



Etude de la qualité de l'air sur le secteur de la Croix-Rousse (Lyon 1^{er} et 4^{ème})



RAPPORT DE SYNTHESE – MESURES ET MODELISATION – 2014-2015



www.air-rhonealpes.fr





CONDITIONS DE DIFFUSION

Air Rhône-Alpes est une association de type « *loi 1901* » agréée par le Ministère chargé de l'environnement (*décret 98-361 du 6 mai 1998*) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de *l'article L.220-1 du Code de l'environnement*. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de *l'article L.220-2 du Code de l'Environnement*.

Air Rhône-Alpes communique publiquement sur les résultats issus de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information de ses études.

A ce titre, les rapports sont librement disponibles sur le site www.air-rhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Air Rhône-Alpes. Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : **© Air Rhône-Alpes (2014) Etude de la qualité de l'air sur le secteur de la Croix-Rousse – Rapport de Synthèse** ».

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Air Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Air-Rhône-Alpes :

- depuis le formulaire de contact sur le site www.air-rhonealpes.fr
- par mail : contact@air-rhonealpes.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Un questionnaire de satisfaction est également disponible en ligne à l'adresse suivante <http://www.surveymonkey.com/s/ecrits> pour vous permettre de donner votre avis sur l'ensemble des informations mis à votre disposition par l'observatoire Air Rhône-Alpes.

Cette étude a pu être réalisée grâce aux données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Air Rhône-Alpes, dont notamment LYON METROPOLE.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude	5
1.1. Une priorité d'étudier en profondeur les zones à enjeux prioritaires	5
1.2. La situation particulière des abords du tunnel de la Croix-Rousse suivie depuis 2007	5
1.3. Une étude approfondie du quartier pour éclairer sur les pistes de solutions	6
2. Matériel et méthode	7
2.1. Présentation générale de l'étude	7
2.1.1. Domaine d'étude	7
2.1.2. Objectifs opérationnels de l'étude	7
2.1.3. Méthodologie mise en œuvre	7
2.2. Description des campagnes de mesures réalisées	8
2.2.1. Dispositif de mesures en air ambiant à l'échelle du quartier	8
2.2.2. Dispositif de mesures dans l'école Michel Servet (air ambiant et intérieur)	9
2.2.3. Calendrier des campagnes de mesures réalisées	11
2.3. Les outils de modélisation et d'inventaire d'émissions	11
2.3.1. Modélisation urbaine fine à l'échelle de la rue	11
2.3.2. Modélisation 3D à très fine échelle	12
2.3.3. Simulations prospectives	13
3. Résultats à l'échelle du secteur de la Croix-Rousse	15
3.1. Variation spatiale : quelles zones sont les plus impactées ?	15
3.1.1. Pour le dioxyde d'azote (NO ₂)	15
3.1.2. Pour les particules PM ₁₀	16
3.1.3. Pour les particules PM _{2.5}	19
3.2. Variation temporelle : quelle est l'origine des variations de concentrations ?	20
3.3. Evolution des niveaux de polluants depuis 2009	22
3.3.1. Rappels historiques contextuels sur le tunnel de la Croix-Rousse	22
3.3.2. Evolution des niveaux de dioxyde d'azote (NO ₂)	23
3.3.3. Evolution des niveaux de particules en suspension (PM ₁₀ et PM _{2,5})	24
3.4. Modélisations urbaines prospectives aux horizons 2020 et 2025	26
3.4.1. Simulations réalisées selon des hypothèses tendanciennes d'évolution du parc automobile roulant	26
3.4.2. Simulation d'un dispositif de restriction de circulation des véhicules en fonction de l'ancienneté (restriction par norme Euro)	29
4. Résultats des mesures dans l'école Michel Servet	30
4.1. Mesures air extérieur/air intérieur	30
4.1.1. Dioxyde d'azote (NO ₂)	30
4.1.1. Particules fines (PM ₁₀)	31
4.2. Autres polluants mesurés en air intérieur	32
5. Diagnostic à l'échelle des bâtiments en sortie du tunnel	34
5.1.1. Simulations d'écoulement de l'air	34
5.1.2. Analyse des contributions du trafic local et du fond urbain sur les niveaux de polluants et impacts au niveau des écoles	35
6. Préconisations	39
7. Conclusions	40
Conclusions sur la situation actuelle	40
Conclusions sur les campagnes de mesures en air extérieur 2014	40
Diagnostic 2014 d'exposition de la population à la pollution atmosphérique (à l'échelle du quartier)	40
Diagnostic à l'échelle du bâtiment avec une modélisation 3D très fine échelle	41
Conclusions sur les perspectives	41

Évolution de la situation en fonction du renouvellement du parc roulant attendu pour 2020 et 2025	41
Scénarii de réduction par norme Euro.....	41
Annexe 1 : Résultats détaillés des campagnes de mesures	43
Annexe 2 : Résultats détaillés de la modélisation urbaine	43
Annexe 3 : Résultats détaillés de la modélisation fine échelle	43

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Une priorité d'étudier en profondeur les zones à enjeux prioritaires

Les espaces de proximité routière et à fort trafic sont particulièrement exposés à la pollution atmosphérique. En contexte urbain, la combinaison d'un trafic important et congestionné avec des conditions défavorables à la dispersion des polluants (tunnels, rues canyons, topographie, vent faible, etc...) peut conduire à une importante accumulation de polluants sur certaines zones, auxquelles viennent souvent s'ajouter d'autres nuisances environnementales comme le bruit. Ces zones cumulant les nuisances constituent ainsi des zones à enjeux prioritaires.

La résorption des zones à enjeux prioritaires fait partie des priorités nationales des politiques de santé et d'environnement, comme énoncé dans la Loi de Grenelle 2 et le Plan National Santé Environnement (PNSE2) et sa déclinaison régionale (mesure 11 du PRSE2). Elle est également largement mise en exergue dans le PNSE3, et le sera à n'en pas douter dans le PRSE3, attendu localement pour mi-2017.

A cet effet, Air Rhône-Alpes, en partenariat avec Acoucity et le CEREMA, a mis en place la plateforme ORHANE, qui permet de cartographier les nuisances environnementales air et bruit à l'échelle de la région Rhône-Alpes. Un travail de hiérarchisation des zones impactées a permis en 2012 de confirmer que les abords du tunnel de la Croix-Rousse, par ailleurs déjà investigués du point de vue de la qualité de l'air depuis 2007, ressortait comme un espace particulièrement fragilisé du point de vue des deux nuisances bruit et air, ce qui en fait une des zones à enjeux prioritaires de la région Rhône-Alpes.

1.2. La situation particulière des abords du tunnel de la Croix-Rousse suivie depuis 2007

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact des transports sur la qualité de l'air, et en particulier dans le cas de tunnels urbains, Air Rhône-Alpes a initié une première étude en 2007¹ aux abords du tunnel de la Croix-Rousse.

Les résultats de cette étude ont montré une qualité de l'air dégradée aux entrées et sorties du tunnel, en particulier, côté Rhône, à proximité d'un établissement sensible accueillant de jeunes enfants comprenant une cour de récréation qui surplombe l'accès au tunnel (Ecole primaire Michel Servet).

Dès 2009, en prévision de travaux de réfection du tunnel, une station de mesures a été implantée dans la cour de l'école afin de renforcer la surveillance de la qualité de l'air et la gestion de la zone où les enfants scolarisés et les riverains pouvaient être exposés à des niveaux élevés de polluants (NO₂ et PM₁₀ notamment).

Entre 2010 et 2013, durant la phase de travaux de rénovation du tunnel, le suivi de la qualité de l'air² a révélé des niveaux de NO₂ en diminution mais supérieurs à la valeur réglementaire et ponctuellement des élévations atypiques de concentrations en particules PM₁₀, liées à la remise en suspension des poussières du chantier.

Lors de la réouverture du tunnel en fin d'année 2013, les niveaux de polluants mesurés ont été similaires à ceux observés sur d'autres stations urbaines à proximité du trafic

¹ Etude Croix-Rousse 2008, <http://www.air-rhonealpes.fr/publications/etude-croix-rousse-2008>

² Suivi de la qualité de l'air de 2009 à 2013 à la sortie du tunnel de la Croix-Rousse : <http://www.air-rhonealpes.fr/publications/suivi-de-la-qualite-de-lair-de-2009-2013-la-sortie-du-tunnel-de-la-croix-rousse-69>
Synthèse du suivi de la qualité de l'air à la Croix-Rousse depuis 2007 : <http://www.air-rhonealpes.fr/publications/zoom-sur-le-suivi-de-la-qualite-de-lair-aux-abords-du-tunnel-et-sur-le-plateau-de-la>

routier et n'ont pas montré d'évolution significative par rapport aux niveaux observés avant les travaux.

1.3. Une étude approfondie du quartier pour éclairer sur les pistes de solutions

Dans la mesure où les niveaux mesurés se situent dans une école en proximité directe du tunnel et que la zone affectée par une qualité de l'air dégradée se trouve au cœur d'un tissu urbain et comporte plusieurs établissements sensibles, Air Rhône-Alpes a mis en œuvre une étude de faisabilité pour le développement d'outils permettant un diagnostic fin et une évaluation des actions possibles afin d'accompagner la Métropole de Lyon dans sa réflexion pour l'amélioration de la qualité de l'air.

Dans ce contexte, Air Rhône-Alpes a conduit en 2014/2015 une étude complète sur le quartier de la Croix-Rousse, qui combine une zone surexposée du point de vue des nuisances environnementales, la présence de populations sensibles et une aérologie complexe liée à la présence d'un tunnel routier et d'une colline.

L'étude réalisée vise à analyser la situation particulière de dépassements des niveaux de polluants aux abords du tunnel de la Croix-Rousse, à mettre en place des outils fins d'analyse pour caractériser la dispersion des polluants en zone aérologique complexe, à identifier des actions permettant de diminuer l'exposition actuelle et future des populations impactées et enfin à constituer une base méthodologique de remédiation des zones urbaines en surexposition (zones à enjeux prioritaires).

Le présent document constitue une synthèse globale, accessible pour tout public, des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

2. Matériel et méthode

2.1. Présentation générale de l'étude

2.1.1. Domaine d'étude

Le **domaine d'étude correspond au quartier de la Croix-Rousse** qui comprend plusieurs zones d'intérêt et des problématiques distinctes :

- la colline de la Croix-Rousse (pentes et plateau),
- les abords de la sortie de tunnel côté Saône, autour de l'école des Entrepôts,
- les quais de Saône, entre la sortie ouest du tunnel et le Pont Schuman,
- les abords de la sortie du tunnel côté Rhône, comprenant les écoles primaire et maternelle Michel Servet et des bâtiments résidentiels.

2.1.2. Objectifs opérationnels de l'étude

La démarche mise en place dans le cadre de cette étude répond aux objectifs opérationnels suivants :

- ✓ **Affiner le diagnostic air à l'échelle du quartier** en évaluant avec précision les bâtiments et populations touchés par un air dégradé et en **caractérisant finement l'aérologie complexe aux abords du tunnel, afin de guider la mise en place d'actions à court terme** pour protéger et limiter l'exposition des populations impactées,
- ✓ **Evaluer l'évolution de la qualité de l'air de manière prospective et identifier les leviers structurants** permettant de résoudre à terme la situation de dépassements réglementaires des niveaux de polluants sur les zones fragilisées identifiées lors du diagnostic,
- ✓ **Expérimenter et consolider une méthodologie d'étude des zones de vigilance**

2.1.3. Méthodologie mise en œuvre

Air Rhône-Alpes a ainsi mis en œuvre une méthodologie s'appuyant sur la **réalisation de mesures de terrain combinée à de la modélisation numérique fine et très fine échelle**, selon le phasage suivant :

- Réalisation de campagnes de mesures des principaux polluants réglementés (principalement NO₂ et PM₁₀) en air ambiant sur l'ensemble de la zone, avec un maillage renforcé sur plusieurs zones de vigilance (sorties de tunnel, abords d'établissements sensibles). Ces mesures ont pour objectifs :
 - o de compléter la surveillance en continu de la qualité de l'air réalisée sur le long terme,
 - o de mieux caractériser les niveaux de ces polluants en différents secteurs du quartier,
 - o de suivre les évolutions temporelles des concentrations (variations journalières, saisonnières et annuelles),
 - o de comparer les résultats de mesures aux modèles numériques développés par la suite.
- Réalisation de mesures dans l'enceinte d'un établissement sensible accueillant de jeunes enfants (école Michel Servet), en air intérieur dans des classes fréquentées par les enfants et aux abords extérieurs des bâtiments. Ces mesures ont pour objectif d'évaluer l'air intérieur de l'école et d'étudier les transferts de polluants entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments.

- Mise en œuvre d'une modélisation numérique à l'échelle urbaine permettant un diagnostic complet et cartographié avec une résolution de 10m et des simulations prospectives à 5 et 10 ans tenant compte de l'évolution tendancielle du parc automobile roulant.
- Mise en place d'une modélisation numérique spécifique très fine échelle (modèle développé par l'Ecole Centrale de Lyon), permettant de déterminer l'écoulement de l'air autour des bâtiments en sorties du tunnel et la dispersion des polluants en 3D.

2.2. Description des campagnes de mesures réalisées

2.2.1. Dispositif de mesures en air ambiant à l'échelle du quartier

La qualité de l'air a été évaluée sur plusieurs sites de la zone d'étude à l'aide de différents types de dispositifs de mesures complémentaires :

- **1 site fixe installé depuis 2009 dans la cour de l'école Michel Servet**, à proximité des voies de circulation, juste au-dessus de la sortie du tunnel de la Croix-Rousse, côté Rhône. **Ce site de référence** est équipé d'analyseurs pour la **mesure en temps réel et en continu 24h/24h** de polluants réglementés (**NOx, PM10**). Il permet d'assurer de manière pérenne un suivi historique des niveaux de ces polluants et d'en étudier la variation temporelle (annuelle, saisonnière, journalière et horaire).
- **3 sites laboratoires mobiles** équipés du même type d'analyseurs pour la mesure de polluants en continu (**NOx, PM10**), permettant d'étudier la variation temporelle des concentrations sur plusieurs campagnes de mesures, avec des pas de temps pouvant être comparés à ceux de la station de référence.
 - Côté Saône, 1 site mobile a été implanté à l'entrée du tunnel, (avenue Birmingham), et 1 autre site à côté de l'école des Entrepôts à environ 300 mètres du tunnel (en contre bas par rapport à l'avenue de Birmingham, proche des quais de Saône).
 - Côté Rhône, le site investigué se trouvait rue Alsace Lorraine à environ 100 mètres de la sortie du tunnel (devant l'entrée de l'Ecole Michel Servet).
- **29 sites complémentaires ont été équipés de « tubes passifs » pour la mesure du NO₂** (concentration moyennée sur une semaine), avec des campagnes de mesures répétées sur plusieurs semaines. Ces sites ont pour objectif d'étudier la répartition spatiale des concentrations sur un grand nombre de points du domaine d'étude. Certains sites ont été équipés également de **tubes passifs pour la mesure du benzène**.

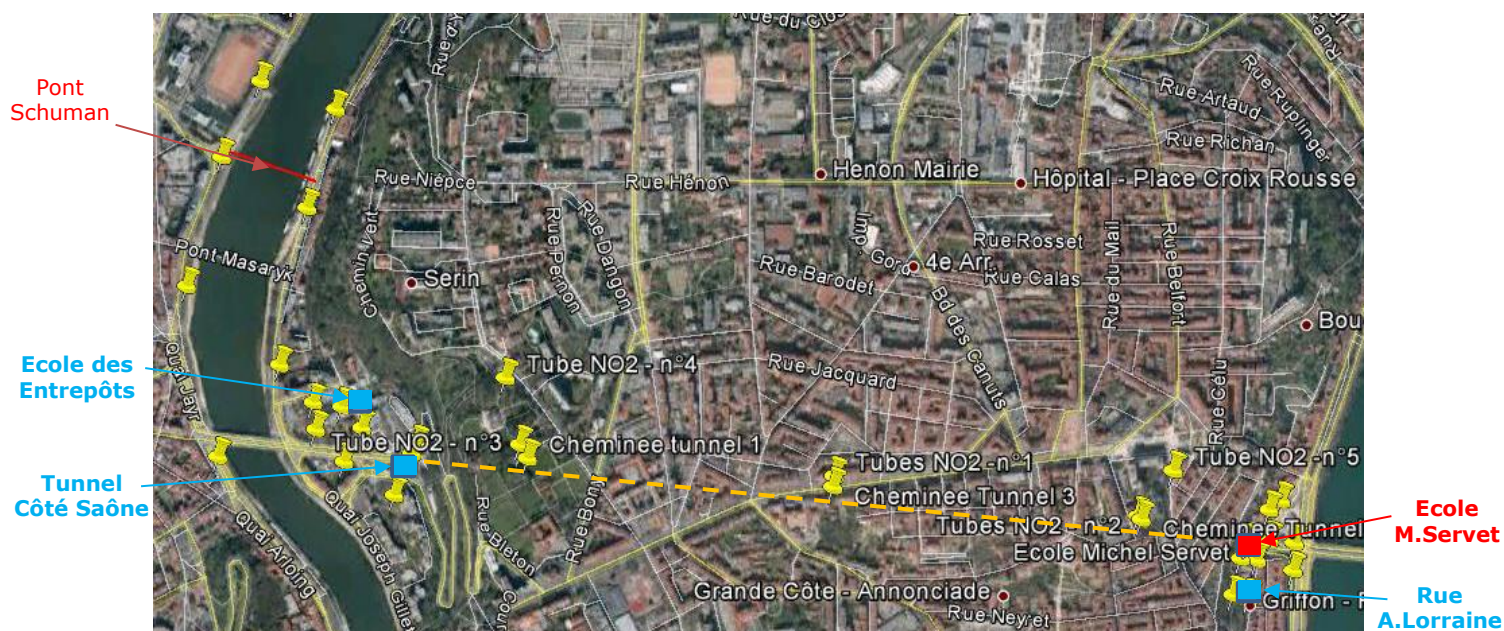


FIGURE 1 - DISPOSITIF DE MESURES : SITES FIXES OU MOBILES ET TUBES PASSIFS

■ 1 Station fixe Michel Servet	Station permanente de mesure NO ₂ , PM	Station de référence européenne	15% incertitude maximum
■ 3 Stations mobiles	Campagnes de mesures NO ₂ , PM	Calage des mesures de campagnes	Les résultats sont comparés à ceux de la station de référence
📍 X Tubes passifs pour évaluer 4 zones	Mesures indicatives de NO ₂	Spatialisation locale du NO ₂	25% à 50% d'incertitude, leur cumul donne une bonne représentativité

	Distance par rapport à l'axe du tunnel	Distance par rapport aux quais
Ecole des Entrepôts	286 m	40 m
Tunnel côté Saône	7 m	240 m
Rue Alsace Lorraine	100 m	135 m
Ecole Michel Servet	24 m	115 m

2.2.2. Dispositif de mesures dans l'école Michel Servet (air ambiant et intérieur)

En complément du dispositif couvrant toute la zone d'étude, des mesures spécifiques ont été réalisées dans l'enceinte de l'école Michel Servet :

- en air ambiant dans les cours d'école et en façade du bâtiment donnant sur la cour haute,
- à l'intérieur des bâtiments de l'école primaire et maternelle, dans plusieurs classes.

