

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

---

## Spatialisation des concentrations en NO et NO<sub>2</sub> dans la région de Bruxelles-Capitale

---

*Auteurs :*

DE MEUE Guillaume  
MOENS DE HASE Henri  
OZTURK Dilhan

*Encadrants :*

BOGAERT Patrick  
HANERT Emmanuel

Janvier 2020



## Résumé

---

L'objectif principal de ce travail consiste à modéliser et spatialiser la concentration en monoxyde d'azote et en dioxyde d'azote pour Bruxelles-Capitale en se basant sur les données fournies par l'institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE).

Pour ce faire, les concentrations en oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) sont déterminées à partir de la corrélation entre les  $\text{NO}_x$  et le black carbon (données fournies par le modèle CANS<sub>BC</sub> de l'IBGE). Afin de dissocier les concentrations en oxydes d'azote en deux, une pour le monoxyde d'azote (NO) et l'autre pour le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), le rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  est déterminé à l'aide d'une courbe caractéristique de ce rapport, dont l'amplitude est corrigée à l'aide de la concentration en black carbon.

Ce travail permettra d'aider à trouver des pistes de modélisation plus précises et à sensibiliser le public aux émissions d'oxydes d'azote, notamment celles dues au trafic routier. Ceci se fera grâce à l'utilisation de cartes où le NO et le  $\text{NO}_2$  sont spatialisés.

## Abstract

---

The main objective of this work is to model and spatialize the concentration of nitrogen monoxide and nitrogen dioxide for Brussels Capital based on data provided by Bruxelles Environnement (IBGE).

To this end, the concentrations of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) are determined from the correlation between  $\text{NO}_x$  and black carbon (data provided by the IBGE CANS<sub>BC</sub> model). In order to dissociate the concentrations of nitrogen oxides in two, one for nitrogen monoxide (NO) and the other for nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), the  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  ratio is determined by a characteristic curve of this ratio whose amplitude is corrected using the concentration of black carbon.

This work will help to find more accurate modelling trails and raise public awareness of nitrogen oxide emissions, especially those due to road traffic. It is done through the use of maps where NO and  $\text{NO}_2$  are spatialized.

# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2 Présentation et analyse des données</b>	<b>4</b>
2.1 Description du réseau de monitoring . . . . .	4
2.2 Chimie des composés . . . . .	4
2.3 Description de la dynamique des concentrations . . . . .	5
2.3.1 Dynamique journalière . . . . .	5
2.3.2 Dynamique hebdomadaire . . . . .	7
<b>3 Modélisation</b>	<b>9</b>
3.1 Données sources : BC spatialisé . . . . .	9
3.2 La concentration en NO <sub>x</sub> . . . . .	9
3.3 Le rapport $\frac{NO}{NO_2}$ . . . . .	11
3.4 Distinction entre NO et NO <sub>2</sub> . . . . .	13
3.5 Résidus . . . . .	13
<b>4 Résultats et validation</b>	<b>15</b>
4.1 Dynamique des concentrations en NO, NO <sub>2</sub> et NO <sub>x</sub> . . . . .	15
4.2 Cartes . . . . .	16
<b>5 Discussion des limites du modèle</b>	<b>17</b>
5.1 Données sources . . . . .	17
5.2 Saisonnalité . . . . .	17
5.3 Estimation des concentrations en NO <sub>x</sub> . . . . .	18
5.4 Rapport $\frac{NO}{NO_2}$ . . . . .	19
5.5 Cartes . . . . .	19
<b>6 Conclusion</b>	<b>19</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>21</b>
<b>7 Annexes</b>	<b>22</b>
7.1 Estimation des concentrations en NO et NO <sub>2</sub> indépendamment de l'effet de l'ozone. . . . .	22
7.2 Diagramme de Forrester utilisé en Scilab . . . . .	26
7.3 Evolution journalière moyenne des concentrations en NO, NO <sub>2</sub> et NO <sub>x</sub> à différentes stations . . . . .	27
7.3.1 Molenbeek . . . . .	27
7.3.2 Ixelles . . . . .	28
7.3.3 Haren . . . . .	30
7.3.4 Uccle . . . . .	31
7.4 Evolution des concentrations en NO, NO <sub>2</sub> et NO <sub>x</sub> à Ixelles durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 . . . . .	33
7.5 Cartes . . . . .	35

