

"L'air est **essentiel à chacun**
et mérite l'**attention de tous.**"

ETUDE

Etude de la répartition spatiale du dioxyde d'azote sur l'agglomération rennaise

Campagnes de janvier/février et juin 2014

V1 180315



ORGANISME
DE MESURE, D'ÉTUDE
ET D'INFORMATION SUR
LA QUALITÉ DE L'AIR
EN BRETAGNE



Air Breizh
3 rue du Bosphore - Tour ALMA 8^{ème} étage - 35200 Rennes
Tél : 02 23 20 90 90 – Fax : 02 23 20 90 95

www.airbreizh.asso.fr



Etude de la répartition spatiale du dioxyde d'azote sur l'agglomération rennaise

Etude réalisée par Air Breizh

Pose des tubes

Air Breizh et le service technique de la ville de Rennes que nous remercions.

Nous remercions les services de la Ville de Rennes qui ont participé à cette étude dans le cadre notamment de la mise en place des tubes lors des campagnes de prélèvement.

Avertissement

Les informations contenues dans ce rapport traduisent la mesure d'un ensemble d'éléments à un instant donné, caractérisé par des conditions climatiques propres.

Air Breizh ne saurait être tenu pour responsable des événements pouvant résulter de l'interprétation et/ou de l'utilisation des informations faites par un tiers.

Toute utilisation de ce rapport et/ou de ces données doit faire référence à Air Breizh.

Service Etudes	Service Technique	Validation
Bénédicte GUIRIEC Olivier CESBRON	Joël GRALL	Magali CORRON

Sommaire

I. Contexte et objectifs de l'étude	6
II. Présentation d'Air Breizh	7
II.1. Missions d'Air Breizh.....	7
II.2. Réseau de surveillance en continu.....	7
II.3. Moyens.....	8
III. Généralités sur le dioxyde d'azote.....	9
III.1. Formation du NO ₂	9
III.2. Sources.....	9
III.3. Impact sur la santé et l'environnement.....	9
III.4. Valeurs de référence.....	10
IV. Matériels et méthodes	10
IV.1. Techniques de mesure	10
IV.2. Calcul des concentrations	11
IV.3. Contrôle de la qualité des mesures par tube passif	11
IV.4. Incertitudes	11
IV.5. Choix des sites de mesure	11
IV.6. Dates de campagne	12
IV.7. Mise en place	13
IV.8. Limites de l'étude.....	13
V. Résultats	13
V.1. Conditions météorologiques.....	13
V.2. Qualité des mesures.....	14
V.3. Résultats bruts.....	17
V.4. Etude de la répartition spatiale des concentrations en dioxyde d'azote	19
V.5. Situation par rapport aux valeurs réglementaires.....	21
V.6. Comparaison des résultats des mesures à la modélisation atmosphérique réalisée dans le cadre de la révision du PPA.....	23
V.7. Comparaison aux résultats de l'étude 2003	24
VI. Conclusions	28
VII. Annexes.....	29

Figures

Figure 1 : Répartition des émissions de NO ₂ à Rennes [source : Cadastre des émissions 2010 Air Breizh]	9
Figure 2 : Localisation des sites de mesures [fond de carte IGN]	12
Figure 3 : Conditions météorologiques à Rennes durant les prélèvements [données Météo France]	14
Figure 4 : Evolution des rapports T/A.....	16
Figure 5 : Corrélation des résultats des tubes passifs et des analyseurs.....	16
Figure 6 : Découpage de l'agglomération rennaise	19
Figure 7 : Nombre de site de mesures par zone.....	20
Figure 8 : Comparaison des résultats par zone (concentration en dioxyde d'azote en µg/m ³)	20
Figure 9 : Résultats des concentrations moyennes mesurées par site	21
Figure 10 : Localisation des sites de mesures présentant des concentrations moyennes en dioxyde d'azote supérieures à 40 µg/m ³	22
Figure 11 : Comparaison des résultats des mesures et de la modélisation [Source modélisation : Air Breizh – révision du PPA de Rennes en 2014]	23
Figure 12 : Répartition des sites par typologie lors des études 2003 et 2014	24
Figure 13 : Répartition des 15 sites communs entre 2003 et 2014	25
Figure 14 : Localisation des 15 sites prélevés en commun en 2003 et 2014	25
Figure 15 : Ratio des concentrations en NO ₂ : 2014/2003	26
Figure 16 : Evolution des concentrations des moyennes annuelles [source : Bilan annuel Air Breizh 2013]	27
Figure 17 : Evolution du TMJA Boulevard de la Liberté à Rennes	27

Tableaux

Tableau 1 : Résultats des calculs des écarts relatifs	15
Tableau 2 : Résultats des calculs concentrations Tubes / Analyseurs (T/A).....	16
Tableau 3 : Comparaison des moyennes annuelles avec les tubes passifs et les mesures automatiques.....	17
Tableau 4 : Résultats des concentrations en dioxyde d'azote mesurées par tube passif.....	18
Tableau 5 : Résultats des concentrations mesurées au niveau des 15 sites prélevés en communs en 2003 et 2014	26

Glossaire

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: l'unité de mesure est le microgramme par mètre cube d'air ($1\mu\text{g} = 0,000\ 001\text{g}$)

AASQA : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

BTEX : terme désignant les Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

NO : formule chimique du monoxyde d'azote

NO₂ : formule chimique du dioxyde d'azote

NO_x : terme désignant les oxydes d'azote (NO + NO₂)

Objectif de qualité : niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble.

Polluant primaire : Composé rejeté dans l'atmosphère directement par la source de pollution

Polluant secondaire : Polluant résultant de la transformation de polluants primaires par différentes réactions chimiques

Station trafic : station de mesure ayant pour objectif de fournir des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum d'exposition auquel la population située en proximité d'une infrastructure routière est susceptible d'être exposée

Station urbaine : station de mesure dont l'objectif est de suivre le niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphérique dits de « fond » dans les centres urbains

Valeur cible : valeur fixée dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement dans son ensemble, à atteindre, dans la mesure du possible dans un délai donné.

Valeur limite : niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble

I. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le cadre de la révision du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de Rennes, Air Breizh a réalisé plusieurs campagnes de mesures du dioxyde d'azote par tubes à diffusion passive en 2014, sur une cinquantaine de sites au niveau de l'agglomération rennaise.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- étudier la répartition spatiale du dioxyde d'azote à Rennes, notamment dans le centre-ville, très peuplé,
- appréhender les concentrations maximales auxquelles la population peut être exposée,
- comparer les concentrations relevées à la valeur limite réglementaire,
- comparer les résultats obtenus avec ceux de la dernière campagne réalisée par Air Breizh en 2003.

Le protocole, les résultats et leurs interprétations sont présentés dans ce rapport.

Ce rapport public est disponible sur le site internet d'Air Breizh.

II. Présentation d'Air Breizh

La surveillance de la qualité de l'air est assurée en France par des associations régionales agréées, constituant le dispositif national représenté par la Fédération ATMO France.

Ces organismes, agréés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, ont pour missions de base, la mise en œuvre de la surveillance et de l'information sur la qualité de l'air, la diffusion des résultats et des prévisions, et la transmission immédiate au Préfet et au public, des informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils de recommandation et d'information du public et des seuils d'alerte.

En Bretagne, cette surveillance est assurée par Air Breizh depuis 1986.

Le réseau de mesure s'est régulièrement développé et dispose au 1^{er} janvier 2015, de 17 stations de mesure fixes, réparties sur neuf villes bretonnes, ainsi que d'un laboratoire mobile, de cabines et de différents préleveurs, pour la réalisation de campagnes de mesure ponctuelles.

L'impartialité de ses actions est assurée par la composition quadripartite de son Assemblée Générale regroupant quatre collèges :

- Collège 1 : services de l'Etat,
- Collège 2 : collectivités territoriales,
- Collège 3 : émetteurs de substances polluantes,
- Collège 4 : associations de protection de l'environnement et personnes qualifiées.

II.1. Missions d'Air Breizh

- Surveiller les polluants urbains nocifs (SO₂, NO₂, CO, O₃, Métaux lourds, HAP, Benzène, PM10 et PM2.5) dans l'air ambiant,
- Informer la population, les services de l'Etat, les élus, les industriels..., notamment en cas de pic de pollution. Diffuser quotidiennement l'indice ATMO, sensibiliser et éditer des supports d'information : plaquettes, site web....,
- Etudier l'évolution de la qualité de l'air au fil des ans, et vérifier la conformité des résultats par rapport à la réglementation. Apporter son expertise sur des problèmes de pollutions spécifiques et réaliser des campagnes de mesure à l'aide de moyens mobiles (laboratoire mobile, tubes à diffusion, préleveurs, jauges OWEN...) dans l'air ambiant et l'air intérieur.

II.2. Réseau de surveillance en continu





II.3. Moyens

Afin de répondre aux missions qui lui incombent, Air Breizh compte une dizaine de salariés, et dispose d'un budget annuel de plus d'un million d'euros, financé par l'Etat, les collectivités locales, les émetteurs de substances polluantes, et des prestations d'intérêt général et produits divers.

III. Généralités sur le dioxyde d'azote

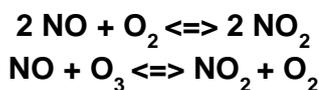
III.1. Formation du NO₂

Le Dioxyde d'azote est formé à partir du monoxyde d'azote.

Le monoxyde d'azote (NO) se forme par combinaison de l'azote N₂ et de l'oxygène O₂ lors des combustions à hautes températures :



Le monoxyde d'azote est rapidement oxydé en dioxyde d'azote (NO₂) par réaction avec d'autres oxydants de l'air (oxygène O₂, ozone O₃, ...):



A titre informatif, le rapport NO/NO₂ est un bon indicateur de la proximité automobile.

III.2. Sources

Le transport routier est le principal émetteur de dioxyde d'azote sur l'agglomération rennaise. Il représente près de 70% des émissions de NO₂ dans ce secteur géographique.

La part des secteurs industriel, résidentiel et tertiaire est moindre. L'industrie lourde est peu développée sur l'agglomération rennaise.