Les mesures ont été réalisées à l'aide de tubes passifs pour la mesure du NO₂ et de certains COV (Composés Organiques Volatiles : BTX et ALD¹), et d'appareils portatifs pour la mesure des PM₁₀ et du CO₂ (mesure de confinement à l'intérieur des classes)

Les mesures en air intérieur viennent compléter le diagnostic établi en air extérieur sur l'année 2014 et s'ajoutent aux campagnes de mesures réalisées en 2013 par la Ville de Lyon dans l'air intérieur de l'école

¹ BTX : Benzène, Toluène et Xylènes ; ALD = Formaldéhyde, Acéaldéhyde, Propionaldéhyde, Benzaldéhyde, Isovaléraldéhyde, Valéraldéhyde.

Le dispositif et les points de mesures sont illustrés sur la figure 2 ci-après :

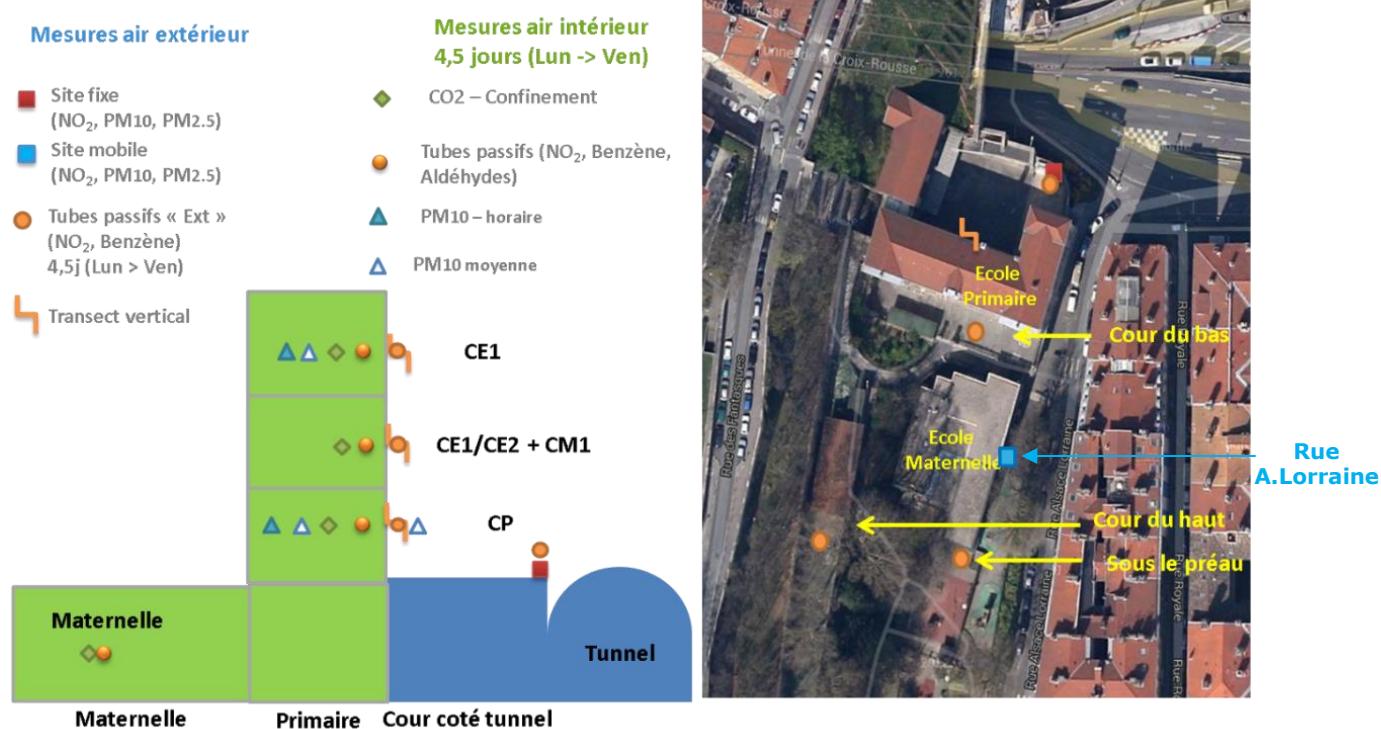


FIGURE 2 - DISPOSITIF DE MESURES DANS L'ENCEINTE DE L'ECOLE MICHEL SERVET

2.2.3. Calendrier des campagnes de mesures réalisées

En application de la directive européenne 2008/50/CE du 21 mai 2008, les mesures réalisées en air ambiant peuvent être comparées aux normes en vigueur à condition d'être réalisées sur une durée minimum de 8 semaines (soit 14% de l'année), réparties au cours de l'année afin d'avoir une représentativité de l'évolution temporelle des niveaux.

Les campagnes réalisées en air ambiant à l'aide de tubes passifs ont été réparties sur 2 périodes de 4 semaines en saisons chaude et froide. Les laboratoires mobiles ont, quant à eux, été installés sur des périodes plus longues de 8 et 6 semaines.

S'agissant des mesures en air intérieur, la réglementation impose une répartition des campagnes de mesures sur 2 périodes d'une semaine, lors d'une période de chauffe (hiver) et d'une seconde hors chauffe.

Les mesures de qualité de l'air intérieur ont été réalisées sur 3 périodes d'une semaine (1 période hors chauffe, 1 période de suivi complémentaire intermédiaire, 1 période de chauffe).

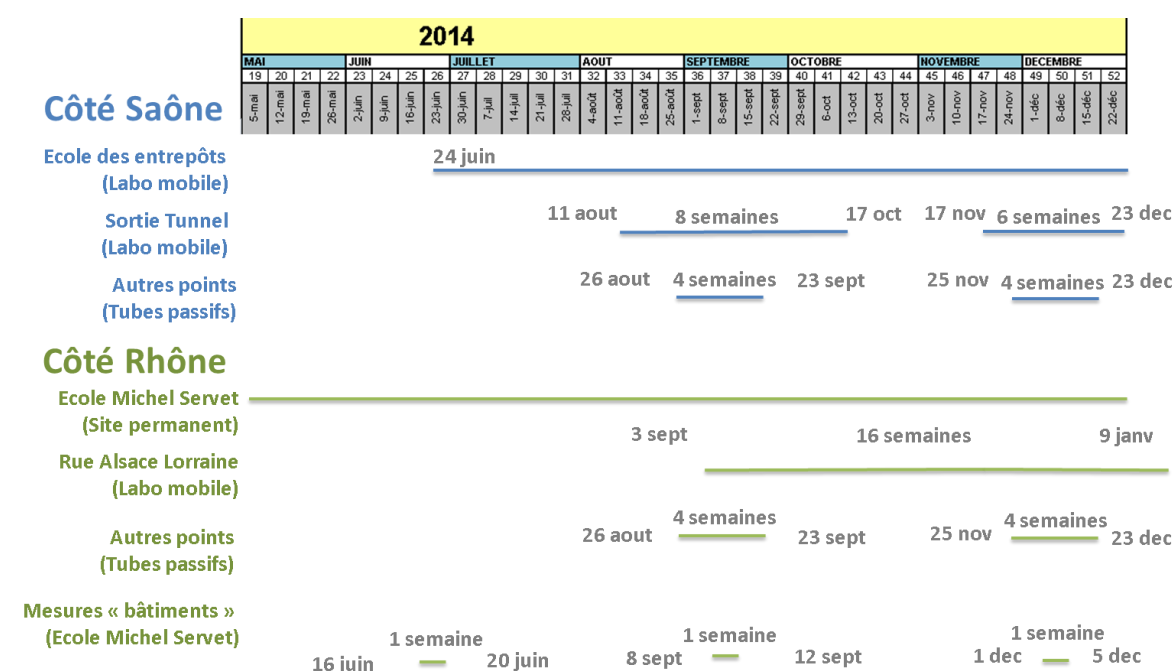


FIGURE 3 - CALENDRIER DE REALISATION DES MESURES

2.3. Les outils de modélisation et d'inventaire d'émissions

2.3.1. Modélisation urbaine fine à l'échelle de la rue

Depuis plusieurs années, AIR Rhône-Alpes développe des outils de modélisation pour cartographier les polluants et évaluer spatialement les zones d'impact où les populations sont exposées à des niveaux importants.

L'outil utilisé pour cette étude est la combinaison du modèle SIRANE¹ avec une résolution de 10mx10m et des résultats à l'échelle régionale issus de la chaîne de modélisation

¹ Soulhac L, Salizzoni P, Cierco FX, Perkins R. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. Atmos Environ. 2011 Dec; 45(39): 7379.95.

Soulhac L, Salizzoni P, Mejean P, Didier D, Rios I. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; PART II, validation of the model on a real case study. Atmos Environ. 2012 Mar; 49(0): 320.37.

régionale d'Air Rhône-Alpes, en faisant intervenir la combinaison de deux types de pollution : celle liée directement aux émissions en proximité trafic et la pollution de fond liée aux autres sources et aux échanges atmosphériques.

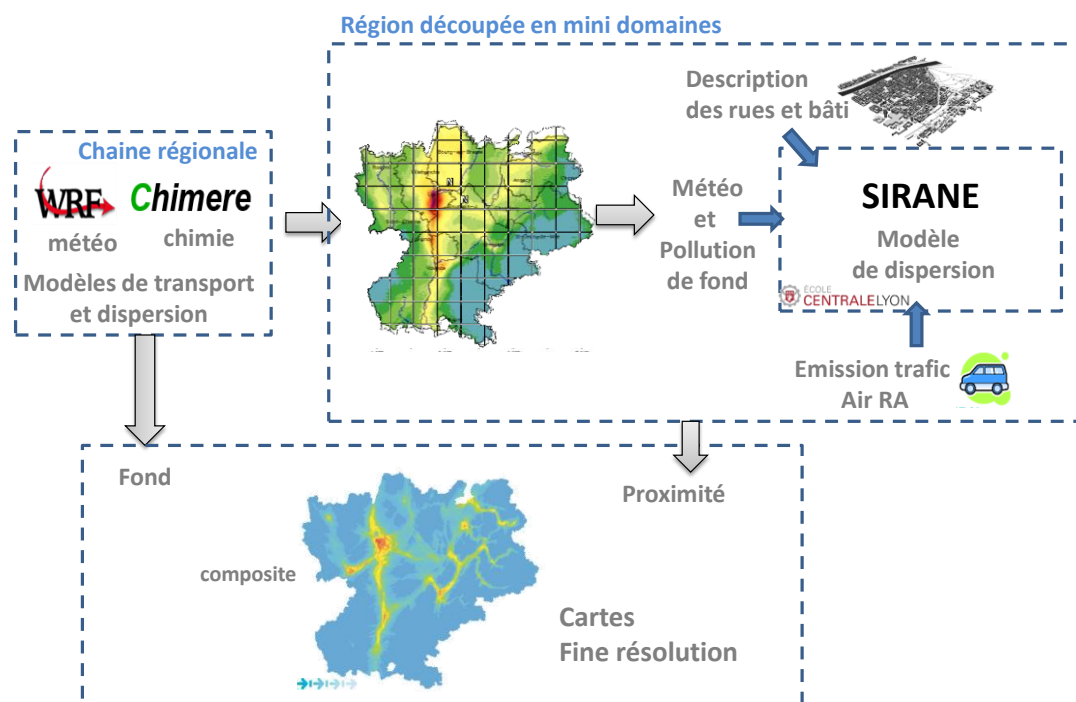


FIGURE 4 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MODELISATION A L'ECHELLE URBAINE

2.3.2. Modélisation 3D à très fine échelle

Afin d'affiner le diagnostic air à réaliser à l'échelle du quartier, Air Rhône-Alpes a fait appel à l'Ecole Centrale de Lyon pour mettre en place une modélisation numérique spécifique très fine échelle, permettant de déterminer l'écoulement de l'air autour des bâtiments en sorties du tunnel et la dispersion des polluants en 3 dimensions.

Pour répondre aux différents besoins de cette étude, la solution de modélisation devait permettre de prendre en compte :

- la complexité géométrique du site (bâtiments, murs, ouvrages tunneliers),
- le relief fortement accidenté (pente de la Croix-Rousse, côté Rhône, particulièrement inclinée),
- les effets de source (vitesse d'éjection des débits en têtes de tunnels),
- la variabilité météorologique (vitesse et direction du vent).

Le domaine d'étude s'étend sur un périmètre d'environ 3,5 km x 2,5 km afin de couvrir les deux quartiers à étudier et le relief du site qui va influencer l'écoulement. Le bâti présent autour des têtes de tunnels dans un rayon de 300 mètres a été représenté dans une maquette 3D avec une attention toute particulière autour des écoles Michel Servet (côté Rhône) et des Entrepôts (côté Saône).

Cette modélisation a permis :

- ✓ de mieux comprendre les écoulements d'air aux sorties de chaque côté du tunnel,
- ✓ d'étudier la contribution des émissions du trafic du tunnel dans les niveaux de concentrations dans l'air ambiant,
- ✓ d'évaluer plus précisément les bâtiments et populations touchés par un air dégradé.



FIGURE 5 - ILLUSTRATION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE 3D UTILISEE DANS LA MODELISATION DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON
(EN HAUT : COTE RHONE – ECOLE MICHEL SERVET ; EN BAS : COTE SAONE – ECOLE DES ENTREPOTS)

2.3.3. Simulations prospectives

Les outils d'inventaire des émissions et de modélisation permettent également de réaliser des simulations prospectives (généralement sur 5 à 10 ans) d'évolution d'émissions de polluants et d'exposition des populations. Ces simulations intègrent dans leurs données d'entrée des perspectives d'évolutions établies par des organismes de référence et/ou des scénarios d'actions envisagées par des décideurs. Ces simulations prospectives peuvent ainsi orienter la prise de décision sur des actions engageantes à long terme en évaluant la situation (gain/perte d'émissions et/ou d'exposition de population) au regard des décisions prises ou de l'évolution tendancielle attendue.

Dans le cadre de cette étude, Air Rhône-Alpes a proposé une évaluation prospective à 2020 et 2025 des gains d'émissions et de réduction des niveaux de polluants pour deux typologies d'échelles : l'une, urbaine, à l'échelle du quartier et l'autre, locale, en sortie du tunnel côté Rhône, zone la plus exposée.

Evaluation à l'échelle urbaine (quartier) : l'objectif de cette simulation est d'évaluer les quantités de polluants qu'il faudrait éviter d'émettre à l'atmosphère pour que les

concentrations en air ambiant respectent les valeurs réglementaires sur l'ensemble du quartier de la Croix-Rousse. Ce travail a été réalisé par Air Rhône-Alpes et s'est appuyé sur :

- des scénarii de projection des parcs automobiles roulant en 2020 et 2025. Des modélisations à l'échelle urbaine (10mx10m de résolution) couvrant tout le territoire de la Métropole de Lyon ont ainsi été réalisées pour l'année 2014 et pour les projections 2020 et 2025.
- des scénarii de restriction de circulation des véhicules en fonction de leur ancienneté, réalisés à partir des données sur les parcs automobiles roulant en 2014 et 2020. A noter que ces scénarii sont basés sur un modèle de calcul d'émissions « simplifié », spécifiquement élaboré dans le cadre de cette étude et adapté à son contexte.

Recherche d'une solution locale (en sortie du tunnel côté Rhône) : l'objectif de cette phase est de comprendre l'aérologie en sortie de tunnel et d'étudier comment une action locale ciblée pourrait diminuer l'exposition des populations proches de la zone la plus affectée.

Ce travail a été réalisé avec l'aide de l'équipe Air Atmosphère Impact & Risk du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'Ecole Centrale de Lyon, avec un modèle d'écoulement très fin (à l'échelle du mètre).

Chacune de ces deux solutions fait intervenir un scénario dit de référence et des scénarii de prospection. Le scénario de référence vise à reproduire les niveaux de concentrations observés sur l'année 2014. Afin de valider les hypothèses de calcul, le scénario de référence est ensuite comparé à l'ensemble des mesures réalisées lors des campagnes de mesures. Cette étape permet d'assurer une bonne représentativité des données d'entrée et processus physico-chimiques dans les prospections envisagées.

