 et le mois de mai 2012.

A l'avenir, ce type d'étude associant des campagnes de mesures couplées à des études de modélisation pourrait être étendu à d'autres projets urbains permettant ainsi de quantifier l'impact de ces projets sur la qualité de l'air.

annexes

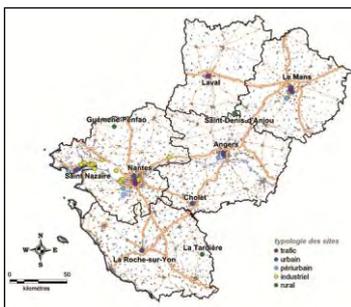
- annexe 1 : Air Pays de la Loire
- annexe 2 : techniques d'évaluation
- annexe 3 : types des sites de mesure
- annexe 4 : polluants
- annexe 5 : correction des concentrations de NO₂ mesurées par tube passif
- annexe 6 : résultats des tests statistiques
- annexe 7 : description technique de la modélisation des rues "canyons"
- annexe 8 : méthodologie de récupération des données géométriques des rues "canyons"
- annexe 9 : accord mesure/modèle
- annexe 10 : seuils de qualité de l'air 2012

annexe 1 : Air Pays de la Loire

Dotée d'une solide expertise riche de trente ans d'expérience, Air Pays de la Loire est agréée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie pour surveiller la qualité de l'air de la région des Pays de la Loire. Air Pays de la Loire regroupe de manière équilibrée l'ensemble des acteurs de la qualité de l'air : services de l'État et établissements publics, collectivités territoriales, industriels et associations et personnalités qualifiées.

Air Pays de la Loire mène deux missions d'intérêt général : surveiller et informer.

surveiller pour savoir et comprendre



l'air de la région sous haute surveillance

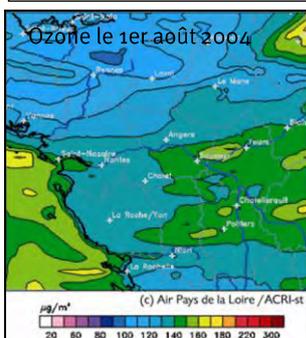
Fonctionnant 24 heures sur 24, le dispositif permanent de surveillance est constitué d'une quarantaine de sites de mesure, déployés sur l'ensemble de la région : principales agglomérations, zones industrielles et zones rurales.

mesurer où et quand c'est nécessaire

Air Pays de la Loire s'est doté de systèmes mobiles de mesure (laboratoires mobiles, préleveurs...). Ces appareils permettent d'établir un diagnostic complet de la qualité de l'air dans des secteurs non couverts par le réseau permanent. Des campagnes de mesure temporaires et ciblées sont ainsi menées régulièrement sur l'ensemble de la région.

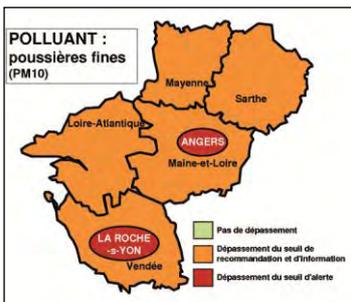
la fiabilité des mesures garantie

Les mesures de qualité de l'air consistent le plus souvent à détecter de très faibles traces de polluants. Elles nécessitent donc le respect de protocoles très précis. Pour assurer la qualité de ces mesures, Air Pays de la Loire dispose d'un laboratoire d'étalonnage, airpl.lab accrédité par le Cofrac et raccordé au Laboratoire National d'Essais.



simuler et cartographier la pollution

Pour évaluer la pollution dans les secteurs non mesurés, Air Pays de la Loire utilise des logiciels de modélisation. Ces logiciels simulent la répartition de la pollution dans le temps et l'espace et permettent d'obtenir une cartographie de la qualité de l'air. La modélisation permet par ailleurs d'estimer l'impact de la réduction, permanente ou ponctuelle, des rejets polluants. Elle constitue un outil d'aide à la décision pour les autorités publiques compétentes et les acteurs privés.



prévoir la qualité de l'air

Si le public souhaite connaître la pollution prévue pour le lendemain afin de pouvoir adapter ses activités, les autorités politiques ont, elles, besoin d'anticiper les pics de pollution pour pouvoir prendre les mesures adaptées. En réponse à cette attente, Air Pays de la Loire réalise des prévisions de la pollution atmosphérique grâce à sa plateforme IRIS.

informer pour prévenir



pics de pollution : une vigilance permanente

En cas d'épisodes de pollution, une information spécifique est adressée aux autorités publiques et aux médias. Suivant les concentrations de pollution atteintes, le préfet de département prend, si nécessaire, des mesures visant à réduire les émissions de polluants (limitations de vitesse, diminution d'activités industrielles...)

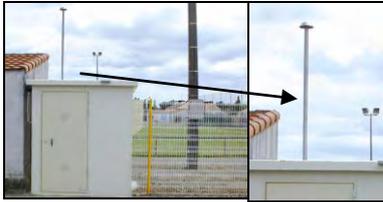
sur Internet : tous les résultats, tous les dossiers

Le site Internet www.airpl.org donne accès à de très nombreuses informations sur la qualité de l'air des Pays de la Loire. Elles sont actualisées toutes les heures. On y trouve les cartes de pollution et de vigilance, les communiqués d'alerte, les indices de la qualité de l'air, les mesures de pollution heure par heure, les actualités, toutes les publications d'Air Pays de la Loire...



annexe 2 : techniques d'évaluation

mesures



les sites fixes

C'est le principal moyen de surveillance : il existe une trentaine de sites fixes dans les Pays de la Loire. Ils surveillent en continu la qualité de l'air des principales agglomérations de la région, des zones industrielles de Basse-Loire, et également dans un secteur rural dans l'est de la Vendée. Fonctionnant 24 heures sur 24, ils sont équipés d'analyseurs spécifiques des principaux indicateurs de pollution atmosphérique: dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ozone, particules PM₁₀ ou PM_{2,5}, monoxyde de carbone, BTX. Ces stations sont reliées au poste central d'Air Pays de la Loire où les données sont traitées et servent le cas échéant à activer les procédures d'information et d'alerte.