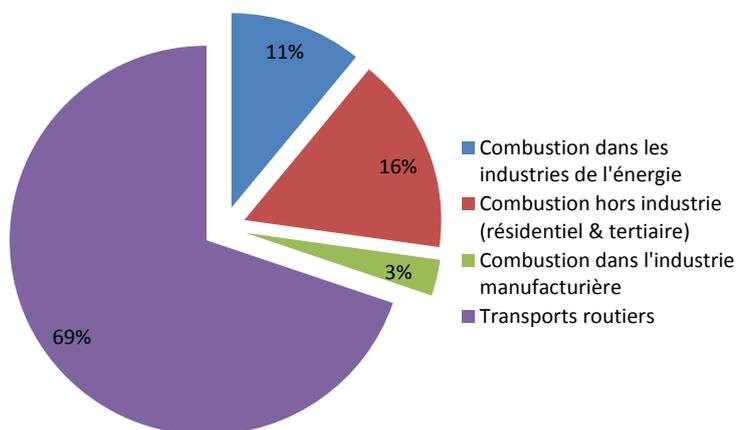


Figure 1 : Répartition des émissions de NO₂ à Rennes [source : Cadastre des émissions 2010 Air Breizh]

III.3. Impact sur la santé et l'environnement

Le monoxyde d'azote passe à travers les alvéoles pulmonaires, puis se dissout dans le sang, empêchant la bonne fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine. Par voie de conséquence, les organes sont moins bien oxygénés.

Le dioxyde d'azote, plus dangereux, pénètre dans les voies respiratoires profondes et fragilise la muqueuse pulmonaire face aux agressions infectieuses. Pour les asthmatiques, cela se traduit par une augmentation de la fréquence et de la gravité des crises. Chez l'enfant, l'exposition au NO₂ peut favoriser les infections pulmonaires.

Le NO₂ participe au phénomène des pluies acides, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre. C'est un précurseur dans la formation de l'ozone troposphérique (basse atmosphère).

III.4. Valeurs de référence

Les seuils réglementaires pour le dioxyde d'azote dans l'air sont les suivants :

	Seuil de recommandation et d'information	Seuil d'alerte	Valeur limite
Code de l'environnement articles R 221-1 à R 221-3	200 µg/m ³ en moyenne horaire	400 µg/m ³ en moyenne horaire 200 µg/m ³ en moyenne horaire*	Moyenne annuelle : 40 µg/m³ En moyenne horaire : 200 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18 heures par an

* si la procédure 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

Le seuil de recommandation et d'information ainsi que le seuil d'alerte, sont également repris dans l'arrêté préfectoral du 13 août 2012, qui définit les prescriptions en cas de dépassement dans l'agglomération rennaise.

IV. Matériels et méthodes

IV.1. Techniques de mesure

Le dioxyde d'azote a été mesuré au moyen de **tubes à diffusion passive**. L'échantillonnage passif est une technique de mesure courante dans la surveillance de la qualité de l'air. Sa facilité de mise en œuvre et son faible coût permettent de multiplier le nombre de points de mesures.

La mesure du dioxyde d'azote par échantillonnage passif est basée sur le piégeage de cette molécule sur un absorbant, la triéthanolamine.

L'échantillonneur utilisé est en forme de tube légèrement conique, de 73,45 mm de long et 9,79 mm de diamètre, où l'air à analyser circule par diffusion passive.

La quantité de dioxyde d'azote absorbée est proportionnelle à sa concentration moyenne dans l'air ambiant durant la période d'exposition. Cette quantité est déterminée en laboratoire par spectrométrie à 542 nm.



Les échantillonneurs passifs ont été exposés dans l'air ambiant pendant une durée de sept jours, puis analysés ultérieurement par un laboratoire sous-traitant, accrédité COFRAC.

La concentration atmosphérique moyenne sur la période d'échantillonnage a été calculée à partir de la masse piégée, à un débit d'échantillonnage et une durée d'exposition connus.

En parallèle de ces mesures par tubes passifs, les résultats des mesures des analyseurs automatiques du réseau de stations fixes d'Air Breizh ont également été utilisés. Les analyseurs fournissent des mesures quart-horaires en continu.

Cette technique de mesure a permis de comparer les résultats à la valeur limite, exprimée en moyenne annuelle.

IV.2. Calcul des concentrations

La méthode de calcul des concentrations est détaillée en annexe III.

IV.3. Contrôle de la qualité des mesures par tube passif

La qualité de la mesure a été contrôlée par la pose d'un doublon (ou triplet), sur l'un des sites et l'analyse d'un échantillon témoin non exposé (blanc de transport), permettant de détecter une éventuelle contamination liée au transport, à la préparation ou au stockage.

IV.4. Incertitudes

Le laboratoire d'analyse estime à 20,3% l'incertitude analytique, sans distinction de concentration, avec ce type de support [source : laboratoire d'analyse].

IV.5. Choix des sites de mesure

Les mesures ont été réalisées au niveau de 50 sites retenus à Rennes. La figure ci-après permet de localiser ces sites.

Les critères pris en compte pour la sélection des sites sont les suivants :

- Résultats de l'étude de répartition spatiale du NO₂ réalisée en 2003,
- Trafic routier,
- Résultats des prélèvements de benzène de 2010 à 2012,
- Configuration de chacun des sites,
- Prise en compte de l'exposition de la population. Les sites retenus ont été positionnés en priorité à proximité d'habitations ou de lieux accueillant du public (école, complexes sportifs, hôpital, ...),
- Absence de travaux à proximité des points de prélèvement durant les campagnes de mesures.

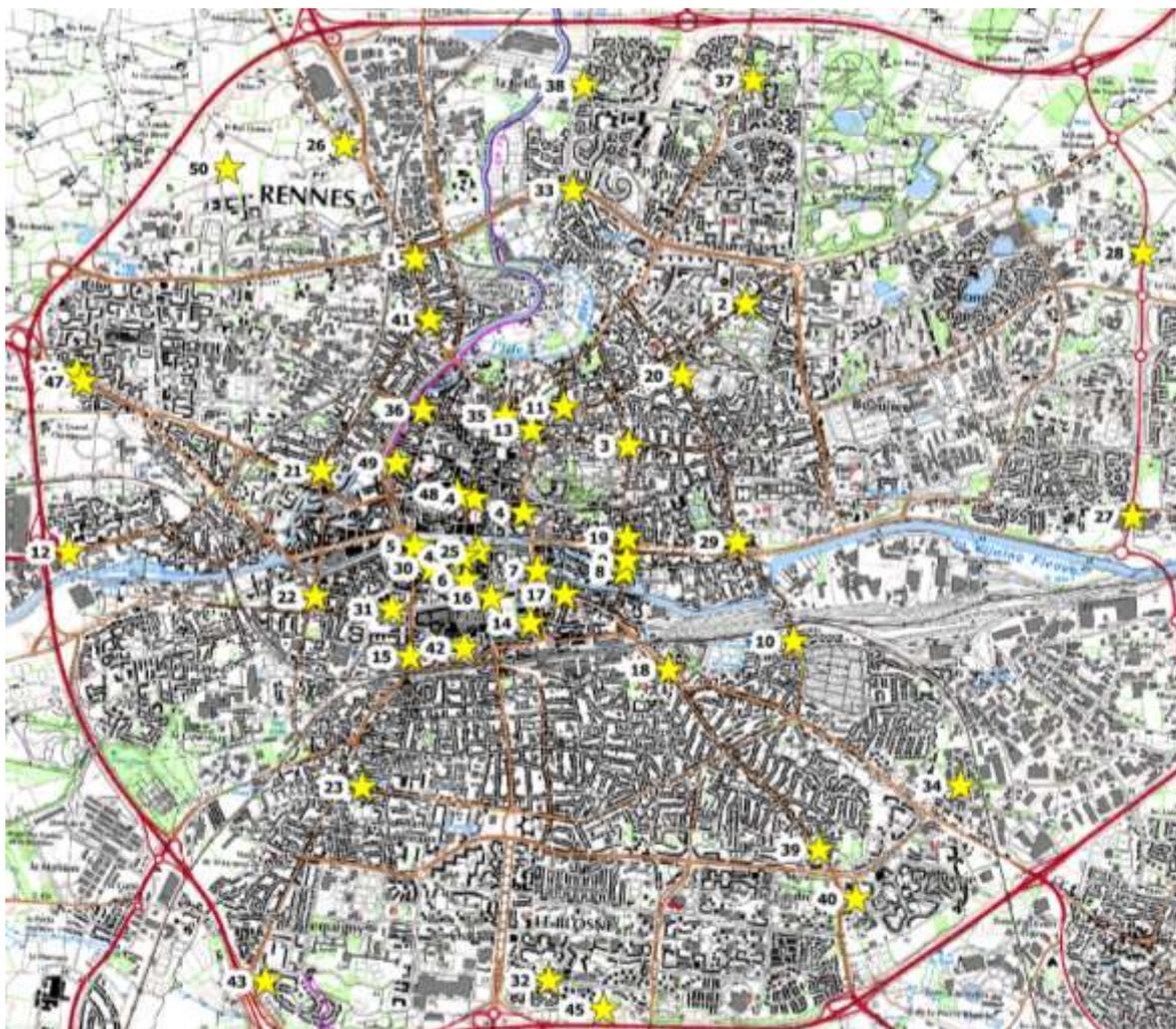


Figure 2 : Localisation des sites de mesures [fond de carte IGN]

Les adresses et la typologie de ces sites de mesures sont reprises dans le tableau en annexe IV.

Sur l'ensemble des sites de prélèvement, 42 sont des sites de proximité trafic et 8 sont des sites de fond urbain.

IV.6. Dates de campagne

Afin d'évaluer au mieux les niveaux moyens en NO₂, en s'affranchissant des conditions météorologiques, tout en limitant le nombre de campagnes, quatre séries de prélèvements d'une semaine ont été organisées respectivement en été puis en hiver, ces deux saisons représentant théoriquement les conditions extrêmes d'une année.

Au total, 8 semaines de prélèvement ont été réalisées, ce qui correspond à la période minimale d'échantillonnage pour la détermination d'une moyenne annuelle selon la Directive 2008/50/CE.

Les dates de chacune de ces campagnes sont les suivantes :

Période HIVERNALE	Dates
Série 1	Du 21/01 au 28/01/14
Série 2	Du 28/01 au 04/02/14
Série 3	Du 04/02 au 11/02/14
Série 4	Du 11/02 au 18/02/14

Période ESTIVALE	Dates
Série 1	Du 03/06 au 10/06/14
Série 2	Du 10/06 au 17/06/14
Série 3	Du 17/06 au 24/06/14
Série 4	Du 24/06 au 01/07/14

IV.7. Mise en place

La pose des tubes a été effectuée avec la participation des services de la Ville de Rennes que nous remercions.

Les tubes ont été posés au niveau de chacun des sites, dans des boîtes de protection afin d'empêcher (conformément à la norme NF EN 16339) :

- l'entrée de particules grossières,
- l'exposition directe à la lumière du soleil,
- l'exposition à des vitesses de vents élevées.