3. Résultats à l'échelle du secteur de la Croix-Rousse

3.1. Variation spatiale : quelles zones sont les plus impactées ?

3.1.1. Pour le dioxyde d'azote (NO_2) :

Les mesures en NO_2 par tubes passifs mettent en évidence 4 zones avec des concentrations relativement homogènes en moyenne :

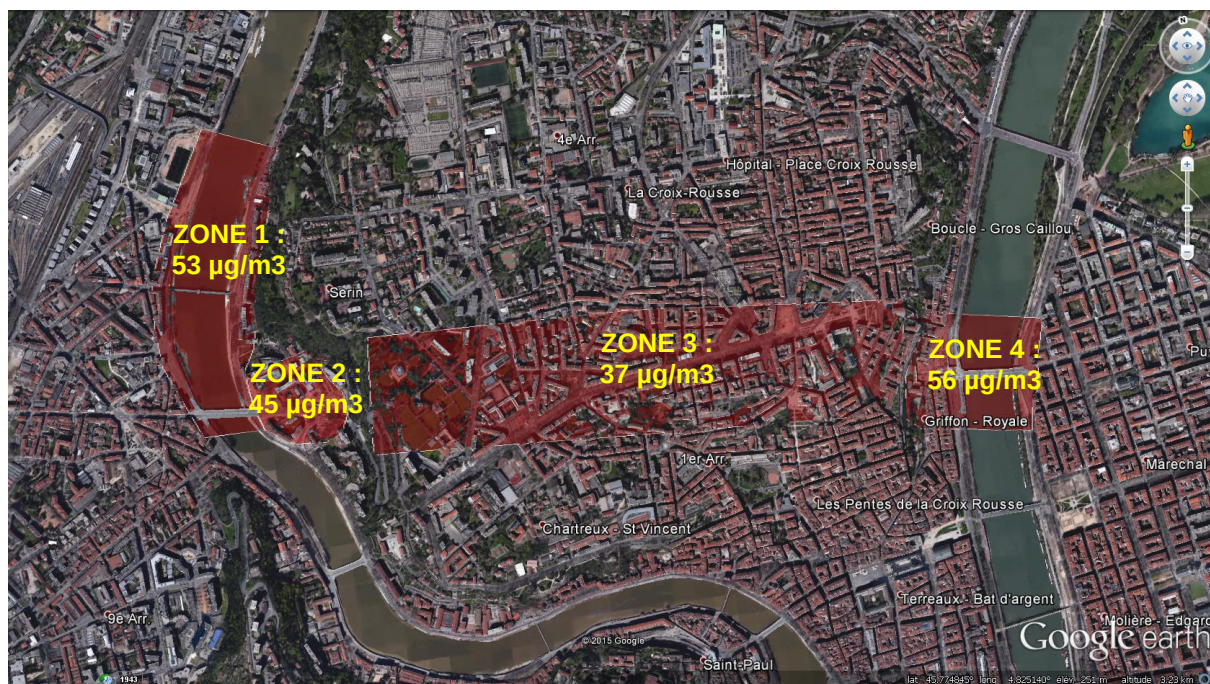


FIGURE 6 - MOYENNES PAR ZONES DES CONCENTRATIONS DE NO_2 MESUREES PAR TUBES PASSIF

Zone 1 - « Quais de Saône » : L'espace situé sur les quais de Saône présente une moyenne de 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour 6 points de mesures). La plupart des tubes passifs sur cette zone ont été placés sur des bâtiments ou sur les trottoirs longeant les quais, à moins de 3 mètres de l'axe routier, ce qui explique les valeurs élevées mesurées. Ces tubes sont donc représentatifs des niveaux quasi-maximum pour une exposition en proximité trafic sur cette partie.

Zone 2 - « Sortie tunnel côté Saône » : La moyenne dans ce secteur est de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 points). Ce côté reste moins exposé que les zones 1 ou 4, du fait d'une aérologie plus favorable et d'une congestion routière moins importante.

Zone 4 - « Sortie tunnel côté Rhône + quais » : Il s'agit de l'endroit le plus exposé, avec une moyenne de 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 points). Ces résultats peuvent s'expliquer par une densité de trafic plus importante coté Rhône mais aussi par une aérologie moins favorable à la dispersion atmosphérique. En effet, la configuration des bâtiments et des rues dans cette zone présente plus de lieux confinés (relief plus marqué proche du tunnel et rues adjacentes, rues canyon).

Ces 3 zones, sous l'influence directe du trafic automobile, dépassent donc la valeur limite annuelle réglementaire de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zone 3 - « Plateau de la Croix-Rousse » : Les moyennes mesurées en 5 points varient de 28 à 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne globale de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La valeur limite est respectée sur cette zone du fait de la distance plus grande par rapport aux axes de circulation et à « l'effet écran » éventuel des façades des immeubles. Les concentrations restent toutefois légèrement plus élevées qu'en fond urbain (moyenne de l'ordre de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les résultats des mesures corroborent ceux de la modélisation : d'après la cartographie des moyennes annuelles en NO_2 , l'exposition à ce polluant est maximale en proximité immédiate des principaux axes routiers (autoroutes, périphériques, grands axes).

NB : La valeur limite annuelle réglementaire pour le NO_2 est fixée à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (zones en rouge sur la carte).

Lyon Métropole

Zoom sur le secteur de la Croix-Rousse

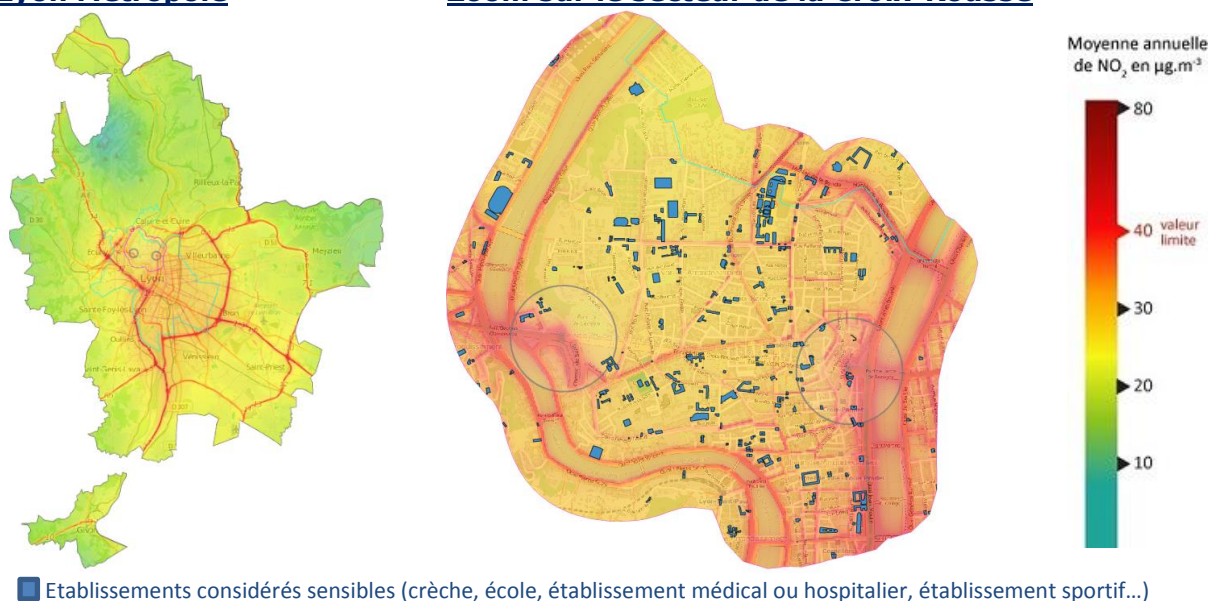


FIGURE 7 : CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE NO_2 EN 2014 SUR LYON ET ZOOM SUR LE QUARTIER DE LA CROIX-ROUSSE

En 2014, environ 6% des habitants de Lyon Métropole (83 000 habitants) ont été exposés à des dépassements de la valeur limite réglementaire en moyenne annuelle pour le NO_2 .

Sur le secteur de la Croix-Rousse, environ 3 500 personnes ont été exposés à des dépassements de la valeur limite en NO_2 sur le lieu d'implantation de leur domicile ; essentiellement autour de l'entrée du tunnel côté Rhône.

3.1.2. Pour les particules PM_{10}

Les particules ayant des origines plus diverses que les oxydes d'azote et une dispersion plus homogène spatialement, la différence de niveaux entre le fond urbain et la proximité automobile est moins nette. C'est pourquoi les concentrations moyennes mesurées de PM_{10} sont relativement homogènes sur l'ensemble des sites de mesures.

Les niveaux enregistrés à partir des 3 sites mobiles sont relativement équivalents entre eux (19 à 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et comparables aux niveaux de fond urbain mesurés à Lyon-Centre.

La station fixe implantée dans la cour de l'école Michel Servet est, quant à elle, légèrement plus exposée que les 3 sites mobiles (28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), tout en respectant la valeur limite annuelle réglementaire de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces résultats (niveaux inférieurs à 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont confirmés par les cartes modélisées (voir ci-après).

A noter :

La valeur limite en moyenne annuelle pour les PM₁₀ est fixée à 40 µg/m³.

La valeur limite en moyenne journalière est fixée à 50 µg/m³, à ne pas dépasser plus de 35 jours dans l'année.

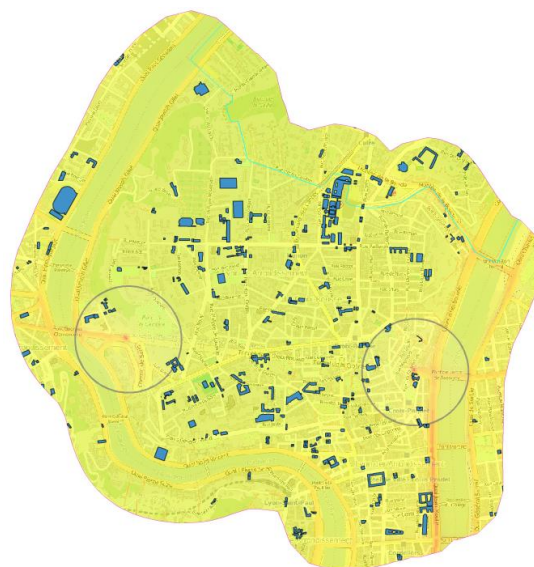


FIGURE 8 : RESULTATS DE MESURES DE PM₁₀ – MOYENNES ANNUELLES

Lyon Métropole



Zoom sur le secteur de la Croix-Rousse



Moyenne annuelle
de PM₁₀ en µg.m⁻³

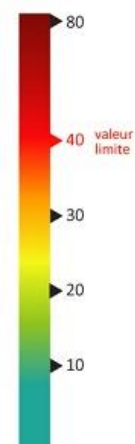
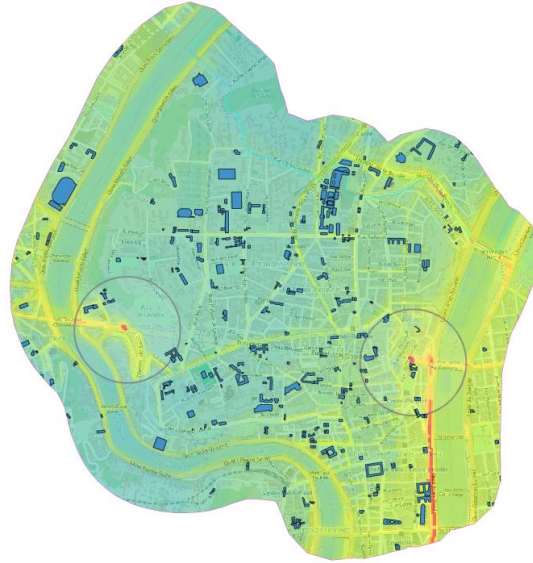


FIGURE 9 : CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN PARTICULES PM₁₀ EN 2014

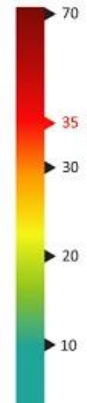
Lyon Métropole



Zoom sur le secteur de la Croix-Rousse



Nombre de jours de dépassement de PM_{10} ($> 50 \mu g/m^3$)



■ Etablissements sensibles (crèche, école, établissement médical ou hospitalier, établissement sportif...)

FIGURE 10 : NOMBRE DE JOURS POLLUÉS¹ AUX PARTICULES PM_{10} EN 2014

En 2014, l'exposition de la population à des dépassements des valeurs limites réglementaires pour les particules PM_{10} a été quasi-nulle, que ce soit en moyenne annuelle (exposition < 400 habitants de Lyon Métropole) ou en moyennes journalières (exposition < 1000 habitants de Lyon Métropole).

En 2014, sur le secteur de la Croix-Rousse, les valeurs limites réglementaires journalières et moyenne annuelle ont été respectées pour les particules PM_{10} .

Il convient toutefois de nuancer le constat établi en 2014, année où les concentrations en particules fines ont été particulièrement faibles dans l'ensemble de la région Rhône-Alpes, en raison de températures hivernales assez douces (qui ont limité les émissions de particules dues au chauffage) et des conditions météorologiques assez dispersives. Les résultats obtenus en 2014 pour les particules fines sont difficilement extrapolables à d'autres années.

Malgré ce contexte favorable, il est à noter que l'exposition de la population reste élevée en proximité immédiate des principaux axes de type autoroutiers et en entrée/sortie des tunnels (zone en rouge sur les cartes).

Au regard du seuil de concentration moyenne annuelle préconisé par l'OMS ($20 \mu g/m^3$), l'exposition des populations aux particules PM_{10} reste assez élevée, puisque les concentrations sur la zone, tout comme sur l'ensemble de la métropole lyonnaise sont comprises dans une gamme de $20 \mu g/m^3$ à $35 \mu g/m^3$.

Ainsi, il est à noter que, en 2014, plus de 90% des grands lyonnais ont été exposés à des valeurs supérieures au seuil préconisé par l'Organisation Mondiale de la Santé (valeur guide, basée sur les effets sur la santé, fixée à $20 \mu g/m^3$ de PM_{10} en moyenne annuelle).

¹ Jour pollué : jour où la concentration journalière est supérieure à $50 \mu g/m^3$. La réglementation limite à 35 fois le nombre de jours où cette concentration peut être dépassée.

3.1.3. Pour les particules PM_{2.5}

Comme pour l'exposition aux particules PM₁₀, l'exposition aux particules plus fines PM_{2.5} a également été limitée en 2014, en raison des températures hivernales assez douces entraînant de plus faibles émissions de particules dues au chauffage et des conditions météorologiques, moins stables que certaines années, plus favorables à une bonne dispersion des polluants.

La valeur limite réglementaire en moyenne annuelle pour les PM_{2.5} est fixée à 26 µg/m³ en 2014 (25 µg/m³ à respecter à partir de 2015).

En 2014, très peu de personnes ont été exposées à des dépassements de la valeur limite réglementaire pour les particules PM_{2.5} (exposition < 300 habitants de Lyon Métropole).

Sur le secteur de la Croix-Rousse, aucun habitant et aucun établissement sensible n'a été exposé en 2014 à des dépassements de la valeur limite réglementaire pour les PM_{2.5}.

En revanche, la quasi-totalité de la population a été exposée à des valeurs supérieures au seuil préconisé par l'OMS pour les PM_{2.5} (valeur guide, basée sur les effets sur la santé, fixée à 10 µg/m³ en moyenne annuelle).

Lyon Métropole

Zoom sur le secteur de la Croix-Rousse

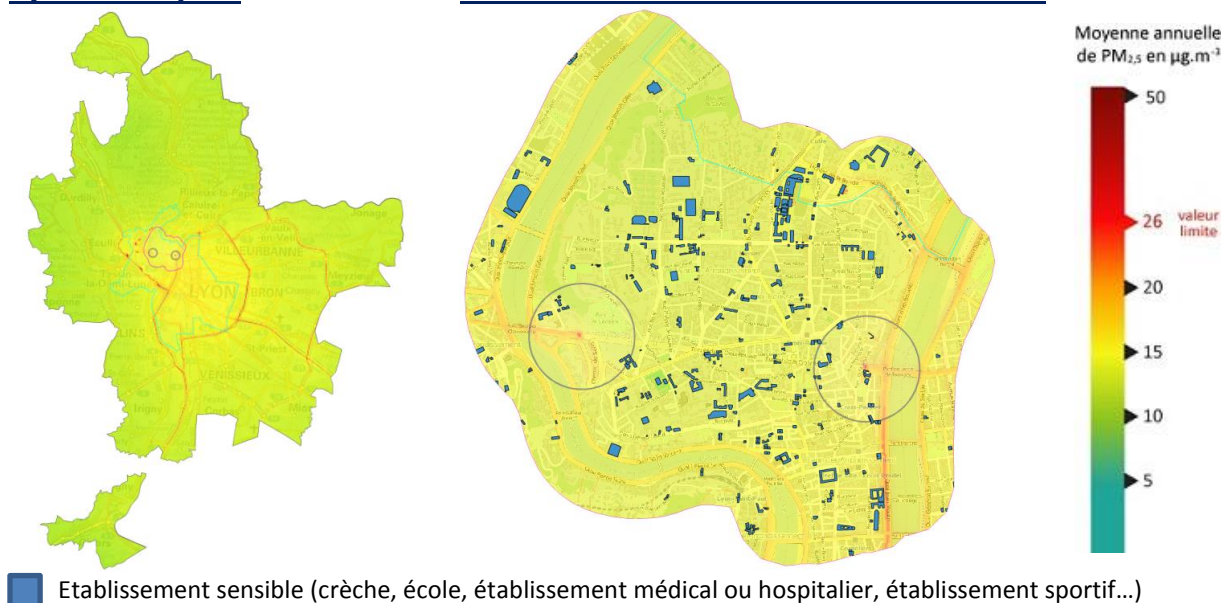


FIGURE 11 : MOYENNES ANNUELLES DE PARTICULES PM2.5 EN 2014

3.2. Variation temporelle : quelle est l'origine des variations de concentrations ?

Les profils de concentrations des moyennes horaires en NO₂ enregistrées sur l'ensemble des campagnes de mesures de l'étude montrent que la sortie de tunnel côté Rhône est plus exposée le matin que le soir et, inversement, que la sortie côté Saône est plus exposée en soirée.