les laboratoires mobiles

La région des Pays de la Loire est dotée de deux laboratoires mobiles de surveillance de la qualité de l'air. Ces systèmes, équipés d'analyseurs spécifiques (NO_x, SO₂, O₃, PM₁₀, CO) comme les sites fixes, permettent d'établir un diagnostic de la qualité de l'air dans des secteurs non couverts par le réseau permanent. Les applications sont diverses : impact industriel ou urbain, validation de futurs sites fixes, communication...



les tubes à diffusion passive

Ces systèmes de dimension réduite permettent à moindre coût de mesurer sur des périodes de 15 jours en général, et après analyse en laboratoire, des polluants tels que le dioxyde d'azote, l'ozone, benzène et les composés organiques volatils, de façon générale. Ils sont également utilisés pour mailler un territoire et obtenir ainsi la répartition géographique de la pollution.

modélisation



modélisation à l'échelle de la rue : OSPM

OSPM est un modèle destiné à la modélisation des rues "canyons", c'est-à-dire des voies bordées de bâtiments. Il prend en compte la pollution ambiante de l'agglomération, la météorologie, la configuration de la rue et le trafic automobile pour calculer les concentrations de quatre polluants : dioxyde d'azote, benzène, monoxyde de carbone et particules PM₁₀. OSPM est utile pour évaluer, plus rapidement qu'avec des outils de mesure, les risques de dépassement des seuils réglementaires à proximité des voies de circulation.

annexe 3 : types des sites de mesure

Les sites de mesure sont localisés selon des objectifs précis de surveillance de la qualité de l'air, définis au plan national.



sites urbains

Les sites urbains sont localisés dans une zone densément peuplée en milieu urbain et de façon à ne pas être soumis à une source déterminée de pollution ; ils caractérisent la pollution moyenne de cette zone.



sites de trafic

Les sites de trafic sont localisés près d'axes de circulation importants, souvent fréquentés par les piétons ; ils caractérisent la pollution maximale liée au trafic automobile.

annexe 4 : polluants

les oxydes d'azote (NOx)

Les NOx comprennent essentiellement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils résultent de la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air à haute température. Environ 95 % de ces oxydes sont la conséquence de l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel). Le trafic routier (59 %) en est la source principale. Ils participent à la formation des retombées acides. Sous l'action de la lumière, ils contribuent à la formation d'ozone au niveau du sol (ozone troposphérique).

Le monoxyde d'azote présent dans l'air inspiré passe à travers les alvéoles pulmonaires, se dissout dans le sang où il limite la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine. Les organes sont alors moins bien oxygénés.

Le dioxyde d'azote pénètre dans les voies respiratoires profondes. Il fragilise la muqueuse pulmonaire face aux agressions infectieuses, notamment chez les enfants. Aux concentrations rencontrées habituellement, le dioxyde d'azote provoque une hyperréactivité bronchique chez les asthmatiques.

les particules fines (ou poussières)

Les particules ou poussières constituent en partie la fraction la plus visible de la pollution atmosphérique (fumées). Elles ont pour origine les différentes combustions, le trafic routier et les industries. Elles sont de nature très diverses et peuvent véhiculer d'autres polluants comme des métaux lourds ou des hydrocarbures. De diamètre inférieur à 10 µm (PM₁₀), elles restent plutôt en suspension dans l'air. Supérieures à 10 µm, elles se déposent, plus ou moins vite, au voisinage de leurs sources d'émission. Les particules plus fines, appelées PM_{2,5} (diamètre inférieur à 2,5 µm) pénètrent plus profondément dans les poumons. Celles-ci peuvent rester en suspension pendant des jours, voire pendant plusieurs semaines et parcourir de longues distances.

La profondeur de pénétration des particules dans l'arbre pulmonaire est directement liée à leurs dimensions, les plus grosses étant arrêtées puis éliminées au niveau du nez et des voies respiratoires supérieures. Le rôle des particules en suspension a été montré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les sujets sensibles (enfants, bronchitiques chroniques, asthmatiques...).

Certains hydrocarbures aromatiques polycycliques portés par les particules rejetées par les véhicules sont classés comme probablement cancérogènes chez l'homme.

les composés organiques volatils (COV)

Ils englobent des composés organiques gazeux que l'on rencontre dans l'atmosphère, dont les principaux sont des hydrocarbures.

Les trois sources principales sont le trafic routier (39 %), l'utilisation industrielle ou domestique de peinture, vernis, colle, etc, dont les solvants s'évaporent au cours du séchage, et l'évaporation à partir du stockage d'hydrocarbures. Avec les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone, ils contribuent à la formation d'ozone troposphérique.

Les BTEX (appellation regroupant le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes) sont des hydrocarbures monocycliques (HAM) constitués d'un seul cycle benzénique. Les BTEX entrent dans la composition des carburants des réservoirs ou des stations services.

Les effets des COV sont très variables selon le polluant considéré.

Ils sont à l'origine de la formation des photooxydants tels que l'ozone, lui-même responsable de gêne respiratoire chez l'homme. Les COV peuvent aussi directement provoquer des irritations sensorielles (hydrocarbures et formaldéhydes). Des manifestations plus sévères telles que les troubles cardiaques (toluène, chloroforme) et digestifs ou les effets cancérogènes (benzène) et mutagènes, sont liés à des expositions chroniques ou intenses enregistrées dans le passé dans certaines ambiances de travail. Les concentrations relevées dans l'environnement sont très inférieures à ces atmosphères et n'entraînent pas d'expositions aiguës.