Les tubes ont été disposés à une hauteur comprise entre 1,5 et 2 m de hauteur selon les sites.

Avant et après exposition, les tubes ont été stockés au réfrigérateur, à l'abri de la lumière.

IV.8. Limites de l'étude

Les campagnes de mesures ne sont représentatives que de la période étudiée. Les résultats sont tributaires des conditions météorologiques. En aucun cas, ils ne peuvent être assimilés à une autre période.

L'étude se limite aux sites de prélèvements, ce qui n'exclut pas des concentrations plus élevées dans des zones non étudiées.

V. Résultats

V.1. Conditions météorologiques

Les données météorologiques présentées dans ce chapitre sont celles mesurées par Météo France, au niveau de la station de Rennes-St Jacques (35).

V.1.1. Influence des conditions météorologiques

Le vent et la pluie sont des facteurs de réduction des niveaux de polluants. Le premier disperse les polluants, la seconde les adsorbe et les entraîne au sol. Cependant, le vent peut parfois provoquer une hausse des concentrations, par un phénomène de panache rabattant les polluants émis par une source fixe, ou par transport des polluants émis dans d'autres régions, voire d'autres pays.

Le froid peut engendrer une augmentation des émissions de polluants issus de la combustion par le fonctionnement accru des installations de chauffage. Les niveaux de polluants sont d'autant plus élevés que l'atmosphère est alors souvent stable.

V.1.2. Les conditions météorologiques durant les prélèvements

Les prélèvements ont été réalisés durant les mois de janvier, février et juin 2014.

Le graphique ci-dessous permet de visualiser le cumul des précipitations mesurées durant les mois de mesures ainsi que les températures moyennes mensuelles.

Ces données sont comparées aux normales saisonnières enregistrées à la station Météo France de St Jacques de la Lande (35).

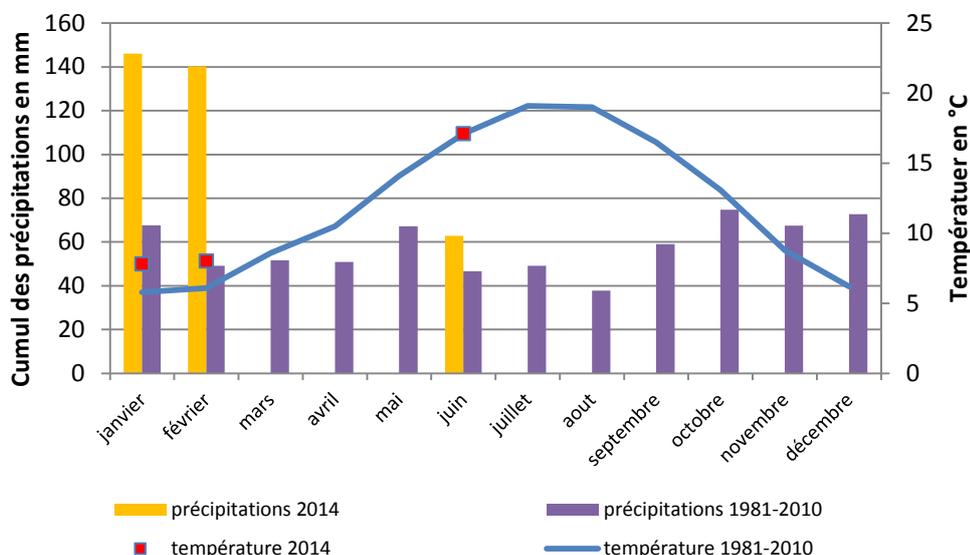


Figure 3 : Conditions météorologiques à Rennes durant les prélèvements [données Météo France]

Les mois de janvier et février 2014 ont été marqués par des précipitations abondantes, comprises entre 2 et 3 fois les normales saisonnières.

Les températures durant ces deux mois étaient légèrement supérieures aux normales.

Le mois de juin présente également des précipitations légèrement supérieures aux normales saisonnières.

La température moyenne mensuelle mesurée en juin est identique à la normale saisonnière.

L'analyse détaillée des précipitations mesurées sur le mois de janvier 2014 montre que 35% des précipitations du mois ont été mesurées sur la période de prélèvement, soit à partir du 21/01/14.

Pour le mois de février 2014, 70% des précipitations du mois ont été mesurées durant les prélèvements s'étalant du 01/02 au 18/02, soit un total de plus de 150 mm durant le mois de prélèvement, ce qui est bien supérieur aux normales.

Les prélèvements de la période hivernale, ont donc été marqués par des précipitations très importantes, qui ont dû entraîner une baisse des concentrations ambiantes.

V.2. Qualité des mesures

Des doublons (voire des triplets) de prélèvement et un blanc de transport ont été réalisés lors de chaque série de mesures, lors de cette campagne, afin de vérifier la qualité des mesures réalisées.

➤ Vérification des blancs de terrain

Les blancs de terrain sont des tubes passifs qui suivent les mêmes manipulations que les échantillons (stockage, transport sur le site, puis envoi au laboratoire), sans par contre être exposés (conforme à la norme NF EN 16 339¹).

Ils permettent de vérifier que les tubes ne sont pas contaminés pendant ces différentes étapes.

Un blanc a été réalisé par série de prélèvement d'une semaine.

¹ NF EN 16 339 de septembre 2013 relative à la méthode de détermination de la concentration du dioxyde d'azote dans l'air ambiant au moyen d'échantillonneurs par diffusion

Pour l'ensemble des séries en période hivernale et estivale, les blancs sont tous inférieurs à la limite de détection du laboratoire ($0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ce qui garantit l'absence de contamination des tubes durant les opérations de transport, de conservation et de manipulation.

➤ Vérification de la répétabilité des échantillonneurs passifs

Sur certains sites, les mesures des tubes ont été dupliquées. La précision de ces mesures est définie par la moyenne des écart-relatifs (IERI) calculés pour chaque mesure dupliquée. L'écart-relatif, en valeur absolue, pour chaque couple exposé est calculé d'après la formule suivante [source : synthèse de l'expérience acquise par les réseaux sur l'échantillonnage passif du NO_2 – Ecole des Mines de Douai mai 2000] :

$$\text{IERI (\%)} = ((M-mi)/M) \times 100$$

Avec :

M : la concentration moyenne de la série (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

mi : la concentration d'un tube (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tableau 1 : Résultats des calculs des écarts relatifs

	21/01_28/01	28/01_04/02	04/02_11/02	11/02_18/02	03/06_10/06	10/06_17/06	17/06_24/06	24/06_01/07
site 50A	24	27	16	17	13	12	10	15
ER (%)	-4%	1%	2%	2%	-1%	3%	6%	1%
site 50B	22	27	17	18	13	11	10	15
ER (%)	4%	-1%	-2%	-2%	-1%	5%	2%	1%
site 50C	x	x	x	x	12	13	11	16
ER (%)	x	x	x	x	1%	-2%	10%	-2%
<i>moy</i>	22,9	26,9	16,2	17,5	12,6	11,9	10,5	15,2
moyenne IERI	4%	1%	2%	2%	1%	3%	6%	1%

Les moyennes des écarts relatifs en valeur absolue (IERI), et par série de mesures, sont faibles.

La moyenne la plus élevée est celle de la série du 17/06 au 24/06/14, soit 6%, qui est légèrement supérieure au critère de 5% maximum pour la reproductibilité (Norme NF EN 16339). Cet écart pourrait être lié aux faibles concentrations mesurées. Cette série est donc conservée.

La moyenne des écarts relatifs de toutes les campagnes est de 3%. La répétabilité est donc jugée satisfaisante.

➤ Comparaison avec les résultats des analyseurs

La comparaison avec les résultats fournis par les analyseurs automatiques permet de valider les échantillonnages passifs.

Deux sites ont été choisis à proximité des analyseurs automatiques :

- Site n°6, boulevard de la Liberté, proche de la station trafic des Halles ;
- Site n°8, boulevard Laënnec, proche de la station trafic Laënnec.

Le tableau ci-après détaille les calculs des comparaisons des résultats Tubes/Analyseurs automatiques (nommé 'T/A').

Tableau 2 : Résultats des calculs concentrations Tubes / Analyseurs (T/A)

site n°6 - station Les Halles	campagne hiver				campagne été			
	21/01-28/01	28/01-04/02	04/02-11/02	11/02-18/02	03/06-10/06	10/06-17/06	17/06-24/06	24/06-01/07
résultats analyseur	48	42	32	40	29	37	42	44
résultats tube passif	57	47	40	47	37	44	46	50
Tube/Analyseur	1,2	1,1	1,3	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1

site n°8 - station Laënnec	campagne hiver				campagne été			
	21/01-28/01	28/01-04/02	04/02-11/02	11/02-18/02	03/06-10/06	10/06-17/06	17/06-24/06	24/06-01/07
résultats analyseur	36	32	21	27	18	20	15	23
résultats tube passif	46	39	29	35	24	25	20	32
Tube/Analyseur	1,3	1,2	1,4	1,3	1,4	1,2	1,4	1,4

Station	T/A moy	T/A max	T/A min
Les halles	1,2	1,3	1,1
Laennec	1,3	1,4	1,2

Les rapports entre les résultats des tubes passifs et les analyseurs sont globalement faibles (moyenne du ratio T/A de 1,25 sur la campagne).

Une surestimation moyenne des valeurs obtenues par l'échantillonnage passif, au regard des résultats des analyseurs, de l'ordre de 20 à 30% est observée ce qui est conforme aux données rencontrées dans la bibliographie.

Cette surestimation est supérieure au niveau de la station Laënnec par rapport à la station des Halles, ce qui pourrait être lié à la gamme de concentrations mesurées.

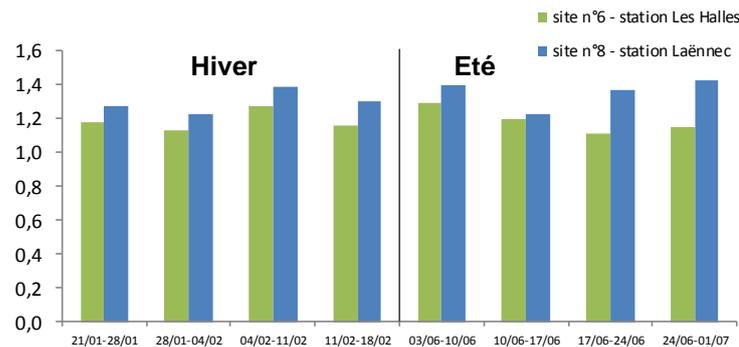


Figure 4 : Evolution des rapports T/A

Le graphique suivant présente la corrélation entre les mesures par tubes passifs et les mesures des analyseurs. Le coefficient de corrélation est très proche de 1, signifiant que la corrélation entre les deux moyens de mesures est correcte.