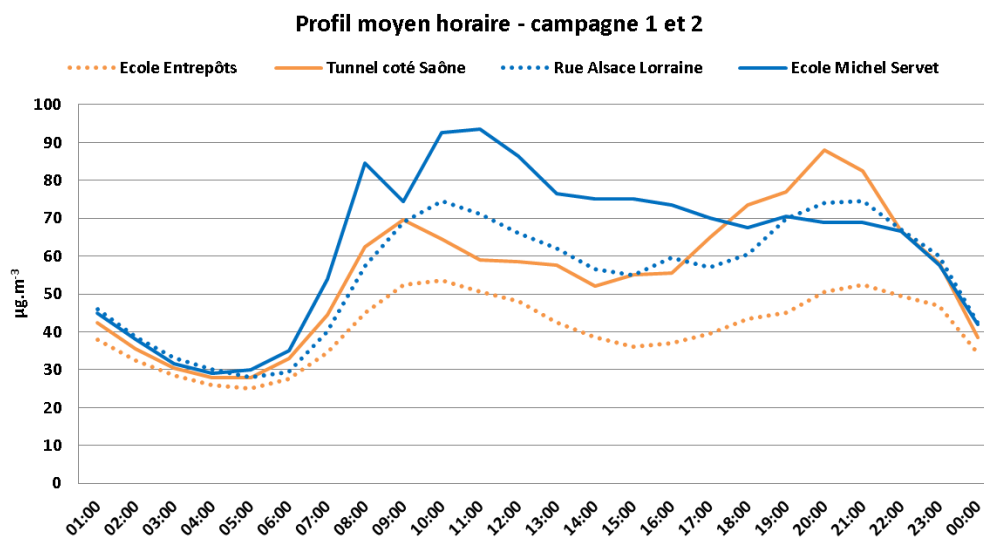


FIGURE 12 - PROFILS MOYENS HORAIRES NO₂ PENDANT LES CAMPAGNES DE MESURES DE L'ETUDE

Plusieurs hypothèses ont été étudiées pour tenter d'expliquer la variation observée des deux côtés du tunnel :

- le système de ventilation du tunnel orienterait-il par alternance soir et matin les polluants en sortie Saône ou Rhône ?
- l'effet de « piston » provoqué par le passage des voitures à l'intérieur du tunnel pousserait-il le flux d'air par alternance ?

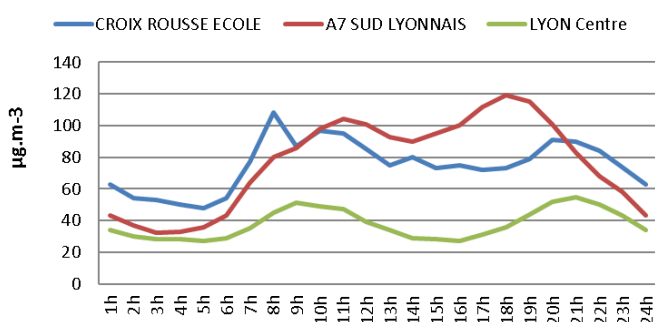
- l'aérologie naturelle extérieure au tunnel de jour et de nuit rabattrait-elle les concentrations sur la station d'un côté du tunnel ?
- une situation du trafic automobile différente et notamment la congestion trafic varierait-elle du matin au soir ?

Il est difficile de vérifier et encore plus de conclure de manière certaine sur l'influence ou l'impact de ces différents facteurs sur les concentrations. Cependant, l'hypothèse de la congestion du trafic par alternance paraît être la plus corrélée aux observations :

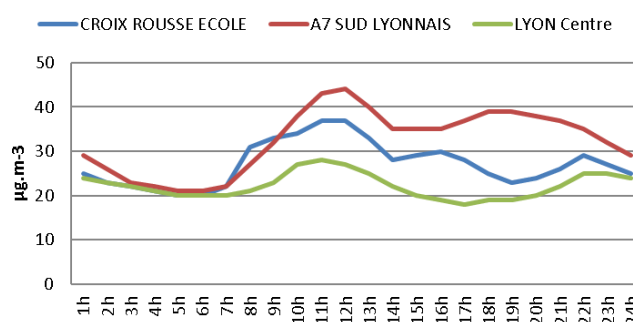
- ➔ les faibles vitesses de vent mesurées en sortie de tunnel écartent a priori l'hypothèse d'une influence notable du système de ventilation.
- ➔ les moyennes élevées en NO₂ mesurées par tubes passifs sur les quais de chaque côté, loin des têtes du tunnel, montrent que le trafic routier influence les concentrations, y compris loin des entrées et sorties du tunnel. Ce qui ne permet pas en tout cas de conclure sur l'effet de « piston ».
- ➔ les roses des vents réalisées à partir du mât météo situé à Caluire ne permettent pas d'expliquer la variation de chaque côté du tunnel. De plus, l'aérologie est très complexe à analyser puisque la proximité des bâtiments et le relief du plateau de la Croix Rousse ne peuvent être négligés. Une modélisation avec une résolution très fine échelle doit être réalisée pour obtenir une analyse aérologique plus approfondie (cf. § 4).
- ➔ en revanche, l'analyse de données trafic issues de boucles de comptages a permis de voir une bonne corrélation entre les profils horaires de débit de véhicules et de concentration en NO₂ dans les deux sens de circulation. Par conséquent, l'hypothèse liée à la variation de la congestion du trafic routier peut expliquer l'origine de l'alternance des concentrations observées.

Les mesures réalisées en continu sur le site fixe Croix-Rousse Ecole (dans la cour de l'école Michel Servet, à proximité immédiate des voies de circulation du tunnel) permettent de confirmer que cette variation de niveaux entre matin et soir est observable, et ce pour chaque saison, sur les profils moyens journaliers de NO₂ et de PM₁₀ :

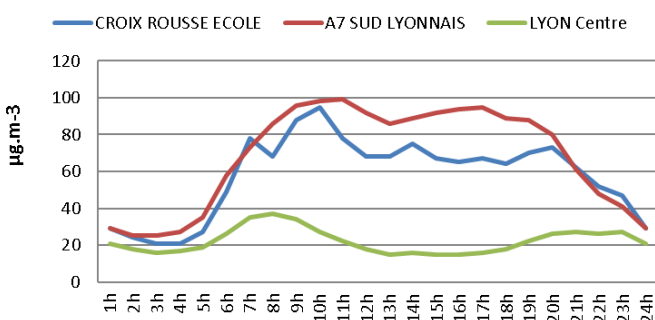
Dioxyde d'azote - profil moyen journalier (les 24h du jour) - Hiver 2014



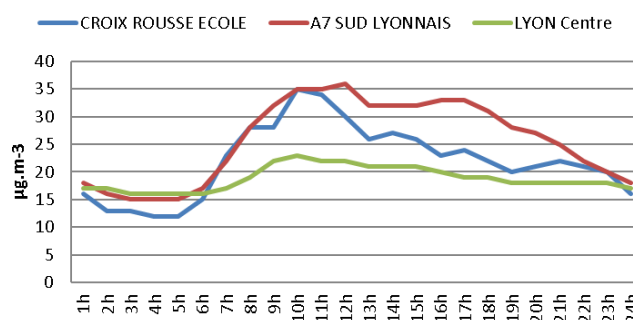
Particules fines PM10 - profil moyen journalier (les 24h du jour) - Hiver 2014



Dioxyde d'azote - profil moyen journalier (les 24h du jour) - Printemps 2014



Particules fines PM10 - profil moyen journalier (les 24h du jour) - Printemps 2014



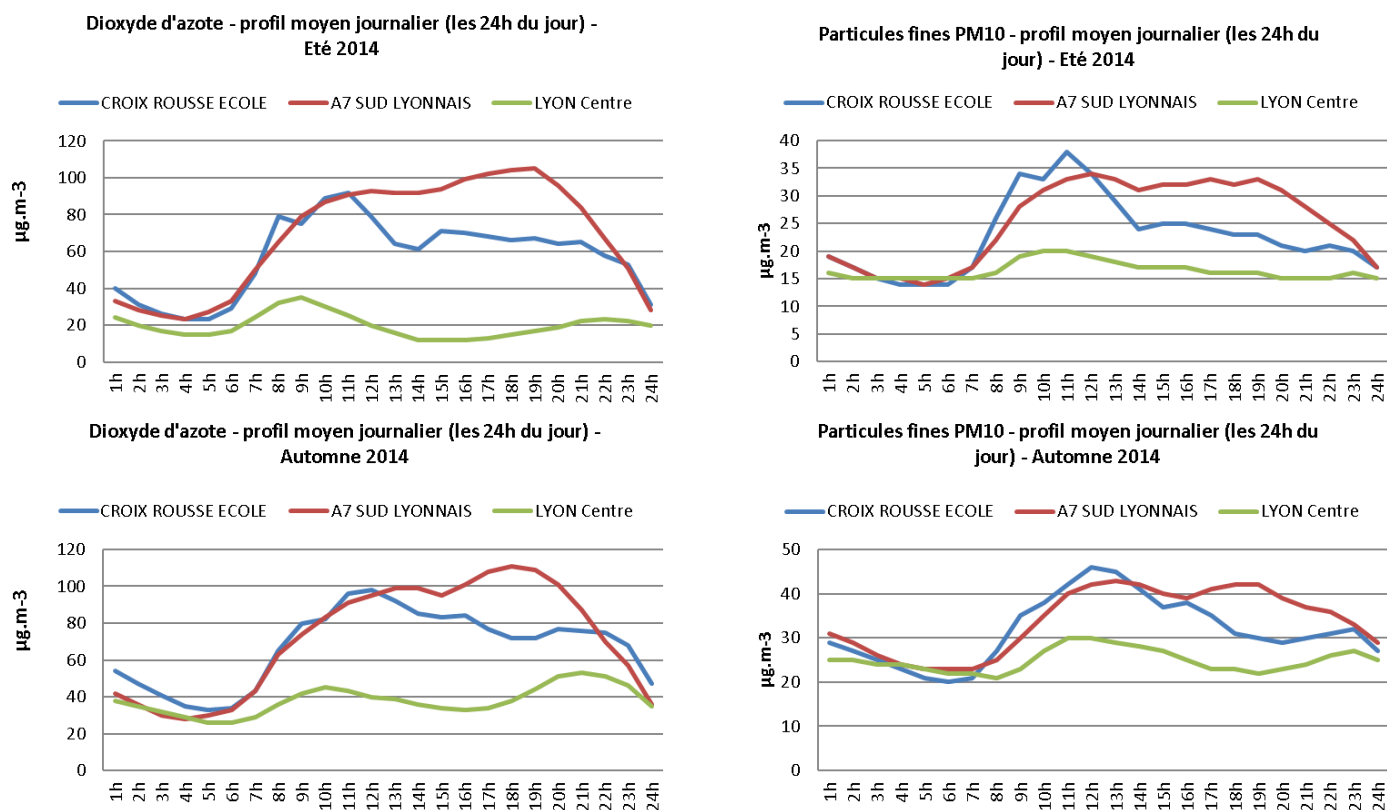


FIGURE 13 - PROFILS MOYENS HORAIRE NO₂ ET PM₁₀ PAR SAISON EN 2014

3.3. Evolution des niveaux de polluants depuis 2009

3.3.1. Rappels historiques contextuels sur le tunnel de la Croix-Rousse

Longueur : 1752 m
Ouverture en 1952
Construction pendant la seconde guerre mondiale (utilisé comme abri pendant les bombardements allemands).

Trafic en 1992 : 79 000 véhicules/jour
Trafic en 2007 : 52 000 véhicules/jour*
Trafic en 2014 : 37 000 véhicules/jour*
* TMJA = Trafic Moyen Journalier Annuel
Poids Lourds non autorisés à partir de 2004



La rénovation du tunnel a démarré à la fin de l'année 2009. La station fixe d'air Rhône-Alpes a été installée dans la cour de l'école Michel Servet à cette même période. A partir de 2010, des fermetures du tunnel ont eu lieu en journée et également la nuit (exceptionnellement, fermeture complète sur toute une semaine) pour l'entretien ou pour la préparation du chantier de rénovation. La fermeture complète du tunnel pour les travaux lourds de rénovation a duré environ 10 mois, entre novembre 2012 et août 2013. La réouverture du tunnel et la remise en circulation du trafic a été effective à la rentrée de septembre 2013.

3.3.2. Evolution des niveaux de dioxyde d'azote (NO₂)

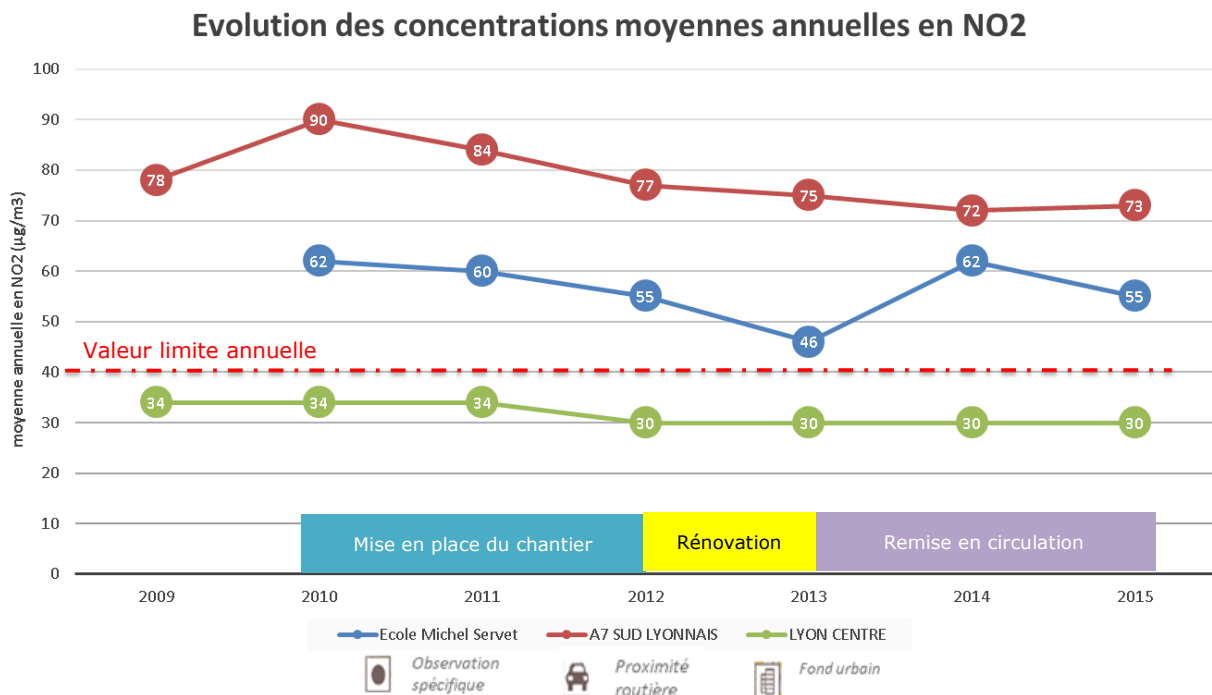


FIGURE 14 – EVOLUTION DES MOYENNES ANNUELLES NO₂ ENTRE 2009 ET 2015

Quel a été l'impact des travaux sur les concentrations de NO₂ ?

Durant la phase de travaux de rénovation du tunnel, le suivi de la qualité de l'air a révélé des niveaux de NO₂ en diminution, mais supérieures à la valeur limite réglementaire, et avec des élévations ponctuelles atypiques de concentrations en particules PM₁₀. Pendant la fermeture du tunnel pour les travaux lourds de rénovation, on constate une nette diminution des concentrations sur le site de l'école Michel Servet, avec un retour des concentrations vers des niveaux de fond, notamment à partir de mars 2013 où il n'y a pas eu de circulation jusqu'en novembre 2013¹.

Quelle est la situation des niveaux de NO₂ depuis la réouverture du tunnel ?

En 2014, la moyenne annuelle en NO₂ sur le site fixe de l'école Michel Servet (62 µg/m³) est équivalente aux niveaux observés pendant l'année 2010. En 2015, la moyenne annuelle a légèrement baissé (55 µg/m³), mais elle reste tout de même au-dessus de la valeur limite réglementaire (fixée à 40 µg/m³).

¹ Suivi de la qualité de l'air de 2009 à 2013 à la sortie du tunnel de la Croix-Rousse : <http://www.air-rhonealpes.fr/publications/suivi-de-la-qualite-de-lair-de-2009-2013-la-sortie-du-tunnel-de-la-croix-rousse-69>

3.3.3. Evolution des niveaux de particules en suspension (PM10 et PM2,5)

Les deux graphiques suivants illustrent l'évolution des concentrations moyennes annuelles en particules fines PM10 et PM2,5 depuis 2009, à la station située en proximité des voies de circulation routière dans l'école Michel Servet, comparativement à la station A7 Sud Lyonnais (station de typologie trafic, située en proximité de l'autoroute A7) et à la station Lyon centre (station de typologie urbaine, caractéristique des concentrations de fond en polluants à Lyon).