Le monoxyde de carbone (CO)

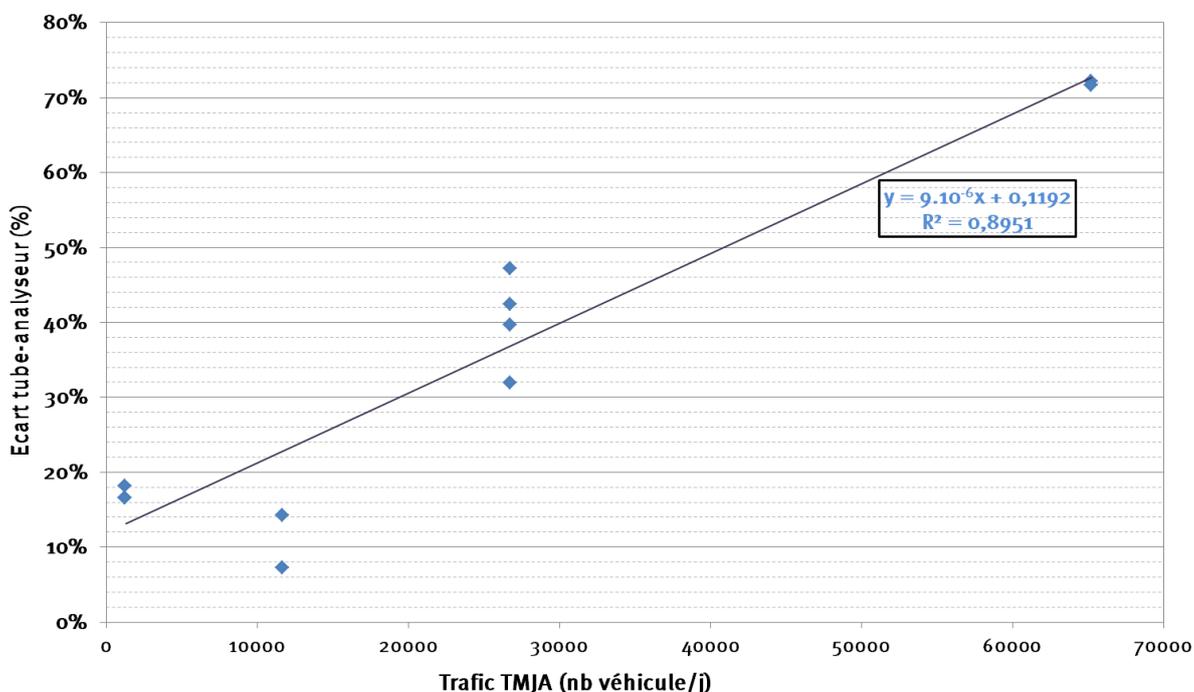
Ce gaz provient des combustions incomplètes. Il est émis en grande partie (59 %) par le trafic routier. Le chauffage urbain, collectif ou individuel, vient en deuxième position avec 21 % des émissions. Dans l'atmosphère, il se combine en partie et à moyen terme avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone (CO₂). On le rencontre essentiellement au niveau du sol à proximité des sources d'émission. Il participe avec les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, à la formation d'ozone troposphérique.

Le CO est dangereux car non décelable. Son effet toxique se manifeste à de très faibles concentrations en exposition prolongée. Le CO est principalement un poison sanguin. Il se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. Les premiers symptômes de l'intoxication sont les seuls signaux d'alarme : maux de tête, une vision floue, des malaises légers, des palpitations. Si les concentrations de CO sont élevées, l'intoxication se traduit par des nausées, des vomissements, des vertiges ou, plus grave, un évanouissement puis la mort. La gravité de l'intoxication dépend de la quantité de CO fixé par l'hémoglobine. Elle est donc liée à plusieurs facteurs : la concentration de CO dans l'air, la durée d'exposition et le volume respiré.

annexe 5 : correction des concentrations de NO₂ mesurées par tube passif

Sur les sites de Foch et Letanduère, les niveaux de NO₂ ont été mesurés à la fois par analyseurs automatiques et aussi par prélèvement sur tubes passifs. La comparaison des concentrations de NO₂ relevées par ces 2 méthodes montre des surestimations systématiques des niveaux par les tubes. Les mesures par analyseurs étant considérées comme méthode de référence, cette différence de concentration traduit l'existence d'un biais de mesure sur les prélèvements de NO₂ réalisés sur tube PASSAM. Ce constat a également été fait par d'autres AASQA [12], [13]. Il a été décidé de « corriger » les teneurs en NO₂ mesurées par tubes à diffusion.