## Table des figures

1	Evolution de l'O <sub>3</sub> et des NO <sub>x</sub> au cours d'une journée moyenne . . . . .	5
2	Evolution du rapport de concentration $\frac{NO}{NO_2}$ au cours d'une journée moyenne. Chaque courbe correspond à une station avec une couleur différente par station. La courbe en pointillée correspond à la moyenne de toutes les stations. . . . .	6
3	Evolution du BC et des NO <sub>x</sub> au cours d'une journée moyenne [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] . . . . .	7
4	Evolution des NO <sub>x</sub> au cours d'une semaine moyenne pour différentes stations. Le weekend commence à partir de l'heure 120 où on peut remarquer que la concentration en NO <sub>x</sub> est plus faible. . . . .	8
5	Régression sur log(NO <sub>x</sub> ) en fonction du log(BC) (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en utilisant l'ensemble des données moyennées pour les différentes stations (weekends exclus) . . . . .	9
6	Régression sur log(NO <sub>x</sub> ) en fonction du log(BC) (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en utilisant les mesures entre 6h00 et 9h00 des différentes stations (weekends exclus) . . . . .	10
7	Régression sur W en fonction du BC pour les stations disposant de mesures de BC . . . . .	12
8	Régression sur W en fonction du BC à chacune des stations, en estimant le BC à partir des NO <sub>x</sub> s'il n'est pas disponible . . . . .	13
9	Distribution des résidus NO <sub>2</sub> selon l'heure de la journée . . . . .	14
10	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek . . . . .	15
11	Evolution des concentrations en NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek . . . . .	15
12	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek . . . . .	16
13	Concentration moyenne en NO <sub>2</sub> à Bruxelles durant les heures de pointe (7h-10h et 16h-19h) .	17
14	Consommation d'ozone à Molenbeek moyenne pour le mois de septembre . . . . .	22
15	Courbe moyenne de NO à Molenbeek sans la consommation d'ozone pour le mois de septembre .	23
16	Courbe moyenne de NO <sub>2</sub> à Molenbeek sans l'apport par réaction du NO avec l'ozone pour le mois de septembre . . . . .	24
17	Evolution des concentrations en NO pour une semaine aléatoire sur base d'un modèle système .	25
18	Evolution des concentrations en NO <sub>2</sub> pour une semaine aléatoire sur base d'un modèle système . . . . .	25
19	Diagramme de Forrester utilisé comme base sur Scilab : Dynamique de la concentration en O <sub>3</sub> , NO et NO <sub>2</sub> . . . . .	26
20	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Molenbeek . . . . .	27
21	Evolution des concentrations en NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Molenbeek . . . . .	27
22	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Molenbeek . . . . .	28
23	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station d'Ixelles . . . . .	28
24	Evolution des concentrations NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station d'Ixelles . . . . .	29
25	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station d'Ixelles . . . . .	29
26	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren . . . . .	30
27	Evolution des concentrations NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren . . . . .	30
28	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren . . . . .	31
29	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Uccle . . . . .	31
30	Evolution des concentrations en NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Uccle . . . . .	32

31	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant une journée moyenne à la station de Uccle . . . . .	32
32	Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles . . . . .	33
33	Evolution des concentrations en NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles . . . . .	33
34	Evolution des concentrations en NO <sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles . . . . .	34

# 1 Introduction

Dans le cadre du cours "Projet intégré en technologies et gestion de l'information" (LBIRE2211), il nous est proposé de modéliser les concentrations en  $\text{NO}_x$  dans l'air à Bruxelles. Ce projet émane d'une demande de l'institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE).