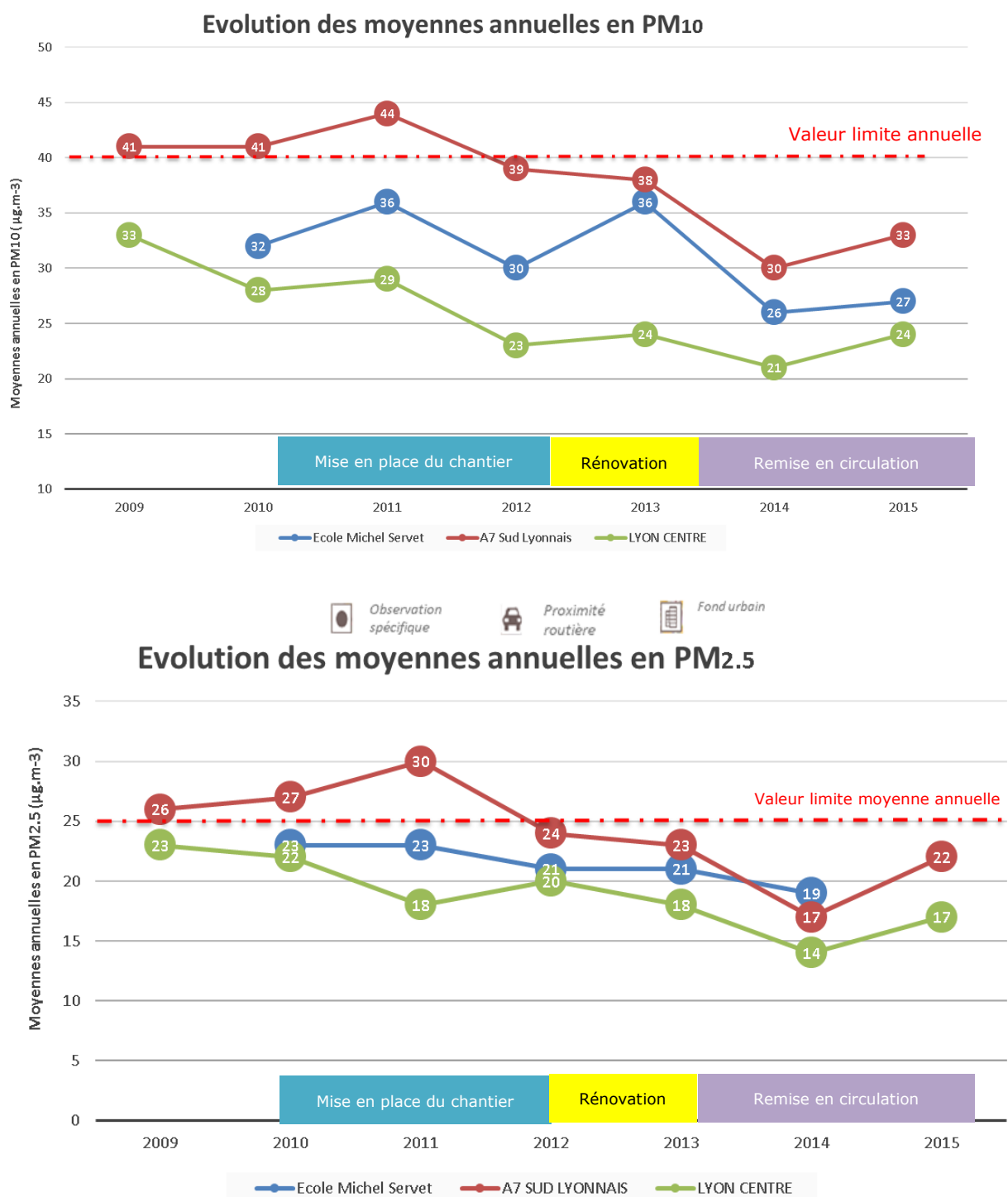


FIGURE 15 – EVOLUTION DES MOYENNES ANNUELLES PM10 ET PM2.5 ENTRE 2009 ET 2015

L'observation de ces évolutions permet de répondre à un certain nombre de questions :

Quel est l'impact des travaux sur les niveaux en particules ?

Pendant les travaux, en 2013, les niveaux moyens de PM₁₀ ont augmenté, avec des dépassements du seuil d'information journalier plus fréquents (moyennes journalières > 50 µg/m³). Conjointement, les niveaux en PM_{2.5} sont restés stables entre 2012 et 2013. Ces résultats montrent que les travaux de rénovation ont généré des particules en suspension, principalement plus grosses que les PM_{2.5}.

Quelle est la situation des niveaux de particules (vis-à-vis des seuils réglementaires) depuis la réouverture du tunnel ?

En 2014, la valeur limite réglementaire en moyenne annuelle est respectée pour les PM₁₀ et les PM_{2.5} sur tous les sites. En 2015, les niveaux augmentent légèrement, mais toujours en respectant les valeurs limites annuelles.

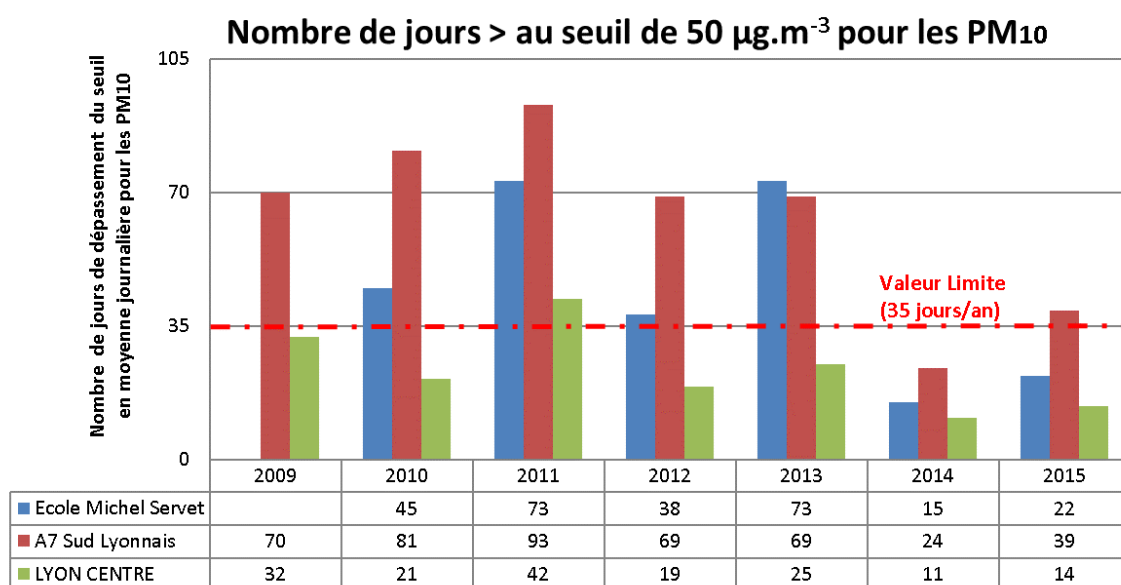


FIGURE 16 – EVOLUTION DU NOMBRE DE DEPASSEMENTS JOURNALIERS POUR LES PM₁₀ ENTRE 2009 ET 2015

En moyenne journalière, le nombre de dépassements du seuil de 50 µg/m³ observé pour les PM₁₀ est moins important en 2014 que les années précédentes. En effet, les conditions météorologiques de cette année-là ont été plus douces et donc favorables à la limitation des émissions de polluants dans l'atmosphère. Cette forte diminution du nombre de dépassements réglementaires a été observée sur l'ensemble des stations de la région Rhône-Alpes. En 2015, le nombre de dépassements journaliers est légèrement plus élevé qu'en 2014, mais il reste en nette diminution par rapport aux années précédentes, tout en respectant la valeur limite annuelle (seuil à ne pas dépasser plus de 35 jours par an), sauf sur le site trafic A7 Sud Lyonnais. La fin de l'année 2015 a été exceptionnellement chaude, avec un pic de chaleur en novembre et le mois de décembre le plus chaud sur la période 1900-2015.

Ces résultats tendent à conclure que la diminution des niveaux des PM₁₀ sur le site de l'école Michel Servet est plus liée à des conditions météorologiques particulières en 2014 et 2015 qu'à un impact moins important du trafic dans le tunnel.

Et par rapport à l'étude menée en 2008 aux abords du tunnel, retrouve-t-on les mêmes conclusions ?

Pour le dioxyde d'azote, la conclusion de l'étude prospective¹ menée en 2008 montrait que la rénovation du tunnel de la Croix-Rousse ne devrait entraîner ni une dégradation, ni une amélioration de la qualité de l'air à la sortie du tunnel. Au regard des niveaux mesurés en 2014 et 2015, cette conclusion se vérifie aujourd'hui.

Pour rappel également, l'étude réalisée par Air Rhône-Alpes en 2007 a montré que les concentrations à proximité des cheminées du tunnel étaient comparables aux niveaux de fond urbain ou légèrement influencées par les grands axes (Montée des Esses, Bd de la Croix-Rousse, ...), mais elles ne portaient pas de « signature » particulière pouvant être liée aux émissions routières du tunnel.

3.4. Modélisations urbaines prospectives aux horizons 2020 et 2025

3.4.1. Simulations réalisées selon des hypothèses tendanciennes d'évolution du parc automobile roulant

Les outils de modélisation d'Air Rhône-Alpes ont permis de simuler 2 scénarii prospectifs à l'horizon 2020 et 2025. Les données d'entrée utilisées sont identiques à celles prises pour la modélisation de la qualité de l'air 2014, sauf pour les données relatives à la composition du parc automobile roulant (âge et motorisation des véhicules), qui sont estimées ici selon les scénarios d'évolutions tendanciennes prospectives nationales. Ainsi, les paramètres tels que les « niveaux de fond » de polluants, les conditions météorologiques de l'année, le volume et les conditions de trafic routier (volume de trafic, voiries, sens de circulation, niveaux de congestion, feux etc...) ont été laissés identiques à ceux pris pour la simulation des niveaux de l'année 2014.

La figure 16 en page suivante illustre les résultats obtenus en termes de concentrations de NO₂ et de particules fines PM₁₀ et PM_{2,5} sur le quartier de la Croix-Rousse en 2014, 2020 et 2025.

¹ [Etude de la qualité de l'air sur la colline de la Croix-Rousse \(2008\)](#)

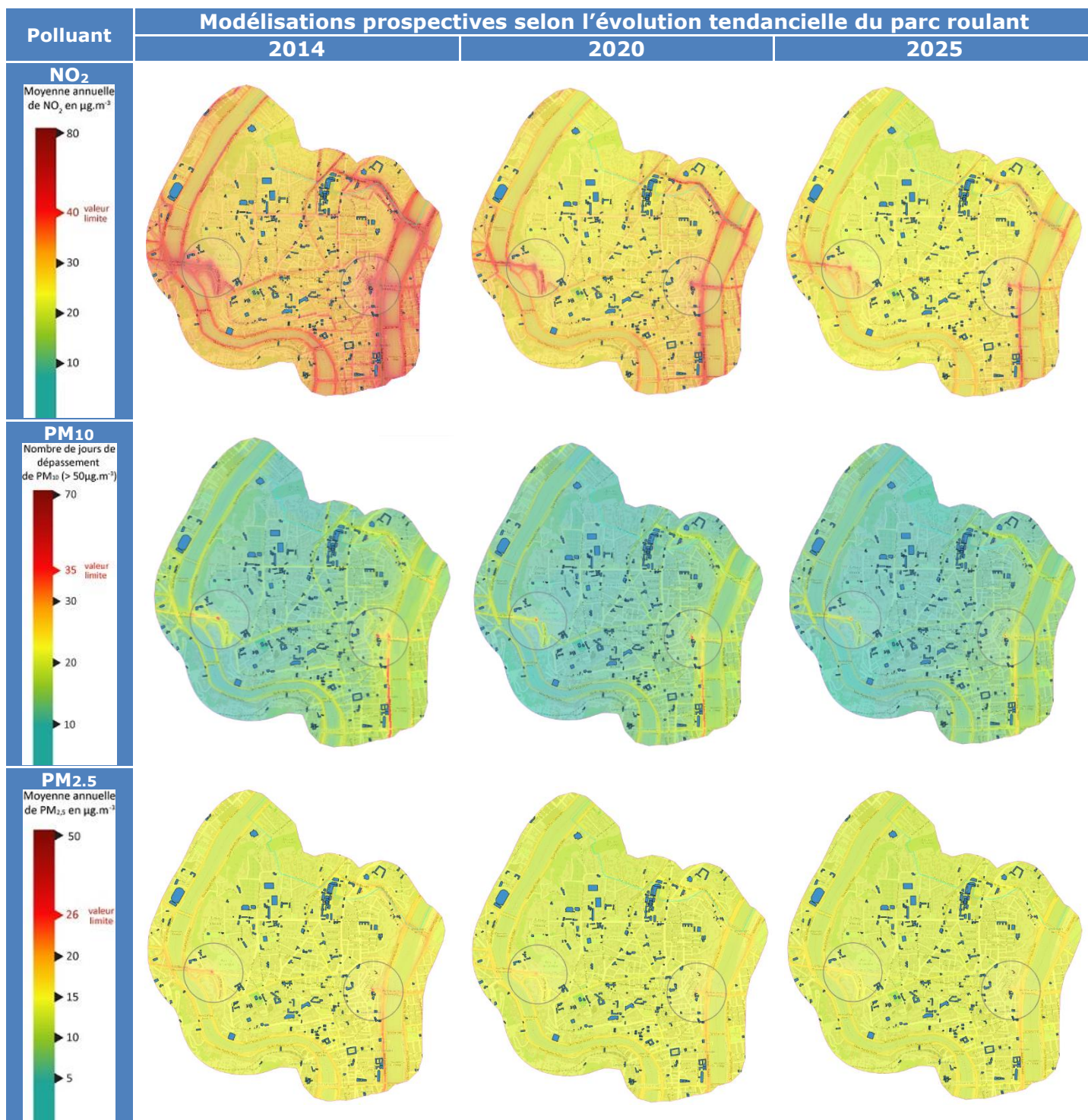


FIGURE 17 – EVOLUTION TENDANCIELLE DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION AUX CONCENTRATIONS DE POLLUANTS SUR LE SECTEUR DE LA CROIX-ROUSSE POUR 2014 ET AUX HORIZONS 2020 ET 2025

Les simulations réalisées montrent une évolution favorable des niveaux de polluants avec l'amélioration attendue des motorisations du parc roulant aux horizons 2020 et 2025, toute chose étant égale par ailleurs. Les améliorations technologiques du parc automobile attendues pour 2020 et 2025 conduiraient à réduire fortement l'exposition des populations, en particulier pour le dioxyde d'azote dont les émissions sont fortement liées aux échappements des véhicules (donc à la motorisation des véhicules), ce qui est moins le

cas pour les concentrations en particules fines PM10 et PM2,5 qui sont quant à elles à la fois liées aux émissions à l'échappement des véhicules, mais également aux émissions liées à l'abrasion, à l'usure des freins, des pneumatiques et de la remise en suspension des particules fines lors du passage du trafic sur la voirie.

D'après ces hypothèses prospectives, la baisse moyenne possible des concentrations du NO₂ sur le secteur de la Croix-Rousse est estimée à -15% en 2020 et -24% en 2025 (réduction de 5 µg/m³ à plus de 20 µg/m³ selon les secteurs).

L'exposition de la population à des dépassements de la valeur limite réglementaire en NO₂ passe de près de 3500 habitants exposés en 2014 à environ 150 habitants exposés en 2020 (réduction de 95%) et quasiment aucun en 2025 (estimation réalisée avec des hypothèses démographiques constantes entre 2014 et 2020/2025).

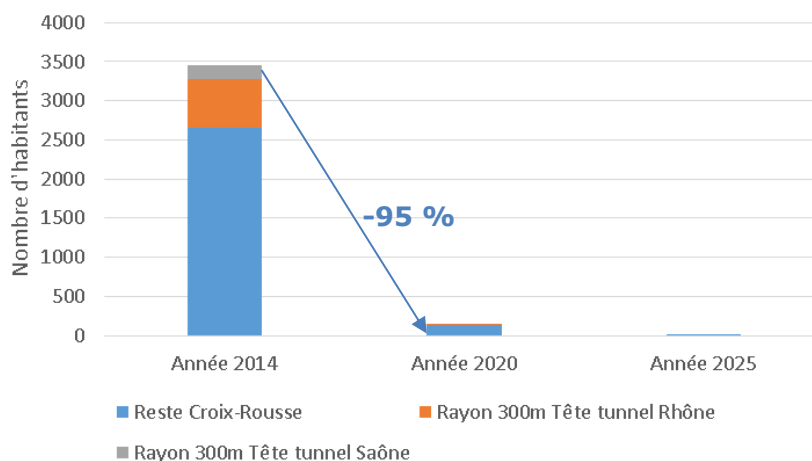


FIGURE 18 : EVOLUTION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS AU NO₂ SUR LA CROIX-ROUSSE ENTRE 2014 ET 2025

Toutefois, les secteurs de la sortie du tunnel côté Rhône et des quais du Rhône restent des zones parmi les plus exposées du quartier de la Croix-Rousse. Malgré l'amélioration attendue avec les hypothèses d'évolution du parc roulant en 2020, les niveaux de dioxyde d'azote resteraient supérieurs à la valeur limite annuelle réglementaire sur le site de l'école primaire Michel Servet et ne seraient en deçà de ce niveau qu'avec des hypothèses d'évolution de parc roulant estimées pour 2025.

Les simulations réalisées montrent par ailleurs qu'il est nécessaire de réduire au minimum de 40% les émissions d'oxydes d'azote liées au trafic sur le secteur de la Croix-Rousse pour que 95% des résidents exposés à des niveaux supérieurs aux seuils réglementaires ne le soient plus.

Toutefois, en supposant une réduction de 40% des émissions de NO_x effective pour l'année 2020, l'entrée du tunnel coté Rhône reste encore exposée à des dépassements des valeurs limites pour le dioxyde d'azote. **Les simulations montrent qu'il faudrait atteindre une réduction d'environ 63% des émissions de NO_x pour que l'exposition au niveau de la cour de l'école Michel Servet respecte les valeurs réglementaires.**

Ces analyses confirment la qualification de cette zone comme étant une « zone à enjeux prioritaires ». Sa résorption, visant à diminuer l'exposition des résidents et des personnes fréquentant les bâtiments qualifiés de « sensibles » à un horizon plus proche, doit prendre en considération des mesures ambitieuses, localement ou plus globalement à l'échelle de l'agglomération.

Pour les particules, l'exposition de la population simulée à l'horizon 2020 et 2025 est également très réduite sur l'ensemble du secteur et aucun résident de la Croix-Rousse n'est exposé à des dépassements de valeurs limites (ce qui est déjà le cas dès 2014).