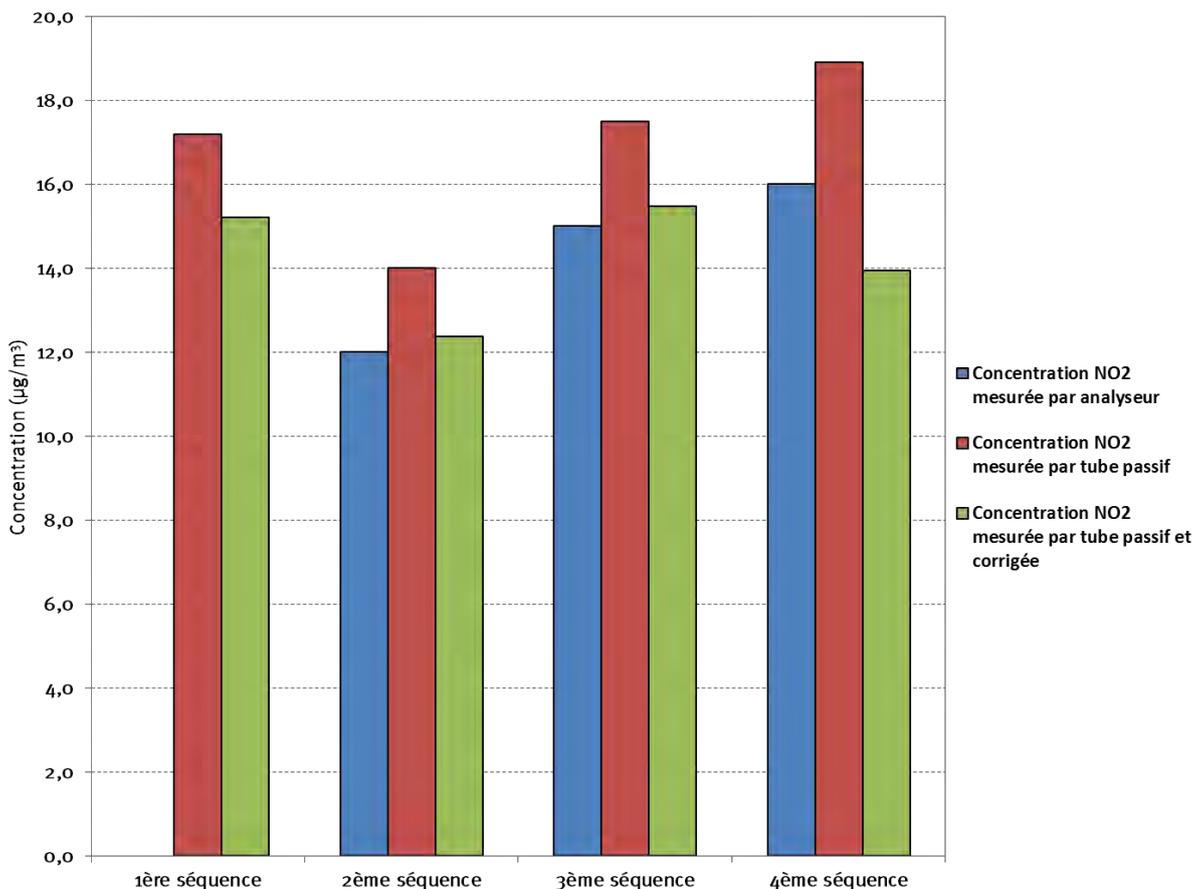
A partir de la base de données de NO₂ recueillies par Air Pays de la Loire lors de différentes campagnes, l'ensemble des couples de concentrations de NO₂ analyseur/tube ont été étudiés pour évaluer l'écart entre les 2 types de mesure. Il est alors apparu un effet significatif du trafic sur l'écart entre les mesures tubes et celles effectuées par l'analyseur, comme illustré sur la figure suivante. Sur ce graphique sont résumés les écarts entre les concentrations moyennées de NO₂ mesurées par tube et par analyseur sur les sites de trafic d'Air Pays de la Loire. En fait, le trafic crée des perturbations des mouvements d'air qui modifient l'effet d'absorption du NO₂ sur les tubes passifs et entraînent une surestimation de la concentration. L'effet du vent sur les capacités d'adsorption des tubes passifs pour NO₂ a déjà été relevé lors de précédentes études [6] [14].



Ecart tube-analyseur en fonction du TMJA pour les sites de trafic

Il est d'usage de considérer la concentration en NO₂ mesurée par l'analyseur comme valeur de référence. Pour les sites non instrumentés par un analyseur, cette valeur de référence correspond à la concentration « vraie » que l'on doit mesurer par les tubes. C'est pourquoi la relation mathématique entre écart tube/analyseur et TMJA déduite de la corrélation précédente, a été utilisée pour évaluer la différence entre la valeur mesurée par les tubes et la valeur « corrigée ».

Dans le cadre de cette campagne, les écarts entre les valeurs tubes « mesurées » et les valeurs tubes « corrigées » varient de 12 à 22%.



Exemple de l'effet de correction sur les concentrations en NO2 mesurées par analyseur et par tubes passifs sur le site de trafic de Letandùère

Comme on peut le constater avec l'exemple de la rue Letandùère sur la figure précédente, la correction apportée à la concentration en NO2 prélevée sur tube permet de réduire l'écart avec la valeur de référence mesurée par l'analyseur, entre 3 et 12%.

Pour le cas des mesures de NO2 réalisées sur tube passif, sur le site urbain des Beaux-Arts, les concentrations n'ont pas été corrigées puisqu'il n'y avait pas de turbulences pouvant perturber les mesures.

annexe 6 : résultats des tests statistiques

présentation des tests statistiques réalisés

Afin de présenter l'étude statistique utilisée pour la comparaison des données entre 2008 et 2012, l'exemple sur le traitement des concentrations de NO₂ relevées sur le site de Foch, est présenté.

test de Student

• résultats bruts du test de Student

Le test de Student permet de comparer les moyennes de 2 séries de données.

Les données sont traitées par le logiciel R. Les résultats du test se présentent de la manière suivante :

Test de Student sur les moyennes des écarts [NO ₂ _{Foch} – NO ₂ _{Beaux Arts}] de 2008 et 2012
t.test(NO2difen2008\$FOCHN2,NO2difen2012\$FOCHN2,conf.level = 0.90)
Welch Two Sample t-test
data: NO2difen2008\$FOCHN2 and NO2difen2012\$FOCHN2
t = 9.0048, df = 5373.98, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
90 percent confidence interval:
5.150373 7.452935
sample estimates:
mean of x mean of y
34.24053 27.93887

• interprétation du t-test

Si « p-value » < 5% alors la différence entre les moyennes des concentrations en NO₂ enregistrées en 2008 et 2012 est significative.

test de Kolmogorov-Smirnov

• résultats bruts du test de Kolmogorov-Smirnov

Le test de Kolmogorov-Smirnov permet de comparer les distributions de 2 séries de données.

Les données sont traitées par le logiciel R. Les résultats du test se présentent de la manière suivante :

Test de Kolmogorov-Smirnov sur les distributions des écarts [NO ₂ _{Foch} – NO ₂ _{Beaux Arts}] de 2008 et 2012
> ks.test(NO2difen2008\$FOCHN2,NO2difen2012\$FOCHN2,conf.level = 0.90)
Two-sample Kolmogorov-Smirnov test
data: NO2difen2008\$FOCHN2 and NO2difen2012\$FOCHN2
D = 0.0984, p-value = 9.384e-13
alternative hypothesis: two-sided

• interprétation du t-test

Si « p-value » < 5% alors la différence entre les distributions des concentrations en NO₂ enregistrées en 2008 et 2012 est significative.

test du Chi2

• résultats bruts du test du Chi2

Ce test permet de comparer la dispersion de 2 séries de données.