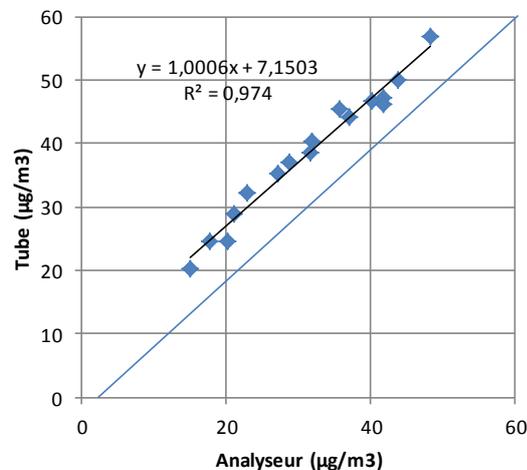


Figure 5 : Corrélation des résultats des tubes passifs et des analyseurs

La surestimation des résultats avec les tubes est bien visible sur ce graphique, et valable sur l'ensemble de la gamme de mesures.

➤ Comparaison des moyennes déterminées à partir des tubes avec les moyennes annuelles des analyseurs

Le tableau ci-après présente les résultats des concentrations moyennes annuelles calculées d'après les campagnes de tubes passifs et celles obtenues d'après les mesures automatiques sur les deux points de mesures situés à proximité des stations du réseau de surveillance.

Tableau 3 : Comparaison des moyennes annuelles avec les tubes passifs et les mesures automatiques

moyenne des concentrations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	site n° 6 les Halles	site n° 8 Laënnec
moyenne des concentrations sur les campagnes de mesures (T)	46,1	31,3
moyenne annuelle des concentrations sur l'année 2014 à partir des mesures automatiques (A)	40,6	26,1
rapport T/A	1,14	1,20

Les concentrations moyennes déterminées avec les tubes à diffusion sont 15 à 20% supérieures à celles calculées d'après les mesures automatiques.

On considère toutefois que la moyenne annuelle 2014 des concentrations en dioxyde d'azote des différents sites peut-être approchée en moyennant les résultats des campagnes hivernales et estivales.

Conclusion sur la validation des données

Au vu des résultats des blancs, de la répétabilité des mesures et de la comparaison avec les mesures automatiques, les résultats de cette campagne sont jugés valides et représentatifs.

Les incertitudes liées à cette méthode, et la tendance de cette dernière à surestimer de l'ordre de 15 à 20 % les concentrations moyennes annuelles estimées via les mesures des analyseurs, ne doivent toutefois pas être négligées.

Les concentrations mesurées avec les tubes passifs n'ont pas été corrigées du fait du nombre de point de comparaison estimé trop faible.

A ce sujet, l'école des Mines de Douai mentionne un nombre de l'ordre de cinquante points minimum pour corriger les concentrations obtenues avec les tubes [source : *Synthèse de l'expérience acquise par les réseaux sur l'échantillonnage passif du NO₂*].

V.3. Résultats bruts

Les résultats des mesures par tubes passifs sont présentés dans le tableau ci-après. La cartographie des résultats est présentée en annexe I.

Tableau 4 : Résultats des concentrations en dioxyde d'azote mesurées par tube passif

Concentrations en NO ₂ (en µg/m ³)		type de station	moyenne campagne hiver	Moyenne campagne été	Moyenne sur les deux campagnes
1	Rue Saint Malo site 1/2	Trafic	47	51	49
2	Rue de Fougères	Trafic	27	17	22
3	Bd Duchesse Anne	Trafic	56	40	48
4	Rue Gambetta	Trafic	41	25	33
5	Place de Bretagne	Trafic	73	42	58
6	Bd de la Liberté site 1/2	Trafic	48	44	46
7	Avenue Janvier	Trafic	49	51	50
8	Bd Laënnec site 1/2	Trafic	37	25	31
9	Bd Laënnec site 2/2	Trafic	35	37	36
10	Villebois Mareuil	Trafic	35	35	35
11	Rue Guéhenno	Trafic	54	46	50
12	Rue de Lorient	Trafic	57	38	48
13	Rue Le Sage	Trafic	39	43	41
14	Bd Magenta	Trafic	48	35	41
15	Bd de la Tour d'Auvergne	Trafic	45	32	39
16	Rue d'Isly	Trafic	36	34	35
17	Rue St Héliier site 1/2	Trafic	62	40	51
18	Rue St Héliier site 2/2	Trafic	53	56	54
19	Rue Châteaudun	Trafic	40	36	38
20	Bd de Metz	Trafic	29	25	27
21	Bd de Verdun	Trafic	42	28	35
22	Rue Malakoff	Trafic	35	37	36
23	Bd Clémenceau	Trafic	35	31	33
24	Allée de Montbarrot	Trafic	40	23	31
25	Rue du Pré botté	Trafic	45	30	37
26	La Robiquette 1/2	Trafic	22	18	20
27	Bd des Alliés site 1/2	Trafic	34	28	31
28	Bd des Alliés site 2/2	Trafic	29	27	28
29	Bd de Strasbourg	Trafic	50	27	38
30	Bd de la Liberté site 2/2	Trafic	55	37	46
31	Rue Pierre Abélard	Trafic	28	21	25
32	Bd du Portugal	Trafic	42	31	36
33	Boulevard d'Armorique	Trafic	33	34	34
34	Rue de Bignon	Trafic	36	32	34
35	Rue d'Antrain	Trafic	47	39	43
36	Rue Legraverend	Trafic	45	30	38
37	Rue St Laurent	Trafic	50	29	39
38	Avenue de Couesnon	Trafic	29	21	25
39	Rue de Vern	Trafic	35	19	27
40	Rue Michel Gérard	Trafic	29	18	23
41	Rue St Malo site 2/2	Trafic	53	37	45
42	Square des Martyrs	Urbain	25	13	19
43	Square du Menou	Urbain	28	18	23
44	Rue Lafayette	Urbain	37	20	28
45	Stade Salengro	Urbain	35	18	27
46	Rue de la Parcheminerie	Urbain	23	22	23
47	Champeaux	Trafic	19	30	24
48	Place Rallier du Baty	Urbain	34	21	27
49	Square Fergent	Urbain	25	13	19
50	Parc Beauregard	Urbain	21	13	17

Concentration supérieure à l'objectif qualité (et valeur limite) de 40 µg/m³ en moyenne annuelle

Conformément aux objectifs de cette étude, les points suivants sont traités dans le cadre de l'interprétation des résultats :

- Etude de la répartition spatiale des concentrations sur l'agglomération rennaise ;
- Comparaison des concentrations mesurées en dioxyde d'azote aux valeurs réglementaires ;
- Comparaison des résultats à la modélisation atmosphérique réalisée par Air Breizh en 2014 sur la base de l'inventaire des émissions 2008 dans le cadre de la mise à jour du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) ;
- Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la dernière campagne réalisée par Air Breizh en 2003.

V.4. Etude de la répartition spatiale des concentrations en dioxyde d'azote

La carte présentée en annexe I présente les résultats des concentrations moyennes annuelles mesurées pour chacun des sites de mesures.

Pour faciliter l'interprétation de ces résultats, nous avons découpé l'agglomération rennaise en trois zones distinctes comme suit :

- Centre-ville : zone composée du centre historique de la ville de Rennes et caractérisée par un habitat dense ;
- Péricentre : zone d'habitat moins dense et plus récent, délimitée par une première ceinture intérieure de fréquentation importante ;
- Intra-rocade : zone délimitée par le périphérique de l'agglomération rennaise, traversée par des boulevards d'accès au centre-ville de fréquentation importante et caractérisée par un habitat moins dense et vertical par endroit.

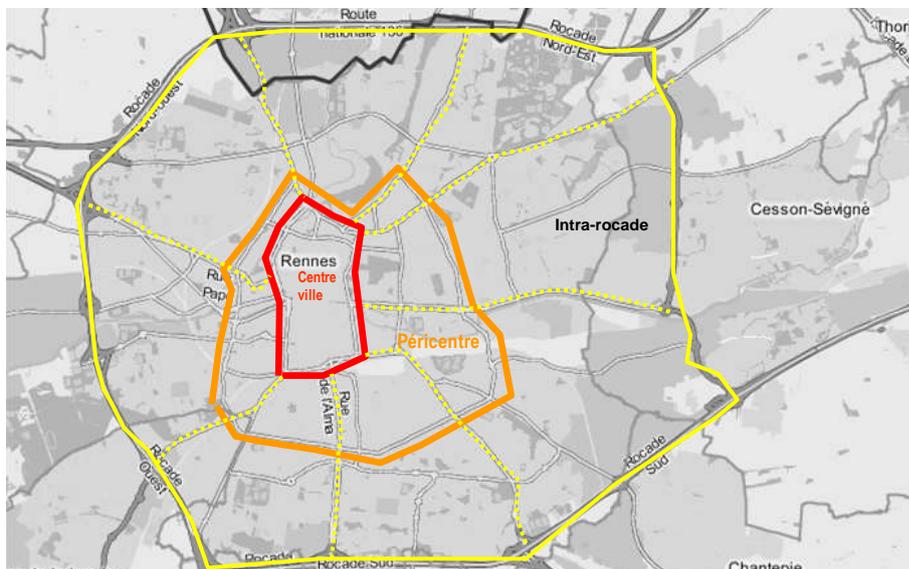


Figure 6 : Découpage de l'agglomération rennaise

Le nombre de site de mesures par zone et la typologie de chacun de ces sites, sont présentés sur le graphique suivant :

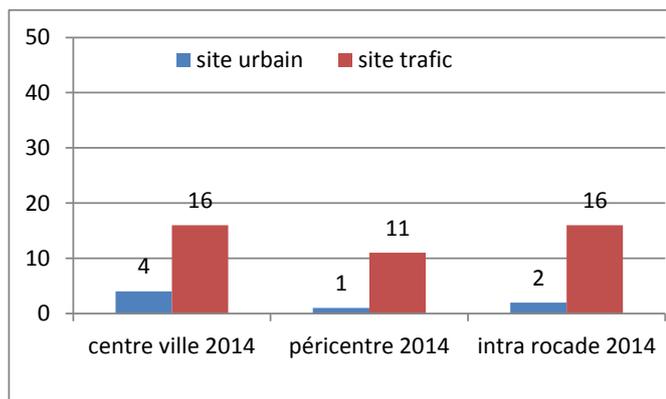


Figure 7 : Nombre de site de mesures par zone

Les résultats des mesures **pour les sites trafic**, sont présentés ci-après par zone. Les sites urbains n'ont pas été pris en compte dans ci-après du fait de leurs répartitions différentes par zone.