En particulier, pour les PM10, les hypothèses prises sur les conditions météorologiques sont très favorables à une bonne dispersion des polluants et conduisent à conclure au

respect des niveaux réglementaires pour les 3 scénarios (2014, 2020 et 2025) sur l'ensemble du secteur de la Croix-Rousse.

3.4.2. Simulation d'un dispositif de restriction de circulation des véhicules en fonction de l'ancienneté (restriction par norme Euro)

L'objectif de ce test de sensibilité de réduction du trafic est de simuler les effets liés à une restriction de circulation sur les niveaux de polluants attendus à la station située dans l'école Michel Servet, point le plus exposé de la zone d'étude.

En d'autres termes, il s'agit de répondre à la question suivante : **Quel niveau de restriction de circulation des véhicules, selon la norme euro, pourrait conduire à atteindre des concentrations en dioxyde d'azote inférieures à la valeur limite annuelle réglementaire de 40 µg/m³ au point de mesure situé dans l'école Michel Servet ?**

Pour cela, Air Rhône-Alpes a utilisé une approche d'estimation simplifiée, basée sur des calculs d'émissions réalisés à partir des données du trafic sur le secteur, et avec de fortes hypothèses sur une relation émissions/concentrations (qui ne correspondent pas à la réalité et ne peuvent être extrapolées). Ces simulations simplifiées ont été réalisées pour le dioxyde d'azote uniquement sur le point le plus exposé du domaine de la Croix Rousse.

Type de scenario	Concentration moyenne annuelle NO ₂ à l'école Michel Servet évaluée avec le modèle simplifié	
	en 2014	en 2020
Scenario 1 : Restriction véhicules Euro 0	65 µg/m ³	49 µg/m ³
Scenario 2 : Restriction véhicules Euro 0 et 1	63 µg/m ³	49 µg/m ³
Scenario 3 : Restriction ≤ Euro 2	60 µg/m ³	48 µg/m ³
Scenario 4 : Restriction ≤ Euro 3	45 µg/m ³	43 µg/m ³
Scenario 5 : Restriction ≤ Euro 4	30 µg/m³	35 µg/m³
Scenario 6 : Restriction ≤ Euro 5	19 µg/m³	23 µg/m³

Les résultats des calculs montrent qu'une action de restriction de circulation sur le quartier de la Croix-Rousse uniquement, contraignante jusqu'à la norme Euro 3 et sur tous les types de véhicules, permettrait une amélioration notable de la qualité de l'air dès 2014. Cependant, seule une restriction jusqu'à la norme Euro 4 et pour tous types de véhicules (en considérant les véhicules de norme <ou = EURO 4 supprimés et non remplacés) sur le quartier de la Croix-Rousse, permettrait d'abaisser les concentrations à la valeur limite annuelle réglementaire pour le NO₂ au niveau de l'école Michel Servet dès 2014. Ceci impliquerait d'exclure les véhicules antérieurs à 2011 de la zone, sans les remplacer, ce qui correspond à retirer de la circulation approximativement 78% des véhicules particuliers sur le secteur.

Ces estimations montrent donc que pour atteindre dès 2015 le seuil réglementaire en dioxyde d'azote au niveau de l'école Michel Servet, une mesure de restriction de circulation sur le seul périmètre du quartier semble irréaliste dans sa mise en œuvre. Un périmètre d'actions plus large, éventuellement articulé avec des zones d'actions plus locales serait davantage pertinent, afin de diminuer les niveaux globaux de dioxyde d'azote dans la Métropole de Lyon.

4. Résultats des mesures dans l'école Michel Servet

4.1. Mesures air extérieur/air intérieur

L'objectif de cette partie est d'estimer si les niveaux de NO₂ et PM₁₀ mesurés en air extérieur et en air intérieur au sein de l'école Michel Servet sont dans les mêmes ordres de grandeurs, afin d'évaluer les niveaux de transfert entre l'extérieur et l'intérieur.

4.1.1. Dioxyde d'azote (NO₂)

Des mesures en dioxyde d'azote ont été effectuées à l'extérieur et à l'intérieur de l'école Michel Servet à l'aide de tubes passifs.

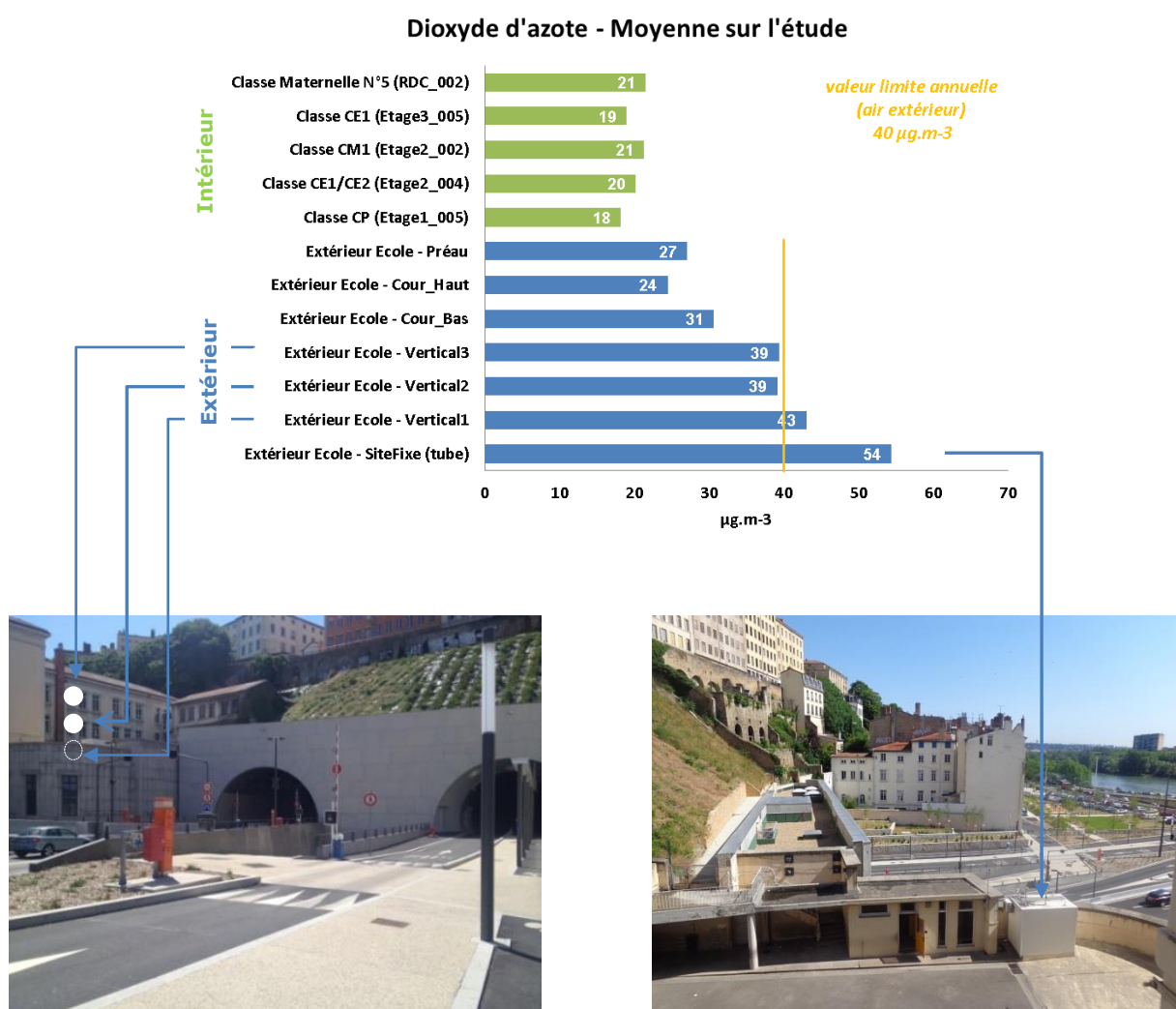


FIGURE 19 – RESULTATS DE MESURES DE DIOXYDE D'AZOTE EN AIR EXTERIEUR / AIR INTERIEUR DANS L'ECOLE MICHEL SERVET

Les niveaux enregistrés en **air intérieur** se situent tous autour de 20 µg/m³. Cette gamme de niveau est habituellement observée pour des habitations situées à plus de 50 m de la voirie¹, tandis que dans le cas de l'école Michel Servet, la proximité à l'axe routier est

¹ Rapport OQAI : [Inventaire des données Française sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments](#) 1990-2001

directe. On peut donc qualifier les niveaux de NO₂ mesurés en air intérieur dans l'école comme étant relativement bas.

Les concentrations en **air extérieur** mesurées dans les cours d'école situées du côté le plus éloigné du tunnel sont légèrement plus élevées (préau : 27 µg/m³ ; cour du bas : 31 µg/m³ ; cour du haut : 31 µg/m³), mais restent inférieures à la valeur limite annuelle réglementaire fixée à 40 µg/m³.

En revanche, les concentrations moyennes mesurées dans la cour la plus proche du tunnel sur le point vertical 1 et la station fixe de mesures située dans la cour de l'école, à proximité des voies de circulation, dépassent la valeur limite annuelle réglementaire, avec un niveau maximal enregistré sur le site fixe de 54 µg/m³. Les concentrations mesurées dans cette même cour sur le transect vertical 2 et 3 frôlent la valeur limite annuelle réglementaire de 40 µg/m³, sans la dépasser.

L'ensemble de la cour coté tunnel semble donc exposée à des niveaux supérieurs à la valeur limite annuelle réglementaire.

En première action, il est donc préconisé de restreindre au maximum les activités des enfants dans la cour à proximité du tunnel.

La différence de concentration mesurée entre les étages à l'intérieur et l'extérieur conduit à l'hypothèse d'un faible passage du polluant de l'extérieur vers l'intérieur. Cette hypothèse est à utiliser avec précaution, puisque le niveau de dioxyde d'azote en intérieur dépend aussi du taux de confinement et de la présence de COV (Composés Organiques Volatils) à l'intérieur (voir 4.2. : résultats en air intérieur).

4.1.1. Particules fines (PM₁₀)

Des mesures de particules PM₁₀ ont été réalisées à l'intérieur de 2 classes : CP au 1^{er} étage et CE1 au 3^{ème} étage. En simultanée, une troisième mesure a été effectuée à l'extérieur, dans la cour la plus proche du tunnel (vertical 1).

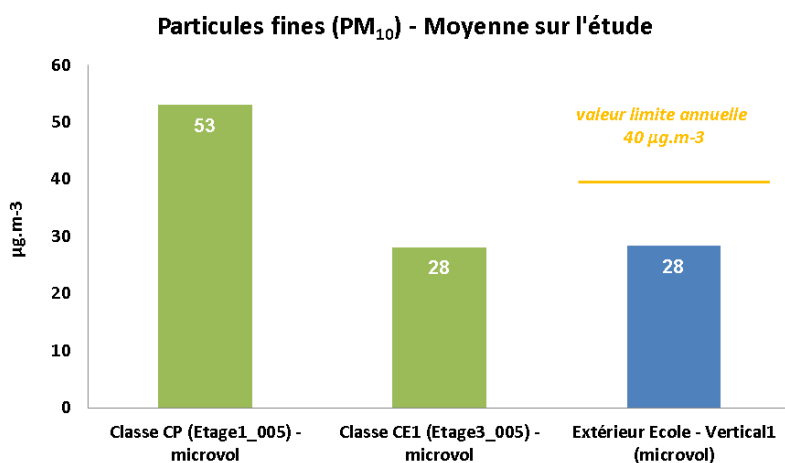


FIGURE 20 – MOYENNE PARTICULES FINES (PM₁₀) AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR

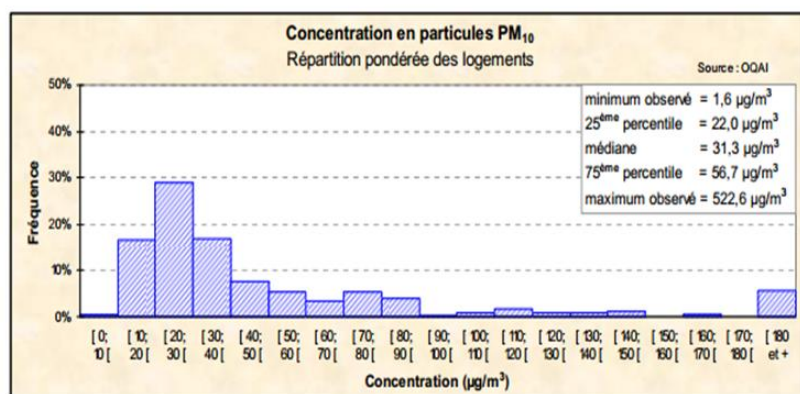


Figure 4 : Concentrations intérieures en PM₁₀ dans les résidences principales de France métropolitaine

FIGURE 21 -GRAPHIQUE ISSU DU RAPPORT AFSSET - VGAI- PM SUR 297 LOGEMENTS - MESURES OQAI (2003-2005)

Les concentrations mesurées en air intérieur dans la classe au 3^{ème} étage sont équivalentes à celle mesurée en extérieur sur le site vertical 1 (28 µg/m³). En revanche, les niveaux mesurés dans la classe de CP au 1^{er} étage sont presque 2 fois plus élevées (53 µg/m³). En comparant ces résultats à ceux de l'étude réalisée par l'AFSSET sur 297 logements¹, on peut conclure que ces niveaux se situent dans la gamme des concentrations « hautes » observées (75% des logements ont des niveaux inférieurs à 56,7 µg/m³).

Au cours de l'étude, un questionnaire « air intérieur » a été remis au personnel de l'école, en particulier au service de nettoyage, afin d'enseigner les pratiques à l'intérieur des pièces pour chaque heure de la semaine et de pouvoir les corréler aux concentrations horaires mesurées. Ceci a permis de mettre en évidence que **les concentrations élevées de PM10 mesurées dans les classes ne seraient pas spécifiquement liées aux conditions extérieures, mais seraient davantage liées à une remise en suspension des poussières lors des opérations de balayage réalisé à sec dans les classes.**

Au regard des résultats concernant les niveaux de PM10 dans une des classes, il est préconisé de favoriser un nettoyage humide régulier des classes afin de limiter la remise en suspension des poussières et d'en assurer un lessivage efficace.

4.2. Autres polluants mesurés en air intérieur

Les sources de pollution dans les écoles sont nombreuses : matériaux de construction, meubles, produits d'entretien, peintures, etc. La multiplicité des produits utilisés pour l'entretien des locaux, l'hygiène des enfants ou les activités est une hypothèse communément avancée pour expliquer les concentrations intérieures parfois élevées en composés organiques volatils dans les écoles. Les études d'air intérieur font intervenir principalement la mesure du dioxyde de carbone (CO₂) pour l'évaluation du confinement des pièces, ainsi que du formaldéhyde et du benzène comme polluants réglementés.

L'indice de confinement mesuré avec le dioxyde de carbone montre que deux classes (CP et CE1/CE2), situées du côté de la cour exposée, ont un confinement important (indice = 4). Cet indice de confinement élevé est lié à un manque de ventilation des pièces concernées, certainement dû à la proximité des nuisances air et bruit issues du trafic du tunnel, n'incitant pas à l'ouverture manuelle des classes. La classe de maternelle (située vers la cour sud) est quant à elle la moins confinée, avec un indice de 2, ce qui confirme l'hypothèse précédente.

¹ Etude réalisée dans le cadre de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (dans des séjours)

Les concentrations en formaldéhyde enregistrées durant cette étude sont inférieures à la valeur guide (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à atteindre au 1er janvier 2015). De plus, ces concentrations sont comparables à celles mesurées lors de l'étude réalisée par la ville de Lyon en 2012/2013. On peut en conclure une absence de lien direct entre la présence du trafic du tunnel et les niveaux de formaldéhyde dans les classes.

Les niveaux de benzène mesurés dans les classes de l'école Michel Servet sont bas et respectent la valeur limite de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Néanmoins, il est à noter que les concentrations mesurées dans les classes sont plus élevées que celles mesurées dans l'air ambiant de l'école (cours, station fixe, préau, ...). Ceci est lié au confinement important dans les classes et à la persistance du benzène dans l'air.

Les niveaux mesurés en extérieur et intérieur montrent qu'il n'y a pas de lien direct entre les deux.

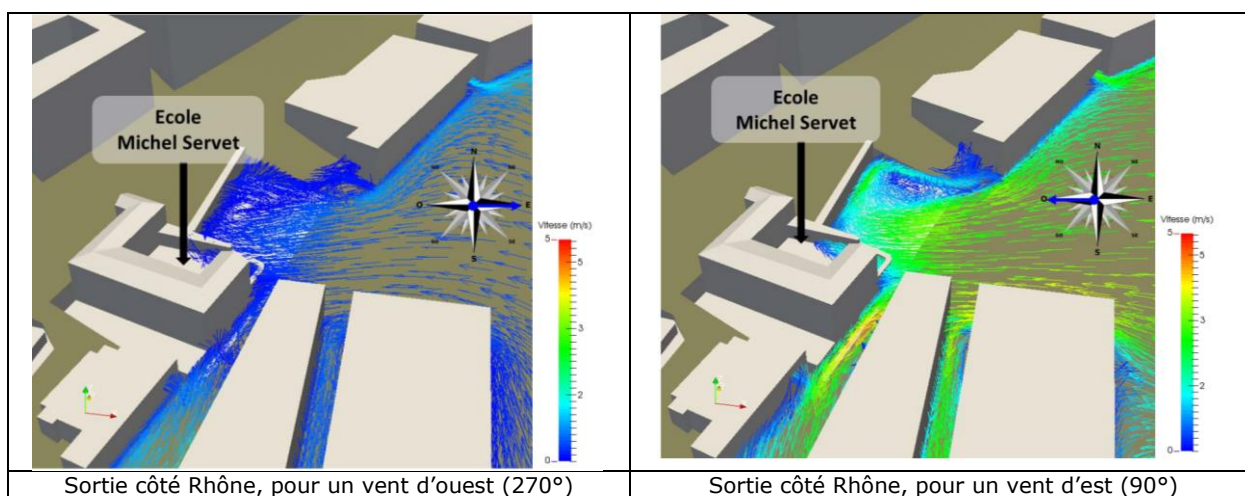
Au regard des résultats, plusieurs actions sont préconisées pour améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des classes (cf. §6. Préconisations).