Les données sont traitées par le logiciel R. Les résultats du test se présentent de la manière suivante :

Test de Chi2 sur les variances des écarts [$\text{NO}_2_{\text{Foch}} - \text{NO}_2_{\text{Beaux Arts}}$] de 2008 et 2012
<pre>> chisq.test(NO2difen2008\$FOCHN2,NO2difen2012\$FOCHN2[1:length(NO2difen2008\$FOCHN2)])</pre>
<p>Pearson's Chi-squared test</p>
<p>data: NO2difen2008\$FOCHN2 and NO2difen2012\$FOCHN2[1:length(NO2difen2008\$FOCHN2)]</p>
<p>X-squared = 21425.19, df = 17818, p-value < 2.2e-16</p>

• interprétation du t-test

Si « p-value » < 5% alors la différence entre les dispersions des concentrations en NO2 enregistrées en 2008 et 2012 est significative.

Ces tests statistiques ont été appliqués à toutes les mesures et ont montré une différence significative des niveaux entre 2008 et 2012, sur les différentes rues étudiées.

annexe 7 : description technique de la modélisation des rues "canyons"

les régimes d'écoulement dans les rues "canyons"

Un canyon est formé dans une rue entre deux rangées de grands bâtiments. La caractérisation principale d'une rue "canyon" est son rapport hauteur/largeur (H/L), où H est la hauteur moyenne du bâti et L, la largeur entre les deux rangées de bâtiments.

La direction du vent au-dessus des toits et la forme du canyon conditionnent le développement d'un ou plusieurs tourbillons (vortex) à l'intérieur de la rue, qui seront à l'origine de niveaux élevés de pollution en des points précis.

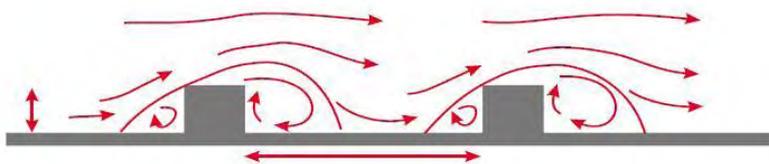
Les régimes d'écoulement généralement considérés à l'intérieur du canyon dépendent du rapport H/L [10].

« Isolated roughness flow » : quand 2 vortex indépendants se développent de part et d'autre de la rue, celle-ci étant suffisamment large pour qu'il n'y ait pas d'interactions entre les structures ($H/L < 0.2$) ;

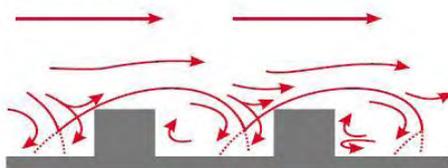
« Skimming flow » : quand un seul vortex se développe dans la rue supposée très étroite ($H/W > 0.65$). Dans ce cas le tourbillon agit à l'intérieur de la rue et peu d'échanges avec l'extérieur ont lieu ;

« Wake interference flow » : état intermédiaire entre les deux précédemment décrits ($0.2 < H/W < 0.65$). L'écoulement est alors très complexe puisque plusieurs structures tourbillonnaires peuvent interagir.

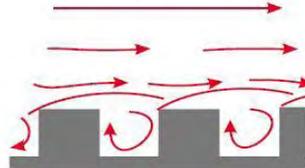
(a) Isolated roughness flow



(b) Wake interference flow



(c) Skimming flow



Différents régimes d'écoulement dans une rue "canyon"

hypothèses de modélisation du logiciel OSPM

Le modèle OSPM est un modèle semi empirique adapté aux rues "canyon" et utilise des hypothèses de conditions de dispersion et de flux basées sur des analyses extensives de données expérimentales permettant de tester le modèle. A l'intérieur d'une rue "canyon", lorsque la composante du vent perpendiculaire à la rue est non nulle, un vortex se forme de façon à ce que la direction du vent au niveau de la rue soit opposée à la direction du vent au niveau des toits.

Deux phénomènes principaux de transport des polluants sont identifiés :

→ le transport des polluants directement émis au niveau du sol par les véhicules. Il s'agit ici d'une dispersion de type gaussienne dans le sens du vent au niveau du sol.

→ la recirculation de ces polluants dans la rue due à la présence éventuelle d'un vortex.

OSPM utilise un modèle de panache gaussien pour la contribution directe des gaz d'échappement et un modèle de boîte pour la recirculation des polluants dans la rue. L'air qui re-circule est ventilé au bord de la boîte en gardant un équilibre entre les flux entrants et sortants. Les flux entrants sont les sources d'émissions de trafic et les flux sortants sont principalement fonctions de la turbulence au niveau du toit.

Le côté au vent est exposé à la pollution provenant de la zone de recirculation d'air et, si le vortex n'occupe pas l'ensemble de la rue, aux émissions des véhicules en dehors de la zone de recirculation. Le côté sous le vent est soumis au panache direct dû aux émissions à l'intérieur de la zone occupée par le vortex, à l'air re-circulé et à une fraction des émissions de trafic en dehors de la zone de vortex. OSPM modélise la turbulence dans la rue : la turbulence du vent et la turbulence induite par le trafic. La turbulence induite par le trafic devient prédominante lorsque les vents sont faibles pour déterminer les plus fortes concentrations de pollution dans la rue "canyon".

La formation de NO₂ est modélisée dans OSPM en résolvant analytiquement les cinétiques du schéma réactionnel suivant :



annexe 8 : méthodologie de récupération des données géométriques des rues "canyons"

L'extraction des données géométriques nécessaires a été réalisée à partir de la BD Topo© de l'IGN, grâce au logiciel WinStar Carto de la société STAR-APIC. La procédure mise en place par la Direction du Système d'Information Communautaire d'Angers Loire Métropole pour calculer ces paramètres est la suivante :

1- calcul des hauteurs des bâtiments

La couche « bâti » de la BD Topo datant de 1996 a été intégrée dans WinStar Carto. Tous les points ont été importés en 3D avec une valeur en Z égale à l'altitude en NGF 69.