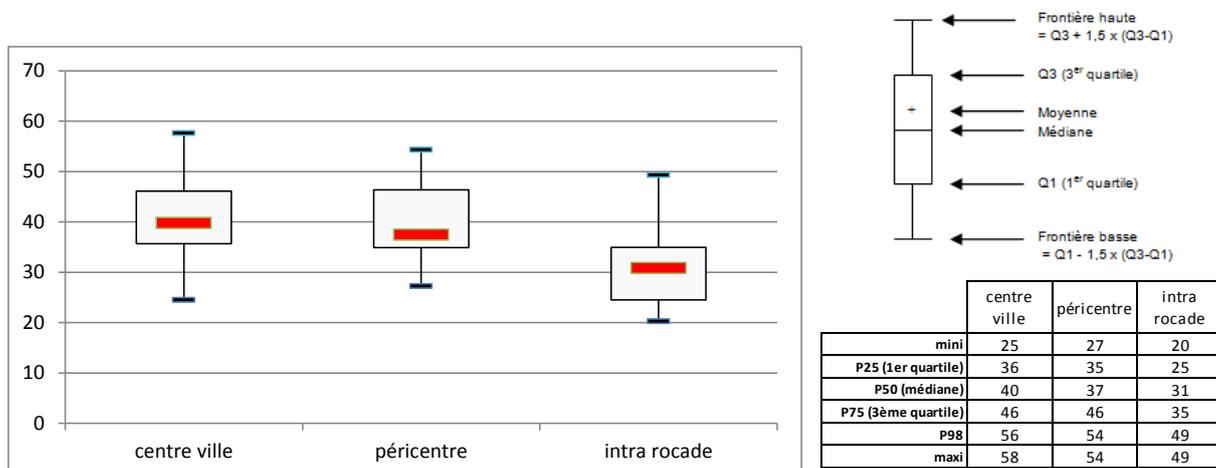


Figure 8 : Comparaison des résultats par zone (concentration en dioxyde d'azote en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Concernant les mesures de dioxyde d'azote pour les sites trafic en **centre-ville**, les concentrations sont comprises entre 25 et 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dont ce maximum correspond à la valeur moyenne maximale mesurée lors de cette campagne sur l'ensemble de l'agglomération.

Dans la zone dite '**péricentre**', la gamme de mesures est moins étendue ; celles-ci sont comprises entre 27 et 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans la zone **intra rocade**, les concentrations sont inférieures, à savoir comprises entre 20 et 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans cette zone, les concentrations les plus élevées se trouvent à proximité d'axes très fréquentés (rue de St Malo par exemple).

Cette interprétation par zone permet de mettre en évidence des concentrations globalement plus élevées dans les zones du centre-ville et du péricentre, par rapport à la zone intra-rocade.

Ce constat est lié à la combinaison dans le centre de l'agglomération, des émissions du transport routier, caractérisé par un nombre important de véhicules et une mauvaise fluidité du trafic, et des émissions du secteur résidentiel et tertiaire ainsi qu'une moins bonne dispersion du fait de la configuration de l'habitat.

V.5. Situation par rapport aux valeurs règlementaires

Le type d'échantillonnage utilisé à savoir des tubes à diffusion passive, permet de comparer les résultats des mesures, à la valeur limite du dioxyde d'azote de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, exprimée en concentration moyenne annuelle.

Tous les sites de **fond urbain** sont inférieurs à la valeur limite de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations moyennes mesurées pour ces 8 sites de fond urbain varient de 15 à $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour les 42 sites de **proximité trafic** investigués, 14 d'entre eux, soit 30% environ de ces sites, présentent des concentrations moyennes supérieures à l'objectif qualité, sans tenir compte des incertitudes de mesure.

Quatre sites trafic, présentent des concentrations relativement élevées, supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$:

- Rue Guéhenno ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$),
- les deux sites de la rue St Hélier (51 et $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Place de Bretagne ($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Le graphique suivant présente les résultats des concentrations moyennes mesurées pour l'ensemble des sites et par ordre croissant des résultats.

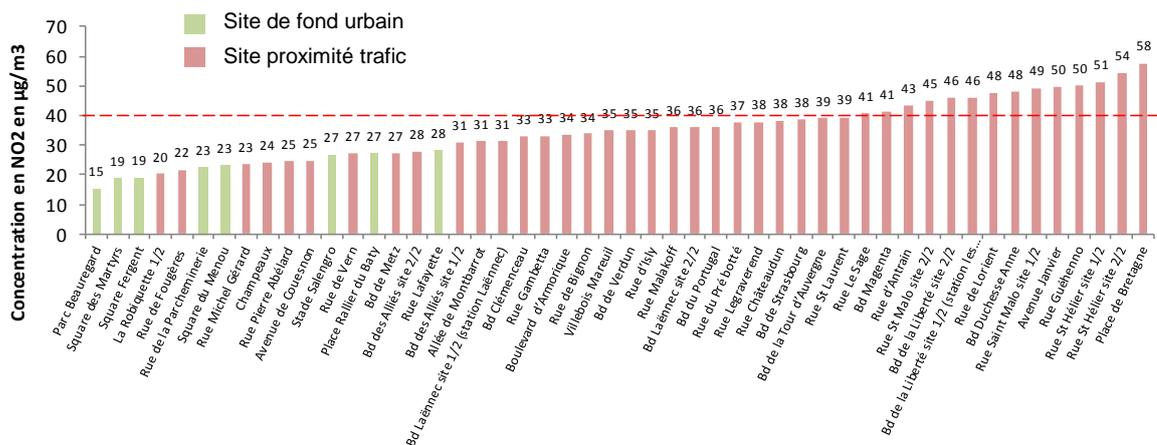
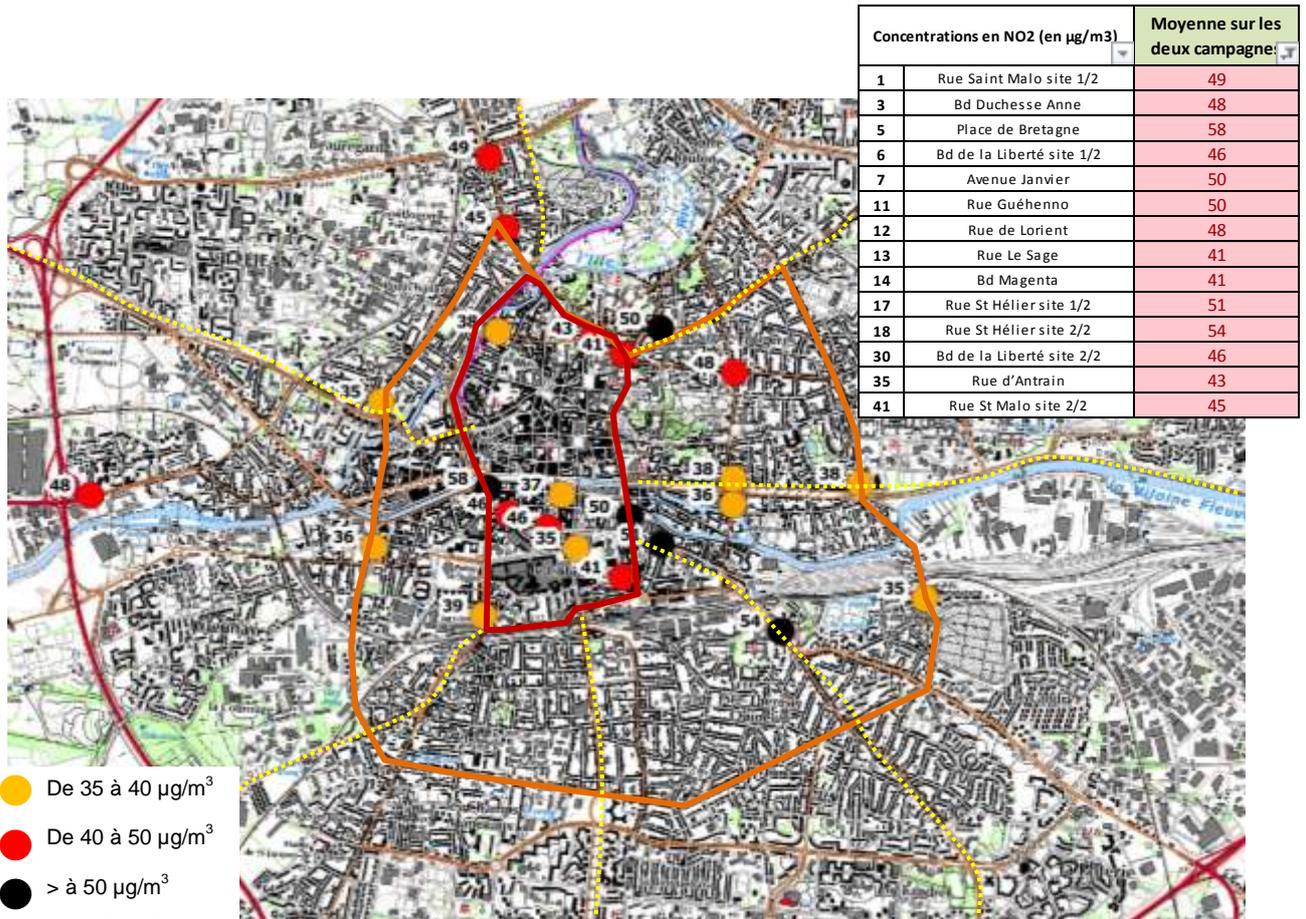


Figure 9 : Résultats des concentrations moyennes mesurées par site

Les sites de fond urbain, qui présentent les concentrations les plus élevées, se trouvent soit non loin de la rocade (site stade Salengro), ou dans le centre-ville (sites rue Lafayette et place rallier du Baty).

A l'inverse, les sites qui présentent les concentrations les plus faibles, correspondent généralement à des espaces verts (parc Beauregard, Square des martyrs) éloignés des voies de circulation et bénéficiant d'une bonne dispersion.

Les sites de mesures, présentant des concentrations moyennes supérieures à la valeur réglementaire de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont localisés, sur la figure suivante.