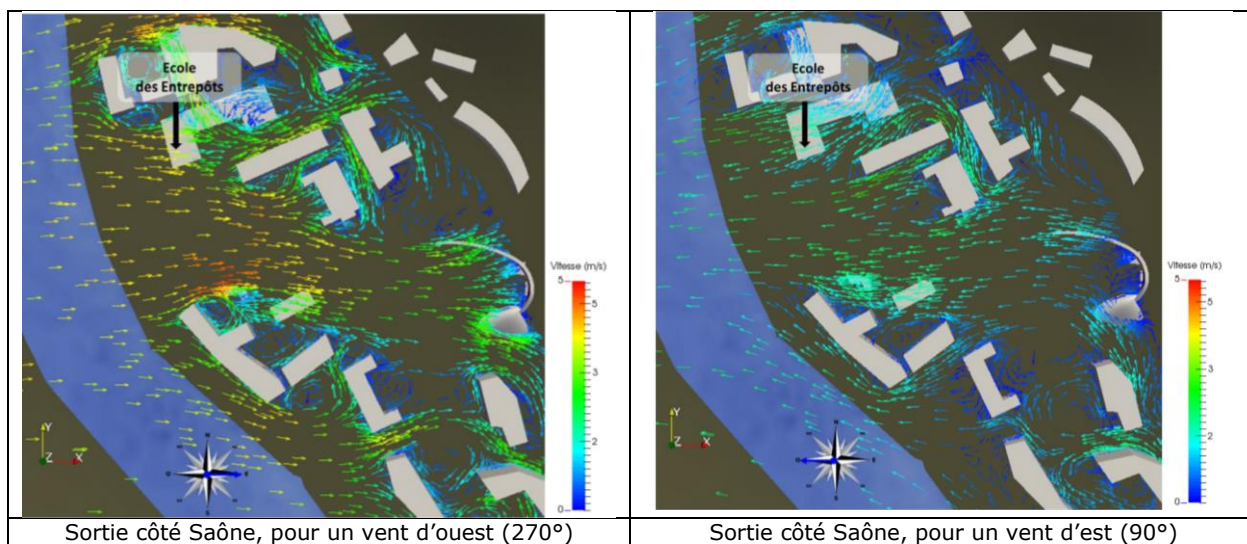
5. Diagnostic à l'échelle des bâtiments en sortie du tunnel

5.1.1. Simulations d'écoulement de l'air

La modélisation 3D mise en place par l'école Centrale de Lyon a permis de conclure que les zones situées de part et d'autre des têtes du tunnel de la Croix-Rousse ne sont pas soumises au même écoulement d'air, compte tenu notamment de la topographie (relief et bâti).

Les figures suivantes illustrent l'écoulement des vecteurs vitesses de vent, modélisés aux 2 sorties de tunnel en fonction des vents ouest et est, qui ne sont pas nécessairement les vents dominants de la zone (vents nord et sud), mais représentent les conditions les plus favorables ou défavorables à la dispersion des polluants émis en sortie du tunnel :





Côté Rhône, la présence importante de bâtiments et la proximité du relief engendrent un espace avec des vitesses de vent souvent faibles (<2 m/s) et systématiquement rabattu contre l'école Michel Servet, quelle que soit la direction du vent (y compris Est/Ouest). L'aérodynamique est donc défavorable à la dispersion des polluants en sortie de tunnel et conduit à une accumulation des polluants dans cette zone.

Côté Saône, la dynamique est plus importante que côté Rhône, avec des vitesses de vents plus élevées. L'écoulement d'air sur ce secteur est donc plus favorable à la dispersion des polluants.

FIGURE 22 – ECOULEMENT DE L'AIR MODELISE AUX 2 SORTIES DU TUNNEL DE LA CROIX-ROUSSE

5.1.2. Analyse des contributions du trafic local et du fond urbain sur les niveaux de polluants et impacts au niveau des écoles

Les résultats de dispersion issus du modèle 3D fine échelle de l'école Centrale permettent de distinguer l'impact du trafic sortant des têtes de tunnel de la Croix-Rousse de celui du fond urbain et des axes avoisinants. Des simulations ont été réalisées pour l'année 2014 et à l'horizon 2020.

➤ Résultats côté Saône : Scénario 2014



Scénario 2020



Moyenne annuelle NO₂ : Impact du trafic dans le tunnel de la Croix-Rousse

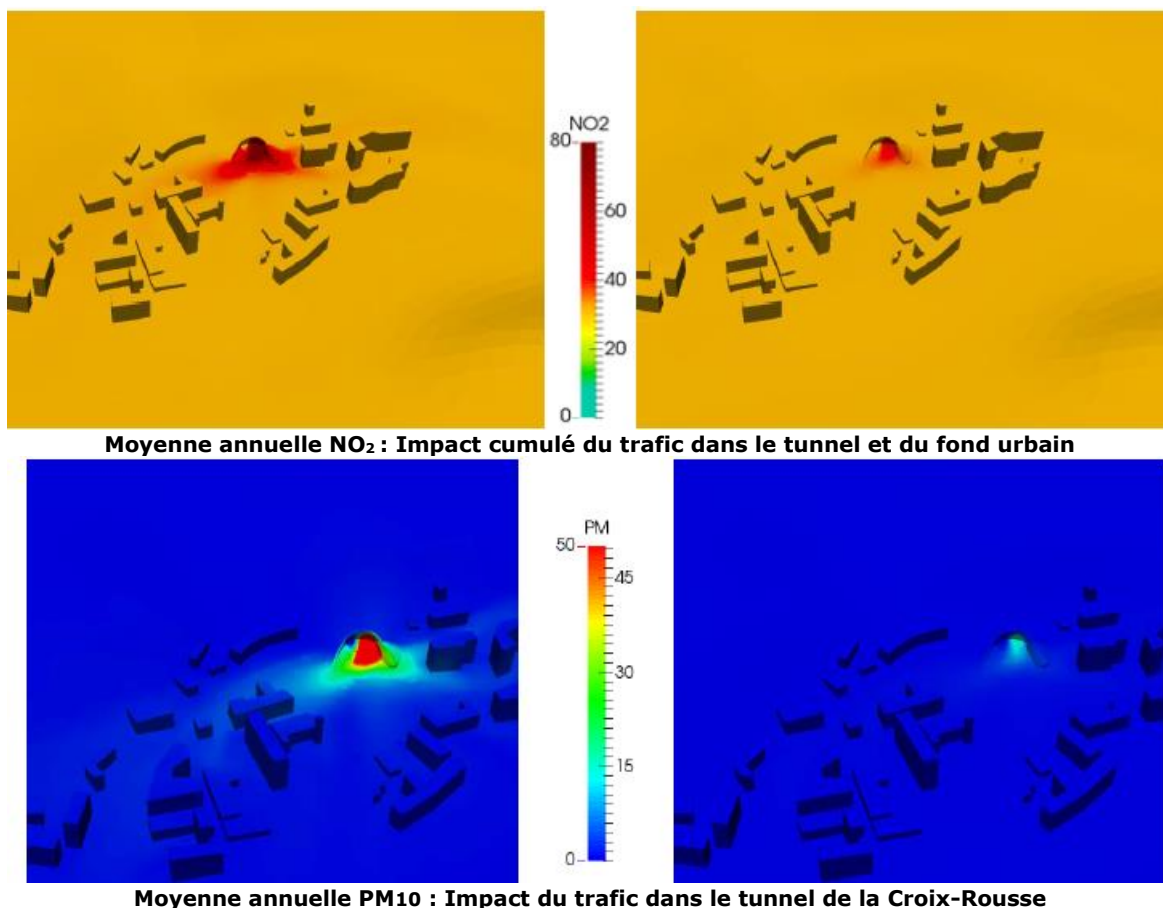
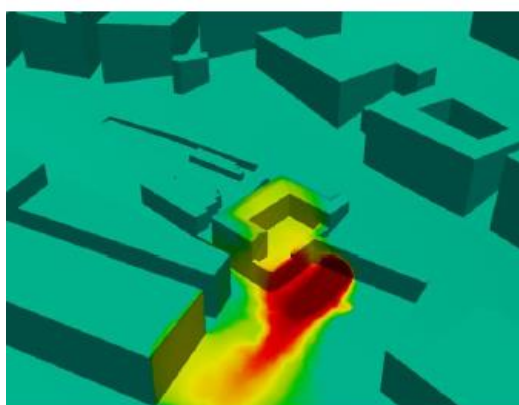


FIGURE 23 - CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DU TRAFIC ET DU FOND URBAIN SUR LES NIVEAUX NO₂ ET PM₁₀ - COTE SAONE

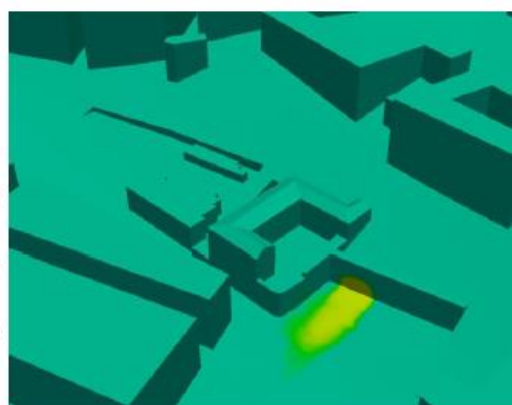
Les simulations montrent qu'en situation actuelle (2014), le trafic en sortie du tunnel de la Croix Rousse côté Saône a très peu d'impact sur les niveaux de NO₂ et de PM₁₀ à l'école des Entrepôts, et qu'à l'horizon 2020, cet impact sera encore plus faible, voire négligeable.

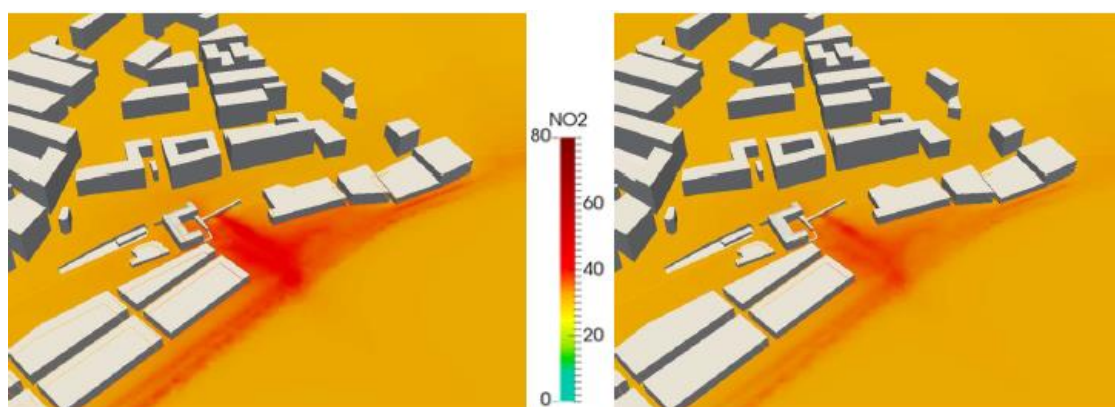
➤ Résultats côté Rhône : Scénario 2014



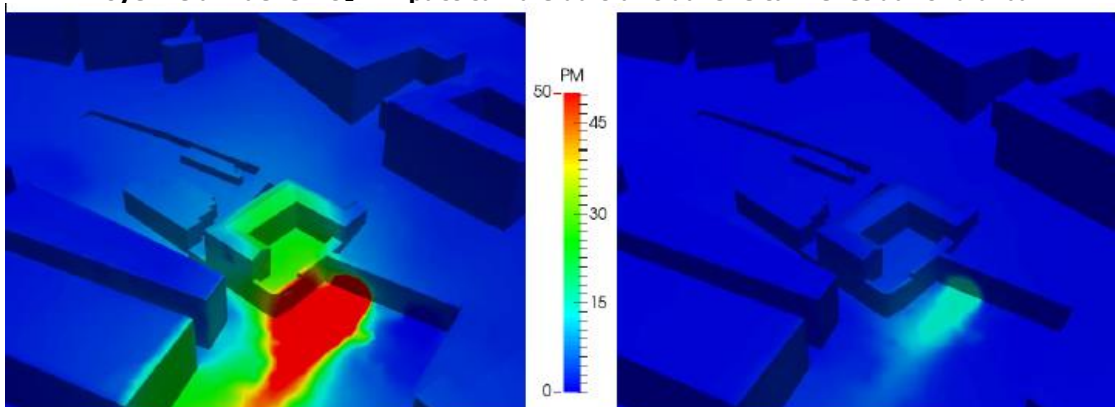
Moyenne annuelle NO₂ : Impact du trafic dans le tunnel de la Croix-Rousse

Scénario 2020

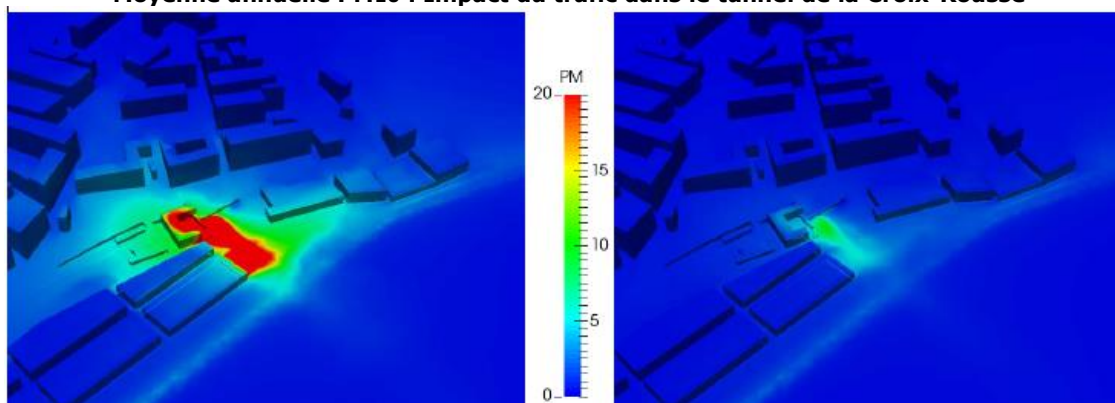




Moyenne annuelle NO₂ : Impact cumulé du trafic dans le tunnel et du fond urbain



Moyenne annuelle PM10 : Impact du trafic dans le tunnel de la Croix-Rousse



Moyenne annuelle PM10 : Impact du trafic dans le tunnel de la Croix-Rousse

FIGURE 24 - CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DU TRAFIC ET DU FOND URBAIN SUR LES NIVEAUX NO₂ ET PM10 – COTE RHONE

Les simulations confirment que l'impact de la tête du tunnel de la Croix Rousse est plus important côté Rhône que côté Saône.

	Impact du trafic circulant dans le tunnel Croix-Rousse sur la moyenne annuelle au capteur Michel Servet	Impact du fond urbain et des voies de circulation principales au voisinage de l'école Michel Servet sur la moyenne annuelle au capteur Michel Servet
Scénario 2014 – NO ₂	40 %	60 %
Scénario 2020 – NO ₂	13 %	87 %

FIGURE 25 - IMPACT DES EMISSAIRES SIMULES SUR LA CONCENTRATION OBSERVEE DANS LA COUR DE L'ECOLE MICHEL SERVET

L'impact du tunnel sur la concentration moyenne annuelle en NO₂ au niveau de l'école Michel Servet est estimé à 40% en 2014 et il se réduit à 13% en 2020.

Toutefois, les résultats montrent que le trafic issu des rues avoisinantes (notamment les quais du Rhône) et le fond urbain contribuent aussi fortement à la concentration moyenne annuelle de NO₂ à l'école Michel Servet : pour 60% en 2014 et pour 87% en 2020 (car l'impact du trafic en sortie du tunnel se réduit de manière plus conséquente).

Enfin, la modélisation 3D fine échelle permet également d'observer la dispersion horizontale et verticale au niveau des bâtiments de l'école Michel Servet et d'évaluer les niveaux de concentrations moyennes annuelles de NO₂ dans les différentes cours de l'école et aux abords des bâtiments.