Modélisation géométrique : Contour extérieur du bâtiment tel qu'il apparaît vu d'avion (le plus souvent, ce contour correspond à celui du toit); altitude* correspondant à ce contour (généralement l'altitude des gouttières).

* altitude de l'arête supérieure en cas de face verticale.

Seules les cours intérieures de plus de 10 m de large sont représentées par un trou dans la surface bâtie.

Description	Monde réel et modélisation	Modélisation géométrique
Modélisation d'une maison		

Plusieurs bâtiments contigus ou superposés de même nature sont généralement considérés comme un seul et même objet (seul le contour extérieur est saisi). Deux objets contigus ou superposés sont cependant représentés s'ils présentent les caractéristiques suivantes :

- différence de hauteur entre les deux bâtiments > 10 m environ (ou 3 étages) ;
- surface de chaque objet résultant > 400 m² ;

Description	Monde réel et modélisation	Modélisation géométrique	Modélisation géométrique
Modélisation d'un bâtiment		Perspective 	Vue de dessus 

Un calcul des hauteurs des bâtiments a été généré en soustrayant aux altitudes des toits de la BD Topo, les altitudes projetées au sol. Les altitudes au sol ont été interpolées sur un MNT réalisé par la société FIT pour la production d'une ortho-photographie en 2000.

La précision du calcul des hauteurs de bâtiment est d'ordre métrique.

Pour une façade de rue bâtie de manière continue, la densité des points donnant des informations sur la hauteur peut être variable. En effet si la hauteur des différents bâtiments est assez homogène, il peut très bien avoir un espacement planimétrique de plusieurs centaines de mètre entre deux points.

2- saisie graphique manuelle du tronçon de rue sur fond cartographique de la BD Topo

Les tronçons des rues "canyon" ont été saisis manuellement, sans tenir compte de la géométrie des tronçons de voies de la BD Topo (pas d'accrochage, pas de reprise des arcs existants), afin de construire des tronçons simplifiés au maximum avec les coordonnées du point du milieu du tronçon, un angle et une longueur.

Par ailleurs, les limites des tronçons, au niveau des carrefours, correspondent aux limites projetées du bâti et non au centre du carrefour.



3- dessin de la surface du tronçon de rue avec accrochage sur les bâtis



4- récupération des informations géométriques concernant le tronçon

Sélection du tronçon et lancement d'une macro-procédure qui récupère les informations géométriques (longueur, angle, X et Y du milieu du tronçon) et les insères dans la table attributaire.

Sélection du tronçon et lancement d'une seconde macro-procédure qui récupère la largeur moyenne du tronçon et l'insère dans la table attributaire. La macro va diviser la surface dessinée précédemment par la longueur du tronçon pour obtenir une largeur moyenne de la rue.

5- affectation au tronçon d'une hauteur moyenne des bâtiments

Lancement d'une macro-procédure qui calcule la continuité et la hauteur moyenne du bâti de chaque côté du tronçon et les insères dans la table attributaire.

Choix du côté du tronçon sur lequel va être effectué le calcul, puis sélection manuelle des différents segments de bâti qui bordent le tronçon du côté choisi.

La macro-procédure va calculer la somme des longueurs de tous les segments de bâti sélectionnés et la diviser par la longueur du tronçon, ce qui donne une valeur de continuité du bâti entre 0 et 1.

(Dans un certain nombre de cas, il a fallu recréer, sur la couche bâti des murs, – non existants dans la BD Topo - ou recréer des segments de bâti pour qu'ils soient ajustés au tronçon. Ces données ont été renseignées avec une hauteur pour chacun des points – hauteur estimée).

La macro-procédure calcule également pour chaque segment sélectionné la hauteur moyenne de ce segment (moyenne des deux points) et la multiplie par sa longueur.

On obtient une surface qui correspond à la "façade" de chaque segment. L'addition de ces surfaces va permettre d'obtenir une façade totale qui est ensuite divisée par la longueur des segments, ce qui donne la hauteur moyenne des bâtis d'un côté de tronçon.

6- affectation au tronçon de renseignements divers

La table attributaire du tronçon est renseignée avec des informations diverses : nom de la rue, trafic (à partir des données fournies par la Direction Transports-Déplacements), vitesse et hétérogénéité dans les hauteurs de bâti (valeur estimée à partir de la lecture graphique des différentes hauteurs de bâtiments le long du tronçon).

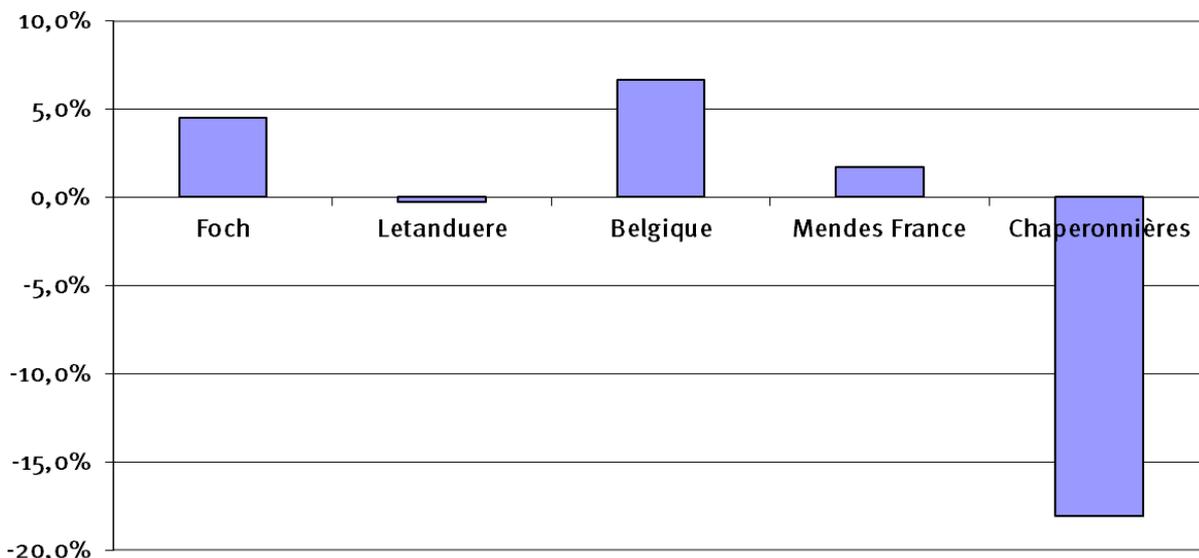
7- calcul de moyennes et de ratios pour chaque tronçon