Zoom sur le centre-ville



Figure 10 : Localisation des sites de mesures présentant des concentrations moyennes en dioxyde d'azote supérieures à 40 µg/m³

Dans la zone **intra-rocade**, les trois sites présentant des concentrations supérieures à la valeur réglementaire de 40 µg/m³ se trouvent :

- au niveau de la porte de Lorient (rue de Lorient)
- à proximité de la rue de St Malo (deux sites), axe très fréquenté permettant de rejoindre le centre-ville.

Dans la zone dite '**péricentre**', les quatre sites présentant les concentrations supérieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se trouvent sur des axes routiers très fréquentés à savoir :

- la rue St Héliier (deux sites);
- la rue Guéhenno ;
- le Boulevard de la Duchesse Anne.

Enfin, dans le **centre-ville**, les sept sites présentant des concentrations supérieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se trouvent :

- boulevard de la Liberté (deux sites) ;
- Place de Bretagne qui présente la concentration maximale ;
- boulevard Magenta ;
- avenue Janvier ;
- rue Le Sage et rue d'Antrain, dans la partie Nord du centre-ville.

V.6. Comparaison des résultats des mesures à la modélisation atmosphérique réalisée dans le cadre de la révision du PPA

En 2014, dans le cadre de la révision du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de Rennes, Air Breizh a réalisé différents travaux en collaboration avec l'Etat et Rennes Métropole, dans le but d'étudier les objectifs et les orientations prospectives à 2020 en matière de pollution atmosphérique.

Ces travaux s'articulent en plusieurs étapes de calculs, d'une part la détermination des émissions pour 2008 (année de référence) puis 2020, et d'autre part la modélisation de la qualité de l'air pour ces deux années, à partir des résultats d'émissions obtenus.

La carte ci-après présente les résultats des mesures de cette campagne, superposés à la modélisation réalisée pour l'année 2008 (année de référence). Elle est également reprise en annexe II.

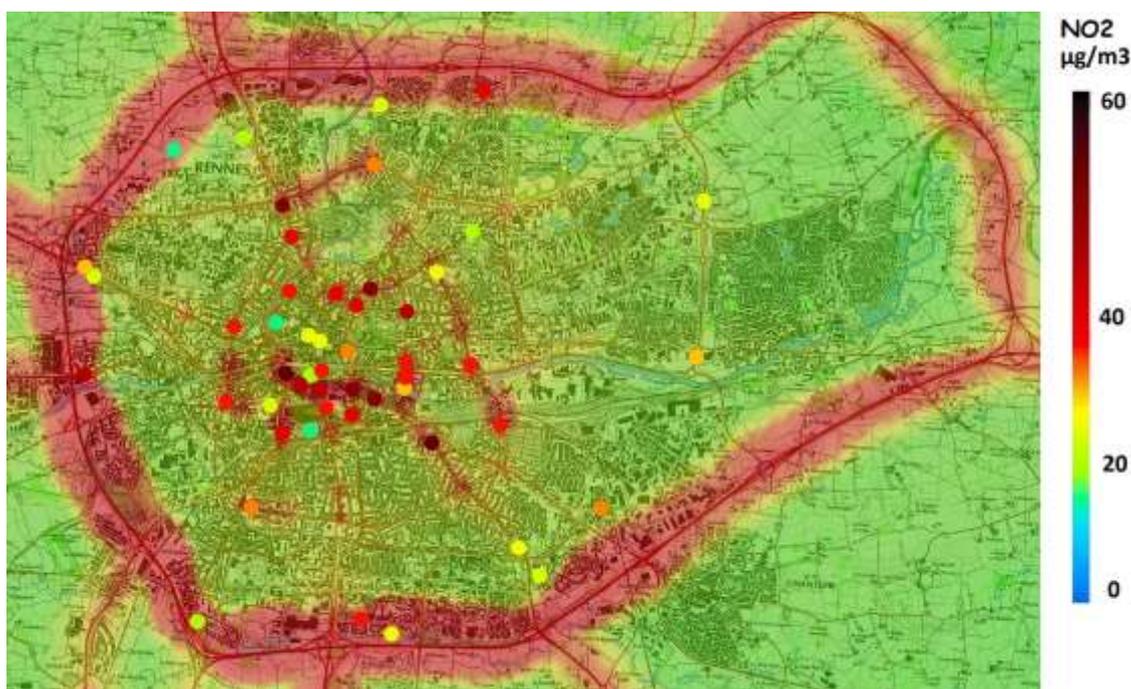


Figure 11 : Comparaison des résultats des mesures et de la modélisation [Source modélisation : Air Breizh – révision du PPA de Rennes en 2014]

La cartographie des concentrations issue de la modélisation est globalement bien corrélée aux résultats des mesures notamment au niveau des axes routiers très fréquentés comme le boulevard de la Liberté, la rue Saint Héliier, la Place de Bretagne, la rue de Saint Malo ou encore le boulevard de la Tour d'Auvergne.

Des différences plus marquées sont visibles entre la modélisation et les mesures, sur les sites proches de la rocade pour lesquels les concentrations mesurées sont plus faibles que les valeurs modélisées. Cette différence pourrait être liée à une surestimation possible de la modélisation à proximité de la rocade.

V.7. Comparaison aux résultats de l'étude 2003

Lors de la campagne 2003, 77 sites avaient été investigués dont 9 sites, soit 12%, correspondaient à des sites 'trafic'. Les résultats avaient plutôt permis de caractériser les niveaux de fond urbain dans l'agglomération rennaise.

Pour la présente campagne 2014, sur les 50 sites investigués, 43 sites (86%) sont des sites 'trafic'. L'objectif de cette nouvelle étude est donc de caractériser les concentrations en dioxyde d'azote en proximité trafic.

Pour cette raison, la comparaison des résultats des deux études est difficile.

Les graphiques ci-après présentent la répartition des sites lors des études 2003 et 2014.

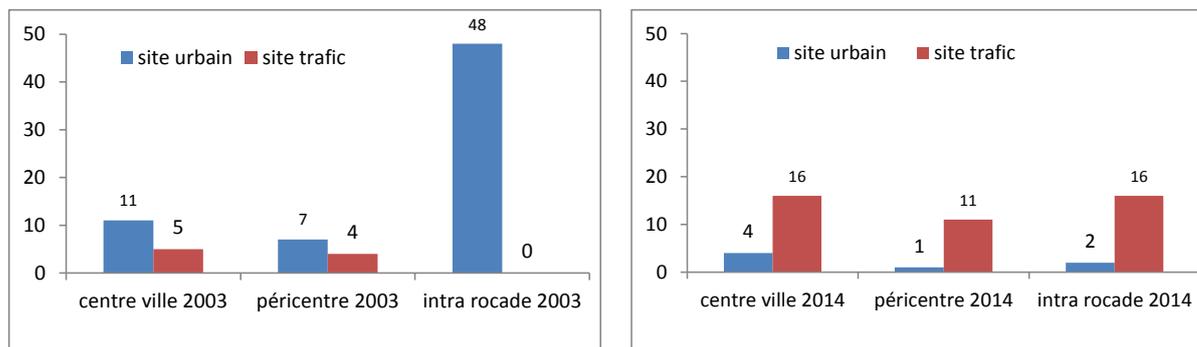


Figure 12 : Répartition des sites par typologie lors des études 2003 et 2014

Sur l'ensemble des sites investigués en 2014, seuls 15 sites avaient fait l'objet de prélèvement également en 2003.

Les résultats des études 2003/2014 sont comparés ci-après pour ces 15 sites prélevés en commun en 2003 puis 2014.

La répartition de la typologie de ces 15 sites est présentée ci-après.

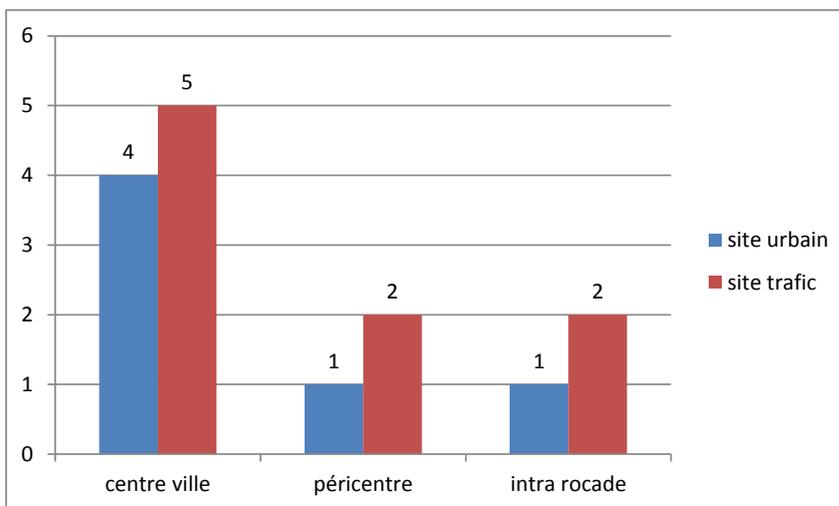


Figure 13 : Répartition des 15 sites communs entre 2003 et 2014

La majorité de ces sites se trouvent dans la zone centre-ville (9/15). La carte suivante permet de les localiser.