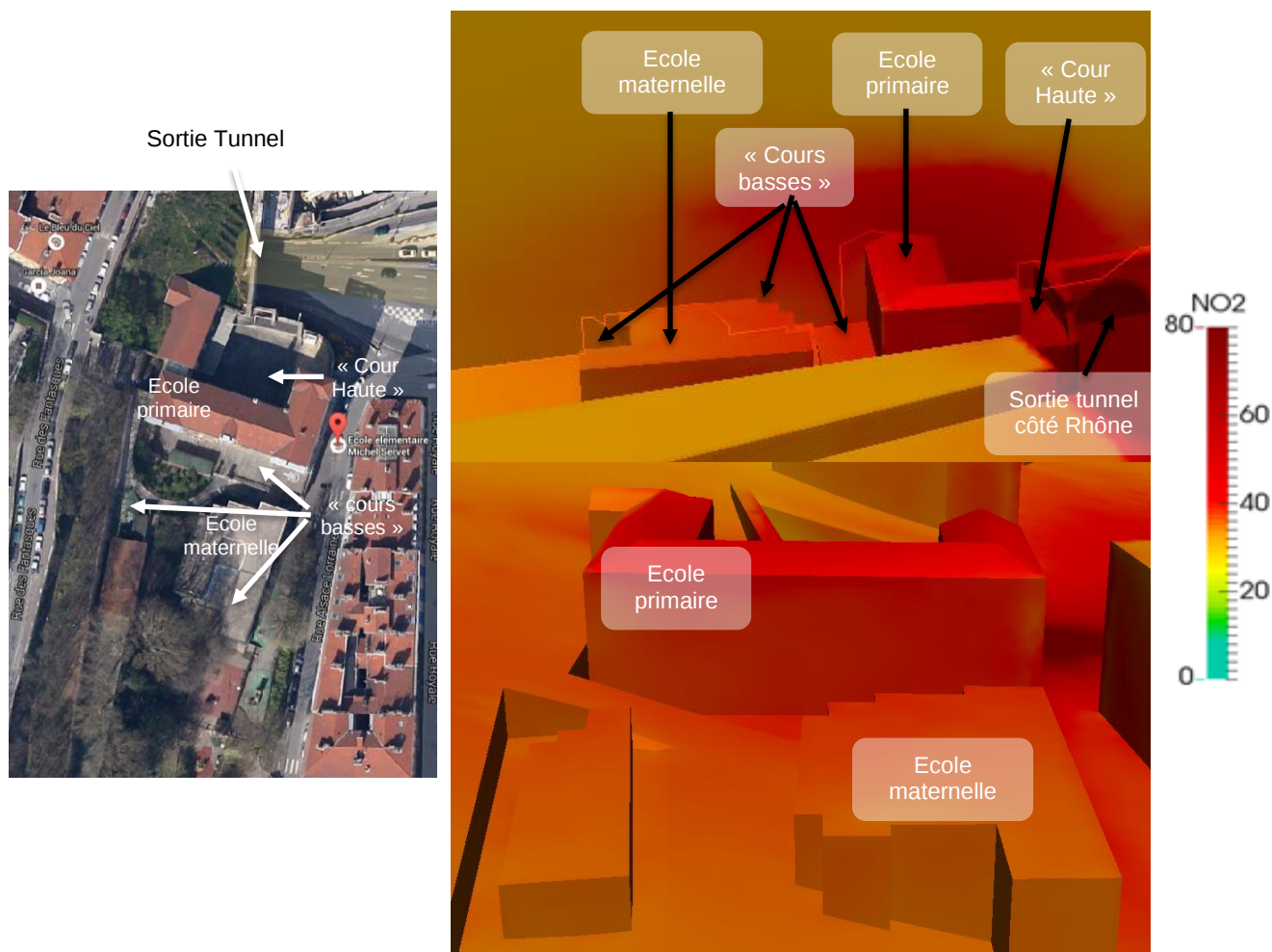
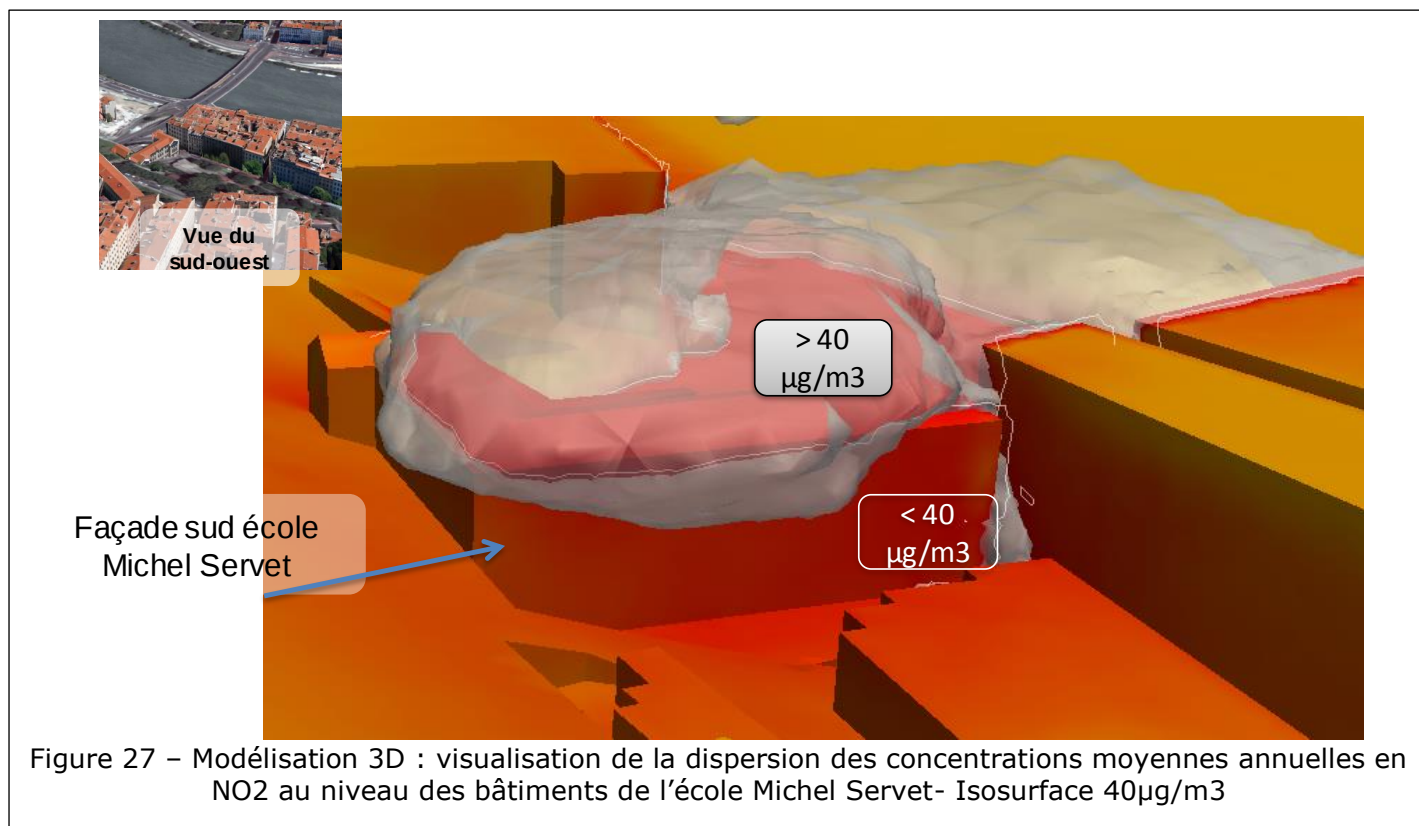


FIGURE 26 – MODELISATION 3D : VISUALISATION DE LA DISPERSION DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN NO₂ AU NIVEAU DES BATIMENTS DE L'ÉCOLE MICHEL SERVET



6. Préconisations

Les résultats de cette étude montrent donc que les solutions visant à diminuer les concentrations en air en ambient et l'exposition des personnes fréquentant l'école Michel Servet et riveraines impliquent la mise en œuvre de mesures ciblées et locales très ambitieuses. Elles devront être absolument accompagnées d'actions plus globales, à l'échelle d'un périmètre urbain élargi.

En ce qui concerne la qualité de l'air intérieure, une aération efficace des classes d'au moins 10 minutes par jour est préconisée, en hiver comme en été, et davantage les jours où des activités de peintures et ou de collage sont prévues, afin de réduire la concentration des polluants dans la classe et limiter le confinement qui est la problématique principale dans les locaux.

Il est nécessaire de vérifier que la ventilation permet de renouveler l'air en assurant une circulation générale et permanente. Elle peut être :

- ✓ naturelle : l'air circule dans le logement par des entrées d'air « neuf » et des sorties d'air « pollué » (bouches et grilles d'aération),
- ✓ mécanique : la VMC (ventilation mécanique contrôlée) est un système électrique de renouvellement automatique et continu de l'air.

Le fonctionnement ne doit pas être perturbé et l'entretien doit être régulier.

Au niveau de l'entretien, il faudrait éviter de nettoyer les salles juste avant l'arrivée des enfants. Le mieux serait d'effectuer les nettoyages le soir après la sortie des enfants, de manière à pouvoir bien aérer les locaux et si on ne peut que le matin, le faire le plus tôt possible et surtout bien aérer après l'usage de ces produits. Il est également préconisé de favoriser un nettoyage humide régulier des classes afin d'assurer un lessivage efficace et limiter la remise en suspension des poussières en journée.

Plus spécifiquement pour l'école Michel Servet, il est préconisé de limiter au maximum les activités des enfants dans la cour « haute », à proximité immédiate de la sortie du tunnel.

Enfin, pour confirmer et connaître l'impact de ces préconisations, il est conseillé de réaliser un suivi des niveaux de polluants par le biais de mesures complémentaires. Ces dernières devront nécessairement comporter des points identiques au protocole utilisé dans cette étude.

7. Conclusions

Conclusions sur la situation actuelle

Conclusions sur les campagnes de mesures en air extérieur 2014

Les niveaux de dioxyde d'azote sur l'année 2014 sont plus élevés coté Rhône que coté Saône. Cette différence est la conséquence d'une accumulation plus forte des polluants, liée à la topographie côté Rhône qui limite la dispersion des polluants alors que cette dispersion est plus importante coté Saône.

Les mesures par tubes passifs montrent également des dépassements de la valeur limite annuelle réglementaire de dioxyde d'azote sur les quais, coté Saône et côté Rhône.

Les niveaux moyens de particules PM₁₀ et PM_{2.5} respectent les valeurs réglementaires, mais il faut noter que les conditions météorologiques de l'année 2014 ont été favorables à une baisse des niveaux de particules constatée à l'échelle de la région, ce qui tend à sous-estimer l'exposition de l'année 2014 par rapport aux années antérieures.

Diagnostic 2014 d'exposition de la population à la pollution atmosphérique (à l'échelle du quartier)

La modélisation montre qu'en 2014, la zone de la Croix Rousse est exposée à des dépassements de la valeur limite réglementaire en moyenne annuelle pour le dioxyde d'azote, avec un niveau moyen équivalent à celui de l'ensemble de l'agglomération lyonnaise. Le calcul de l'exposition de la population, et plus particulièrement des établissements sensibles, révèle un nombre non négligeable d'établissements exposés dans ce secteur. L'analyse du croisement de la présence d'établissements sensibles avec la cartographie de concentrations de polluants mériterait d'être conduite sur un périmètre plus large afin d'évaluer le nombre d'établissements sensibles impactés et leur niveau d'impact sur l'ensemble de la Métropole de Lyon.

Pour les particules PM₁₀ et les PM_{2.5}, les concentrations sur le quartier de la Croix-Rousse restent inférieures aux valeurs limites réglementaires.

En revanche, Le seuil préconisé par l'Organisation Mondiale de la Santé (valeur guide, non réglementaire et ne tenant compte que des effets sur la santé, fixée à 20 µg/m³ de PM₁₀ en moyenne annuelle) est dépassé pour plus de 90% des habitants de la Métropole de Lyon en 2014.

Diagnostic à l'échelle du bâtiment avec une modélisation 3D très fine échelle

L'ensemble des résultats montre que l'impact du trafic issu du tunnel Croix-Rousse en termes de concentrations de polluants est assez localisé, mais qu'il est plus important côté Rhône que côté Saône. Ceci est lié à une aérologie nettement plus défavorable à la dispersion des polluants côté Rhône et explique notamment pourquoi l'école Michel Servet est plus exposée à la pollution atmosphérique que l'école des Entrepôts.

Le modèle montre que le trafic qui circule dans le tunnel a un impact important sur la concentration moyenne annuelle du NO₂ (40% en 2014), mais qu'une part plus importante encore est liée à l'impact du trafic des rues avoisinantes (notamment les quais du Rhône) et du fond urbain.

Des disparités sont également observées au niveau des bâtiments de l'école Michel Servet, puisque la cour d'école dite « haute » est plus impactée que les cours de l'école maternelle qui sont « protégées » par le bâtiment de l'école primaire.

Conclusions sur les perspectives

Évolution de la situation en fonction du renouvellement du parc roulant attendu pour 2020 et 2025

Les projections d'évolution du parc automobile attendu en 2020 montrent que la qualité de l'air s'améliore et que très peu d'établissements sensibles resteraient exposés à des niveaux supérieurs à la réglementation actuelle dans la zone d'étude. Ce devrait encore être le cas pour l'école Michel Servet où les niveaux en NO₂ dépasseraient encore la valeur limite réglementaire en moyenne annuelle en projection 2020 malgré une diminution des concentrations.

Sans action volontaire, et toute chose étant égale par ailleurs, seules les améliorations tendanciennes attendues à l'horizon 2025 vis-à-vis du renouvellement naturel du parc roulant permettraient d'atteindre des niveaux satisfaisants en NO₂ du point de vue de la réglementation sur l'ensemble du secteur.

Scénarii de réduction par norme Euro

Les premières estimations réalisées à l'échelle du quartier de la Croix-Rousse montrent qu'il est possible d'agir dès aujourd'hui sur les niveaux de dioxyde d'azote afin d'atteindre les seuils réglementaires.

Les tests réalisés ne prennent pas en compte les mesures qui pourraient être prises par ailleurs pour faire baisser les niveaux de fond constatés sur l'agglomération. Alors que les actions globales mises en œuvre sur les différentes sources sur le territoire de l'agglomération permettront aux actions locales de réduction des émissions de porter leur fruit.

En agissant seulement localement sur le transport, il faudrait la mise en place de restrictions de circulation drastiques. Les tests réalisés montrent une amélioration notable à partir d'une restriction de circulation jusqu'à la norme Euro 3 sur tous les types de véhicules à l'échelle du quartier (et le test prend comme hypothèse le non remplacement des véhicules qui seront supprimés de la circulation). Une restriction jusqu'à la norme Euro 4 des véhicules permettrait d'obtenir des niveaux en NO₂ inférieurs au seuil réglementaire au niveau de l'école Michel Servet dès à présent.

Table des illustrations

FIGURE 1 - DISPOSITIF DE MESURES : SITES FIXES OU MOBILES ET TUBES PASSIFS	9
FIGURE 2 - DISPOSITIF DE MESURES DANS L'ENCEINTE DE L'ÉCOLE MICHEL SERVET	10
FIGURE 3 - CALENDRIER DE REALISATION DES MESURES	11
FIGURE 4 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MODELISATION A L'ECHELLE URBAINE	12
FIGURE 5 - ILLUSTRATION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE 3D UTILISEE DANS LA MODELISATION DE L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON (EN HAUT : COTE RHONE – ÉCOLE MICHEL SERVET ; EN BAS : COTE SAONE – ÉCOLE DES ENTREPOTS)	13
FIGURE 6 - MOYENNES PAR ZONES DES CONCENTRATIONS DE NO ₂ MESUREES PAR TUBES PASSIF	15
FIGURE 7 : CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE NO ₂ EN 2014 SUR LYON ET ZOOM SUR LE QUARTIER DE LA CROIX-ROUSSE	16
FIGURE 8 : RESULTATS DE MESURES DE PM ₁₀ – MOYENNES ANNUELLES	17
FIGURE 9 : CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES EN PARTICULES PM ₁₀ EN 2014	17
FIGURE 10 : NOMBRE DE JOURS POLLUES AUX PARTICULES PM ₁₀ EN 2014	18
FIGURE 11 : MOYENNES ANNUELLES DE PARTICULES PM _{2.5} EN 2014	20
FIGURE 11 - PROFILS MOYENS HORAIRE NO ₂ PENDANT LES CAMPAGNES DE MESURES DE L'ÉTUDE	20
FIGURE 13 - PROFILS MOYENS HORAIRE NO ₂ ET PM ₁₀ PAR SAISON EN 2014	22
FIGURE 14 – ÉVOLUTION DES MOYENNES ANNUELLES NO ₂ ENTRE 2009 ET 2015	23
FIGURE 15 – ÉVOLUTION DES MOYENNES ANNUELLES PM ₁₀ ET PM _{2.5} ENTRE 2009 ET 2015	24
FIGURE 16 – ÉVOLUTION DU NOMBRE DE DEPASSEMENTS JOURNALIERS POUR LES PM ₁₀ ENTRE 2009 ET 2015	25
FIGURE 17 – ÉVOLUTION TENDANCIELLE DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION AUX CONCENTRATIONS DE POLLUANTS SUR LE SECTEUR DE LA CROIX-ROUSSE POUR 2014 ET AUX HORIZONS 2020 ET 2025	27
FIGURE 18 : ÉVOLUTION DE L'EXPOSITION DES POPULATIONS AU NO ₂ SUR LA CROIX-ROUSSE ENTRE 2014 ET 2025	28
FIGURE 19 – RESULTATS DE MESURES DE DIOXYDE D'AZOTE EN AIR EXTERIEUR / AIR INTERIEUR DANS L'ÉCOLE MICHEL SERVET	30
FIGURE 20 – MOYENNE PARTICULES FINES (PM ₁₀) AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR	31
FIGURE 21 -GRAPHIQUE ISSU DU RAPPORT AFSSET - VGAI- PM SUR 297 LOGEMENTS - MESURES OQAI (2003-2005)	32
FIGURE 21 – ÉCOULEMENT DE L'AIR MODELISE AUX 2 SORTIES DU TUNNEL DE LA CROIX-ROUSSE	35
FIGURE 23 - CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DU TRAFIC ET DU FOND URBAIN SUR LES NIVEAUX NO ₂ ET PM ₁₀ - COTE SAONE	36
FIGURE 24 - CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DU TRAFIC ET DU FOND URBAIN SUR LES NIVEAUX NO ₂ ET PM ₁₀ – COTE RHONE	37
FIGURE 24 - IMPACT DES EMISSAIRES SIMULES SUR LA CONCENTRATION OBSERVEE DANS LA COUR DE L'ÉCOLE MICHEL SERVET	37
FIGURE 26 – MODELISATION 3D : ZOOMS AU NIVEAU DES BATIMENTS DE L'ÉCOLE MICHEL SERVET	39

Annexes techniques

Annexe 1 : Résultats détaillés des campagnes de mesures

Annexe 2 : Résultats détaillés de la modélisation urbaine

Annexe 3 : Résultats détaillés de la modélisation fine échelle