Lancement d'une requête SQL qui calcule pour chaque tronçon :

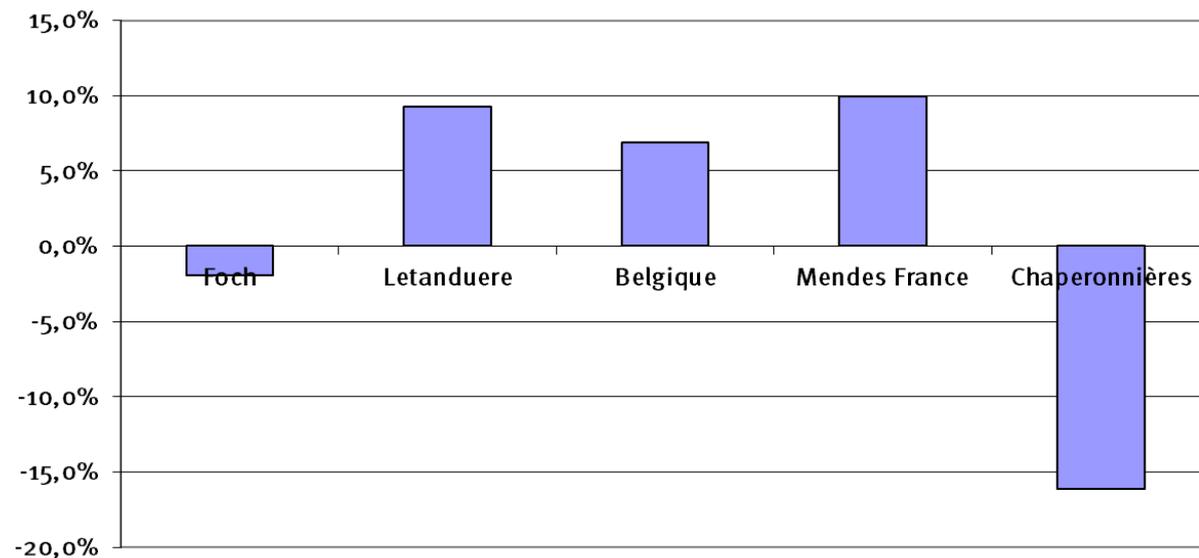
- la moyenne de la hauteur du bâti à partir des hauteurs des côtés 1 et 2,
- le rapport Hauteur/Largeur pour chaque côté du tronçon,
- le rapport Hauteur/Largeur pour le tronçon dans sa globalité.

8- conversion de WinStar Carto vers Mapinfo avec le logiciel FME.

annexe 9 : accord mesure/modèle



Écart entre les niveaux moyens en NO₂ mesurés en 2008 et les niveaux modélisés par OSPM



Écart entre les niveaux moyens en NO₂ mesurés en 2012 et les niveaux modélisés par OSPM

Les écarts entre les niveaux moyens de NO₂ mesurés et modélisés restent inférieurs à 30% et respectent l'objectif de qualité mentionné de la directive 2008/50/CE. Différents facteurs peuvent être à l'origine de ces écarts mesure/modèle :

- difficulté à reproduire le trafic dans le modèle. En effet, les campagnes de mesure de 2008 et 2012 intègrent des périodes de vacances et plusieurs ponts : c'est pourquoi les données de comptage hebdomadaires de TMJA ne sont pas strictement représentatives de l'ensemble de la période,
- la prise en compte de l'évolution du parc est basée sur une estimation nationale, qui pourrait différer à l'échelle locale,
- une modification de la fluidité du trafic non prise en compte dans le modèle. La fluidité du trafic peut également être influencée par une nouvelle programmation des feux de circulation ainsi que par la fermeture d'axes de circulation secondaires (exemple de la rue Chaperonnière qui débouche sur un carrefour dont une des voies a été fermée à la circulation).
- absence de données sur l'évolution du parc d'autobus.

annexe 10 : seuils de qualité de l'air 2012

TYPE DE SEUIL (µg/m³)	DONNÉE DE BASE	POLLUANT												
		Ozone	Dioxyde d'azote	Oxydes d'azote	Poussières (PM10)	Poussières (PM2.5)	Plomb	Benzène	Monoxyde de carbone	Dioxyde de soufre	Arsenic	Cadmium	Nickel	Benzo(a)pyrène
décret 2010-1250 du 21/10/2010														
valeurs limites	moyenne annuelle	-	40	30 ⁽¹⁾	40	27 ⁽²⁾	0,5	5	-	20 ⁽³⁾	-	-	-	-
	moyenne hivernale	-	-	-	-	-	-	-	-	20 ⁽⁴⁾	-	-	-	-
	moyenne journalière	-	-	-	50 ⁽³⁾	-	-	-	-	125 ⁽⁴⁾	-	-	-	-
	moyenne 8-horaire maximale du jour	-	-	-	-	-	-	-	10 000	-	-	-	-	-
	moyenne horaire	-	200 ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	-	350 ⁽⁶⁾	-	-	-	-
seuils d'alerte	moyenne horaire	240 ⁽⁷⁾ 1 ^{er} seuil : 240 ⁽⁸⁾ 2 ^{ème} seuil : 300 ⁽⁸⁾ 3 ^{ème} seuil : 360	400 ⁽⁸⁾ 200 ⁽⁹⁾	-	-	-	-	-	-	500 ⁽⁸⁾	-	-	-	-
	moyenne 24-horaire	-	-	-	80 ⁽¹⁰⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
seuils de recommandation et d'information	moyenne horaire	180	200	-	-	-	-	-	-	300	-	-	-	-
	moyenne 24-horaire	-	-	-	50 ⁽¹⁰⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
objectifs de qualité	moyenne annuelle	-	40	-	30	10	0,25	2	-	50	-	-	-	-
	moyenne journalière	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moyenne 8-horaire maximale du jour	120 ⁽¹¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moyenne horaire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	AOT 40	6 000 ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
valeurs cibles	AOT 40	18 000 ⁽¹¹⁾⁽¹³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moyenne annuelle	-	-	-	-	20	-	-	-	-	0,006 ⁽¹⁴⁾	0,005 ⁽¹⁵⁾	0,02 ⁽¹⁵⁾	0,001 ⁽¹⁵⁾
	moyenne 8-horaire maximale du jour	120 ⁽¹⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) pour la protection de la végétation