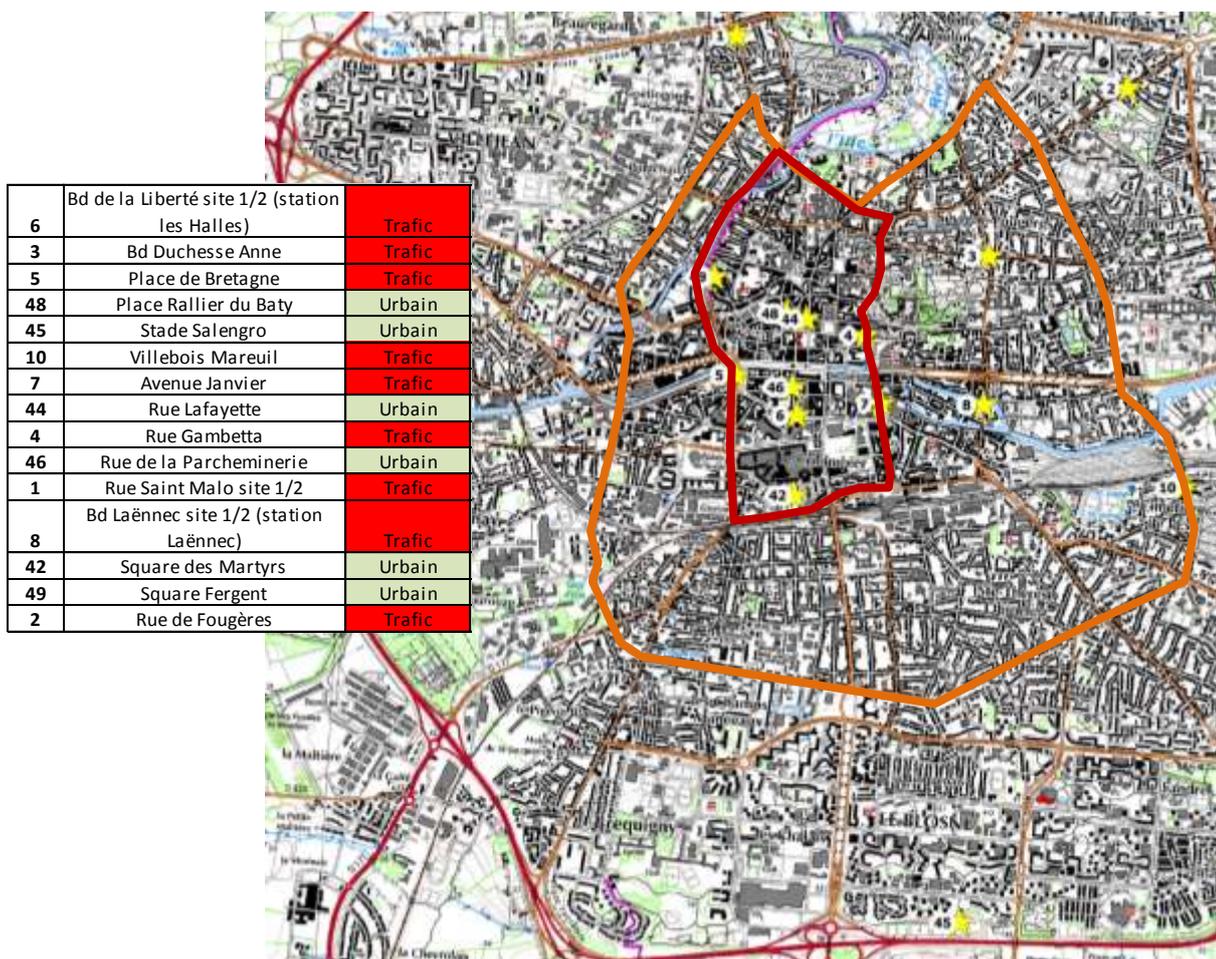


Figure 14 : Localisation des 15 sites prélevés en commun en 2003 et 2014

Les résultats des concentrations mesurées en 2003 et 2014 sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 5 : Résultats des concentrations mesurées au niveau des 15 sites prélevés en communs en 2003 et 2014

	Moyenne annuelle 2014	Moyenne annuelle 2003
Bd de la Liberté site 1/2 (station les Halles)	46	38
Bd Duchesse Anne	48	42
Place de Bretagne	58	50
Place Rallier du Baty	27	26
Stade Salengro	27	26
Villebois Mareuil	35	34
Avenue Janvier	50	53
Rue Lafayette	28	32
Rue Gambetta	33	38
Rue de la Parcheminerie	23	27
Rue Saint Malo site 1/2	49	60
Bd Laënnec site 1/2 (station Laënnec)	31	39
Square des Martyrs	19	25
Square Fergent	19	25
Rue de Fougères	22	35

Le graphique ci-dessous présente les ratios des concentrations mesurées en 2014 par rapport à celles mesurées en 2003.

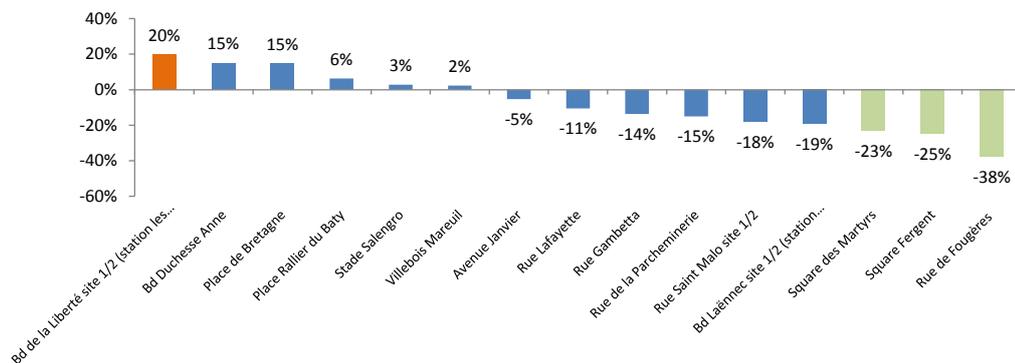


Figure 15 : Ratio des concentrations en NO₂ : 2014/2003

Sur les 15 sites communs ayant fait l'objet de mesures lors des campagnes 2003 et 2014, 3 sites enregistrent des diminutions des concentrations supérieures à 20% :

- Site 42 : Square des martyrs (-23%) ;
- Site 49 : Square Fergent (-25%) ;
- Site 2 : Rue de Fougères (-38%).

Au contraire, 1 site présente une concentration moyenne supérieure de 20% par rapport à 2003 à savoir le site des Halles, boulevard de la Liberté, au niveau duquel se trouve la station de mesure fixe.

Les 11 autres points présentent des variations des concentrations inférieures à $\pm 20\%$.

Nous tenons toutefois à souligner que la comparaison de mesures entre deux années n'est pas suffisante pour tirer des conclusions sur l'évolution des concentrations à plus long terme.

En effet, sans compter les notions d'incertitudes des mesures, d'autres facteurs sont à considérer comme les conditions météorologiques notamment, qui peuvent expliquer certaines variations des moyennes annuelles, sans pour autant pouvoir les généraliser.

Etude de la répartition spatiale du dioxyde d'azote sur l'agglomération rennaise

Afin d'illustrer ces propos, le graphique ci-dessous présente les concentrations maximales, les concentrations moyennes annuelles et les maxima horaires relevés de 1998 à 2013 au niveau de la station trafic des Halles (boulevard de la Liberté) à Rennes.

Ainsi, même si de légères variations des moyennes annuelles sont constatées suivant les années, la concentration moyenne est globalement stable depuis 1998.

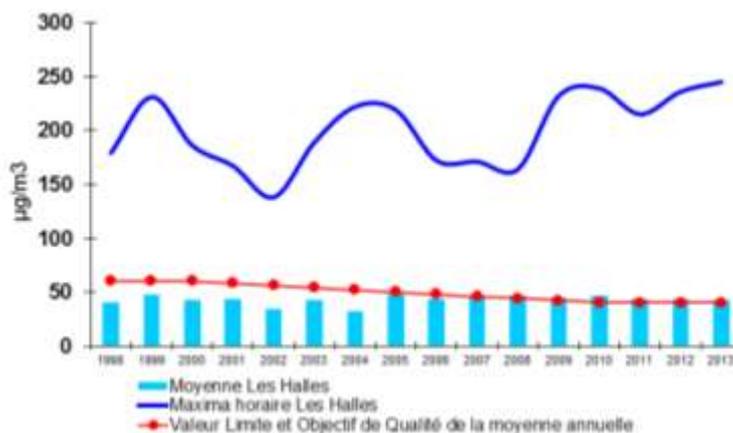


Figure 16 : Evolution des concentrations des moyennes annuelles [source : Bilan annuel Air Breizh 2013]

Le graphique ci-après présente les résultats du TMJA (Trafic Moyen Journalier Annuelle) au niveau du Boulevard Liberté de 2004 à 2012, dernière année disponible à ce jour.

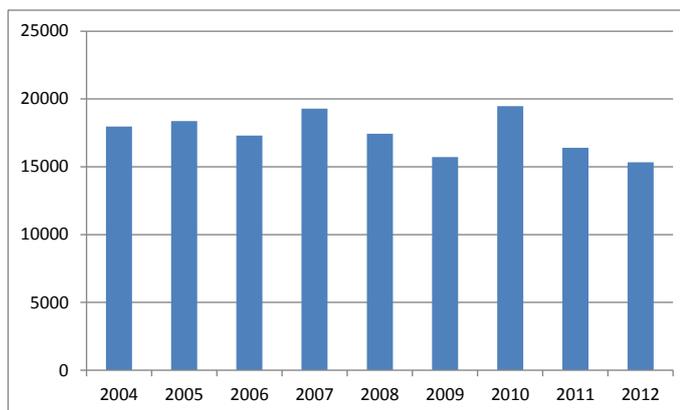


Figure 17 : Evolution du TMJA Boulevard de la Liberté à Rennes

Au même titre que les concentrations mesurées au niveau de la station trafic des halles, de légères variations du trafic sont constatées suivant les années, sans qu'une tendance soit visible malgré l'augmentation des concentrations mesurées via les tubes passifs entre 2003 et 2014.

VI. Conclusions

Les tubes à diffusion passive permettent d'étudier la répartition spatiale du dioxyde d'azote sur une zone d'étude. Leur faible coût et leur simplicité d'utilisation permettent de réaliser des mesures sur un nombre important de sites.

Des campagnes de mesures ont été réalisées par Air Breizh entre janvier et juillet 2014, sur 50 sites de l'agglomération rennaise dont près de 90% en situation de proximité trafic. Ces campagnes ont été réparties sur différentes saisons, afin d'estimer une concentration moyenne annuelle, en s'affranchissant des conditions météorologiques.

La qualité des résultats a été vérifiée par différents contrôles : utilisation de blancs, multiplication des tubes sur un même site, comparaison tubes / analyseurs. Selon les résultats de ces contrôles, l'ensemble des résultats de la campagne a été validé.

Les concentrations calculées à partir des échantillonneurs tendent toutefois à surestimer les concentrations des analyseurs. Ces concentrations, à considérer plutôt comme des ordres de grandeur, sont donc à examiner avec prudence.

Cette étude a été menée en complément de la cartographie des concentrations en dioxyde d'azote réalisée en 2014 par Air Breizh par modélisation atmosphérique, sur la base de l'inventaire des émissions 2008 à Rennes. Cette dernière avait mis en évidence des concentrations proches, voire supérieures, à la valeur limite aux abords de la rocade ainsi que de nombreux axes routiers notamment en centre-ville.

L'objectif de cette étude était donc notamment de confirmer ce constat via des mesures terrain, sur une période suffisamment représentative.