(2) valeur intégrant la marge de tolérance applicable en 2012 : 2 (valeur applicable à compter du 01/01/2015 : 25)

(3) à ne pas dépasser plus de 35j par an (percentile 90,4 annuel)

(4) à ne pas dépasser plus de 3j par an (percentile 99,2 annuel)

(5) à ne pas dépasser plus de 18h par an (percentile 99,8 annuel)

(6) à ne pas dépasser plus de 24h par an (percentile 99,7 annuel)

(7) pour une protection sanitaire pour toute la population, en moyenne horaire

(8) dépassé pendant 3h consécutives

(9) si la procédure de recommandation et d'information a été déclenchée la veille et le jour même et que les prévisions font craindre un nouveau risque de déclenchement pour le lendemain

(10) à compter du 1^{er} janvier 2012

(11) pour la protection de la santé humaine : maximum journalier de la moyenne sur 8 heures, calculé sur une année civile

(12) calculé à partir des valeurs enregistrées sur 1 heure de mai à juillet

(13) en moyenne sur 5 ans, calculé à partir des valeurs enregistrées sur 1 heure de mai à juillet

(14) pour la protection de la santé humaine : maximum journalier de la moyenne sur 8 heures, à ne pas dépasser plus de 25 j par an en moyenne sur 3 ans

(15) à compter du 31 décembre 2012

valeur limite : niveau maximal de pollution atmosphérique, fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de la pollution pour la santé humaine et/ou l'environnement.

seuil d'alerte : niveau de pollution atmosphérique au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement et à partir duquel des mesures d'urgence doivent être prises.

seuil de recommandation et d'information : niveau de pollution atmosphérique qui a des effets limités et transitoires sur la santé en cas d'exposition de courte durée et à partir duquel une information de la population est susceptible d'être diffusée.

objectif de qualité : niveau de pollution atmosphérique fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de la pollution pour la santé humaine et/ou l'environnement, à atteindre dans une période donnée.

valeur cible : niveau de pollution fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.

bibliographie

- [1] H. Hervé Plaisance, A. Pennequin, N. Locoge, T. Leonardis, Programme d'évaluation du tube Radiello pour la mesure des BTEX - Etude n°7 (2004).
- [2] H. Plaisance, A. Pennequin, N. Locoge, T. Leonardis, Etude des performances en chambre d'exposition du tube Radiello pour la mesure des BTEX (2002).
- [3] A. Pennequin-Cardinala, H. Plaisance, N. Locogea, O. Ramalhob, S. Kirchnerb, J. Galloo, Dependence on sampling rates of Radiello® diffusion sampler for BTEX measurements with the concentration level and exposure time, Talanta 65 (2005) 1233–1240.
- [4] I. Zdanevitch, Mesure des BTEX par tubes passifs : étude sur site et mesures en chambre d'exposition (2003).
- [5] INERIS, Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air - Sources, mesures et concentrations (2004).
- [6] Ecole des Mines de Douai - Département chimie et environnement - Plaisance, H. et Minguay, A., Etude des performances en chambre d'exposition des tubes à diffusion no2 (2000).
- [7] M. Gerboles, L. Amantini, Validation of measurement by NO₂ passive sampler- A comparison with chemiluminescent monitor, Note technique TN I/93/107.
- [8] H. Plaisance, Etablissement d'un protocole d'utilisation des tubes à diffusion : Intercomparaison de tubes à diffusion NO₂ et tests de méthodes géostatistiques d'interpolation (1999).
- [9] ADEME, Fédération ATMO, LCSQA, Echantillonneurs passifs pour le dioxyde d'azote, guide de recommandations pour la mesure du NO₂ par tubes diffusion passive (2005).
- [10] Air Normand - Lepelley, N. , Essais comparatifs de tubes à diffusion passive (1998).
- [11] Air Normand - Le Meur, S. , Etude comparative des tubes à diffusion NO₂ du fournisseur PASSAM AG (1999).
- [12] Scal Air - Association Calédonienne de Surveillance de la Qualité de l'Air, Campagne de mesure par échantillonnage passif SO₂–NO₂–O₃ sur la ville de Nouméa du 18 au 25 février 2010.
- [13] Air Normand, M. Bobbia, V. Delmas, Evaluation de l'incertitude sur les concentrations de NO₂ mesurées par les tubes à diffusion du fournisseur PASSAM AG - Application de la norme NF ISO 13752 (2002).
- [14] Ecole des Mines de Douai - Département chimie et environnement - PLAISANCE, H. et MINGUY, A., Etude des performances en chambre d'exposition des tubes à diffusion no2 (2000).
- [15] LCSQA/INERIS (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air/ Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), Evaluation et contraintes d'application des modèles de rue (2004).
- [16] Air Pays de la Loire, Rues « canyons » de l'agglomération angevine qualité de l'air 2002 et 2015 - Impact du Plan de Déplacement Urbain, des projets routiers et des transports collectifs (2006).
- [17] Pierre, R. (Ecole Centrale de Nantes), Cartographie de la pollution dans les principales rues du centre-ville de Nantes (2003).

airpays de la loire

7, allée Pierre de Fermat – CS 70709 – 44307 Nantes cedex 3

Tél + 33 (0)2 28 22 02 02

Fax + 33 (0)2 40 68 95 29

contact@airpl.org