Sur la période d'échantillonnage, les concentrations moyennes en dioxyde d'azote en situation trafic varient de 20 (la Robiquette) à 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Place de Bretagne). Les concentrations enregistrées sur 30 % des sites trafic dépassent la valeur limite annuelle.

La mesure réalisée à proximité de la station fixe des Halles (46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) est supérieure à la valeur limite. Rappelons que la moyenne annuelle mesurée via l'analyseur en 2014 au niveau de cette station, était de 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et donc très légèrement supérieure à la valeur limite.

Le site de la station des Halles n'est toutefois pas le site le plus exposé, puisque 8 autres sites présentent des concentrations supérieures, d'après les mesures réalisées.

Les résultats de ces mesures sont globalement cohérents avec la cartographie réalisée par modélisation atmosphérique des émissions de l'année 2008.

La rocade et ses abords, ainsi que les axes routiers les plus fréquentés, sont les plus touchés.

VII. Annexes

Annexe I : Cartographie des concentrations moyennes en dioxyde d'azote mesurées

Annexe II : Comparaison des résultats des mesures à la modélisation (effectuée dans le cadre de la mise à jour du PPA en 2014)

Annexe III : Méthode de calcul des concentrations

Annexe IV : Adresses et typologies des sites de mesures



Annexe I :

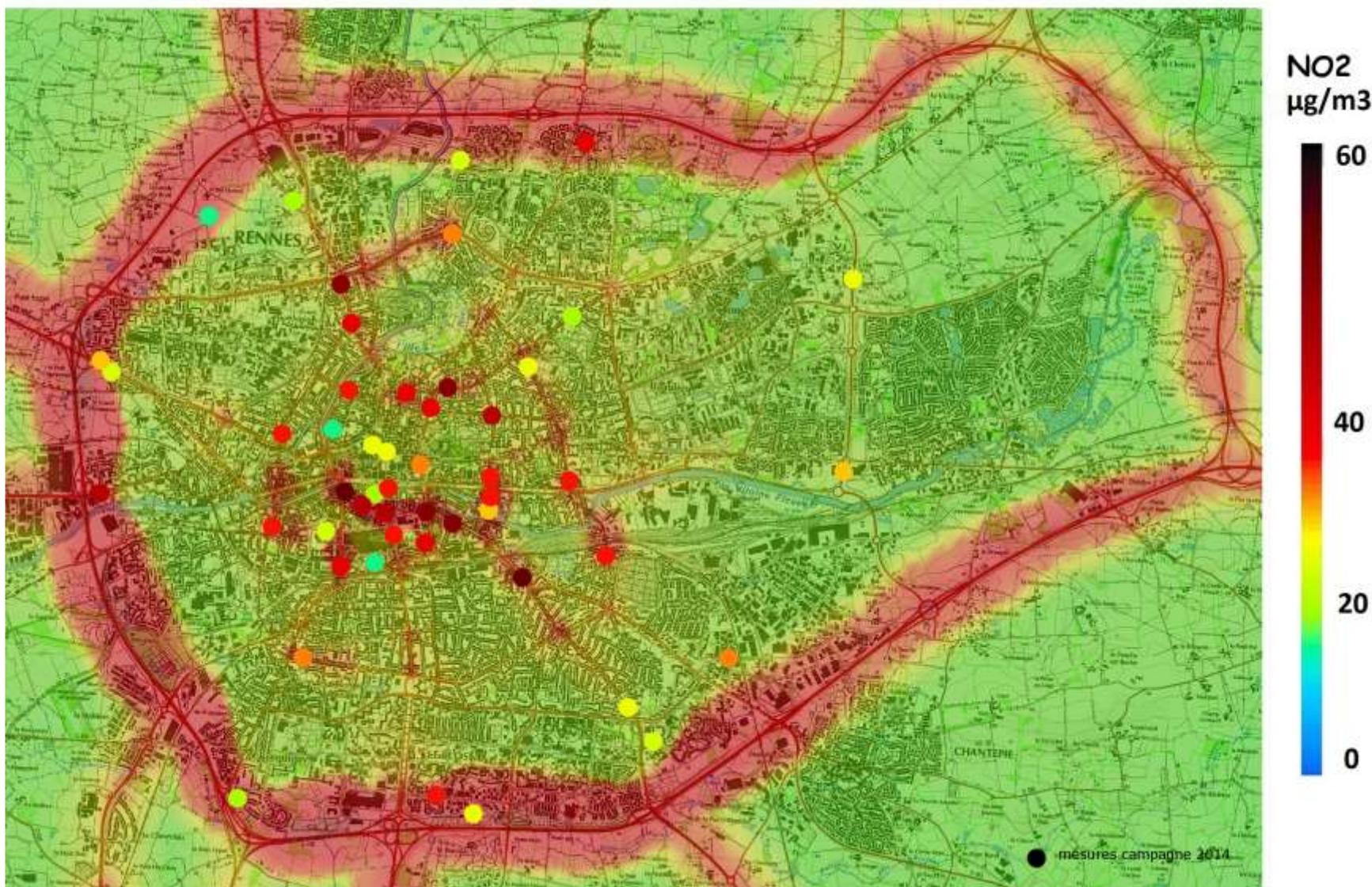
Cartographie des concentrations moyennes en dioxyde d'azote mesurées



Annexe II :

Comparaison des résultats des mesures à la modélisation

Comparaison de la cartographie des concentrations en dioxyde d'azote issue de la modélisation (révision du PPA) et des résultats des prélèvements de la campagne 2014





Annexe III :

Méthode de calcul des concentrations

Les concentrations fournies par le laboratoire sont calculées avec un débit d'échantillonnage des tubes de 0,8536 ml/min, déterminé à une température de 9°C.

Ce débit a été corrigé en fonction de la température réelle lors des prélèvements, à savoir celle mesurée au niveau de la station Météo France de St Jacques de la Lande (35).

La formule suivante a été utilisée pour déterminer le débit d'échantillonnage lors de chaque série de mesures [source : Review of the application of diffusive samplers for the measurement of nitrogen dioxide in ambient air - EUR 23793 EN - 2009] :

$$D_{ech} = D_{20} \times \left(\frac{\bar{T} + 273}{293} \right)^{1.5}$$

Avec :

D_{ech} : Débit d'échantillonnage corrigé selon la température mesurée lors des prélèvements (en ml/min)

D_{20} : Débit d'échantillonnage déterminé théoriquement à 20°C soit 0.9017 ml/min

T : Température réelle lors des prélèvements (en °C)

La concentration calculée par le laboratoire est ensuite corrigée d'après ce débit d'échantillonnage réel comme suit :

$$C_{in\ situ} = C_{passam} \times (D_{passam} / D_{ech})$$

Avec :

$C_{in\ situ}$: Concentration massique calculée d'après la température réelle lors des prélèvements (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{passam} : Concentration calculée par le laboratoire à partir d'un débit d'échantillonnage de 9°C (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

D_{passam} : Débit déterminé par le laboratoire à 9°C, soit 0.8536 ml/min

D_{ech} : Débit d'échantillonnage calculé d'après la température lors des prélèvements (en ml/min)

Enfin, comme requis par la Directive 2008/50/CE, les concentrations mesurées doivent être rapportées à des conditions normalisées comme suit, à 20°C et 101.3 kPa [source : norme NF EN 16339 - Air ambiant - Détermination de la concentration du dioxyde d'azote au moyen d'échantillonneurs à diffusion – septembre 2013].

$$C_{p,T} = C \times \frac{101,3}{P_{atm}} \times \frac{\bar{T}}{293}$$

Avec :

$C_{p,T}$: concentration massique standardisée du composé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

C : concentration massique du composé aux conditions d'exposition en $\mu\text{g}/\text{m}^3 = C_{in\ situ}$

P_{atm} : pression atmosphérique moyenne de la période de prélèvement en kPa

T : température moyenne de la période de prélèvement en Kelvin

La moyenne annuelle des résultats a ensuite été calculée à partir des résultats de chaque série de mesures, pondérés par les temps d'exposition.

$$\text{Moyenne annuelle (de l'année A)} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{nombre de couples de données de l'année A}} N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^{\text{nombre de couples de données de l'année A}} N_i}$$

C_i : concentration validée correspondant à l'échantillon i de l'année A (en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

N_i : durée de prélèvement de l'échantillon i de l'année A (en heure)



Annexe IV :

Adresses et typologies des sites de mesures

Adresses et typologies des sites de mesures

N° site	type de site	Adresse
1	Trafic	Rue Saint Malo site 1/2
2	Trafic	Rue de Fougères
3	Trafic	Bd Duchesse Anne
4	Trafic	Rue Gambetta
5	Trafic	Place de Bretagne
6	Trafic	Bd de la Liberté site 1/2
7	Trafic	Avenue Janvier
8	Trafic	Bd Laënnec site 1/2
9	Trafic	Bd Laënnec site 2/2
10	Trafic	Villebois Mareuil
11	Trafic	Rue Guéhenno
12	Trafic	Rue de Lorient
13	Trafic	Rue Le Sage
14	Trafic	Bd Magenta
15	Trafic	Bd de la Tour d'Auvergne
16	Trafic	Rue d'Isly
17	Trafic	Rue St Hélier site 1/2
18	Trafic	Rue St Hélier site 2/2
19	Trafic	Rue Châteaudun
20	Trafic	Bd de Metz
21	Trafic	Bd de Verdun
22	Trafic	Rue Malakoff
23	Trafic	Bd Clémenceau
24	Trafic	Allée de Montbarrot
25	Trafic	Rue du Pré botté
26	Trafic	La Robiquette 1/2
27	Trafic	Bd des Alliés site 1/2
28	Trafic	Bd des Alliés site 2/2
29	Trafic	Bd de Strasbourg
30	Trafic	Bd de la Liberté site 2/2
31	Trafic	Rue Pierre Abélard
32	Trafic	Bd du Portugal
33	Trafic	Boulevard d'Armorique
34	Trafic	Rue de Bignon
35	Trafic	Rue d'Antrain
36	Trafic	Rue Legraverend
37	Trafic	Rue St Laurent
38	Trafic	Avenue de Couesnon
39	Trafic	Rue de Vern
40	Trafic	Rue Michel Gérard
41	Trafic	Rue St Malo site 2/2
42	Urbain	Square des Martyrs
43	Urbain	Square du Menou
44	Urbain	Rue Lafayette
45	Urbain	Stade Salengro
46	Urbain	Rue de la Parcheminerie
47	Trafic	Champeaux
48	Urbain	Place Rallier du Baty
49	Urbain	Square Fergent
50	Urbain	Parc Beauregard