L'IBGE est un institut qui se charge de mener des recherches, de planifier et de prodiguer des conseils sur des questions liées à l'environnement. Cela permet d'aider les autorités et les entreprises bruxelloises à élaborer des plans d'actions. Ses domaines d'activités recouvrent l'environnement au sens large et un des domaines lié à l'information et la sensibilisation concerne la qualité de l'air de Bruxelles.

L'objectif de ce projet est de réaliser une modélisation fidèle des  $\text{NO}_x$  dans l'air et de spatialiser les concentrations en NO et en  $\text{NO}_2$  dans la région de Bruxelles-Capitale. Ce projet s'inscrit dans l'aide à la communication à l'égard du grand public sur les pollutions en  $\text{NO}_x$ . L'ensemble du travail a été réalisé par trois étudiants en 2<sup>e</sup> année de master bioingénieur. Ce projet a été supervisé par les professeurs Patrick Bogaert et Emmanuel Hanert avec l'aide d'Oliver Brasseur, représentant de l'IBGE.

## Contexte

La pollution en  $\text{NO}_2$  est un problème de plus en plus présent dans les grandes villes, qui est principalement lié à l'augmentation du trafic routier (Roussel, 1993). En 2016, une procédure d'infraction a été ouverte au niveau européen contre la Belgique pour avoir dépassé la valeur limite de concentration annuelle moyenne en  $\text{NO}_2$  qui est de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La norme a encore été dépassée dans certains endroits de Bruxelles-Capitale en 2017 et 2018. Outre les problèmes de santé publique que cela engendre, la Belgique risque une amende importante de la commission européenne si elle ne réussit pas à diminuer ces émissions en  $\text{NO}_2$ .

Plusieurs travaux ont déjà été réalisés dans le cadre de l'estimation des pollutions aériennes à Bruxelles. L'IBGE a utilisé un modèle dénommé CANSBC permettant d'estimer les concentrations en black carbon dans deux rues canyons à Bruxelles sur base des conditions météorologiques et de la mesure du trafic routier (Brasseur et al., 2015). Dans le cadre du projet ExpAIR, une spatialisation des concentrations en black carbon a été réalisée pour les principales rues de Bruxelles.

Il a été observé que les concentrations en black carbon et en  $\text{NO}_x$  à Bruxelles sont corrélées car elles proviennent de sources similaires qui sont principalement le trafic routier, le secteur tertiaire, le chauffage et les activités industrielles (IBGE, 2019). Le black carbon pourrait donc être dans une certaine mesure un indicateur des pollutions en  $\text{NO}_2$ . Nous avons tenté dans le cadre de ce travail de modéliser et spatialiser les concentrations en  $\text{NO}_2$  et en NO sur base des mesures en  $\text{NO}_2$ , en NO, en  $\text{O}_3$  et en black carbon effectuées sur le réseau télémétrique de Bruxelles. L'objectif final de ce travail est de fournir une cartographie permettant d'identifier les rues les plus exposées à la pollution aux  $\text{NO}_2$ .

## 2 Présentation et analyse des données

### 2.1 Description du réseau de monitoring

L'ensemble des données a été fourni par l'IBGE. Les mesures proviennent du réseau de stations télémétriques de Bruxelles Environnement, auxquelles viennent s'ajouter les stations de mesures du parlement européen (De Villers et al., 2016). Ce réseau a été créé de manière à caractériser les différents environnements Bruxellois par rapport à leurs expositions aux pollutions aériennes. Quatre composés sont mesurés à ces stations : le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et le black carbon (BC<sup>1</sup>).

La plupart des stations ne mesurent pas tous les polluants. Le descriptif de l'environnement des stations ainsi que des polluants mesurés aux dites stations se trouvent dans la Table 1. Le réseau réalise des mesures automatiques en continu par période de 1 heure. Les données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent de la période allant du 1 janvier 2014 au 31 juillet 2019. Les stations du parlement EU et de la rue Belliard apportent des mesures sur une période plus courte que le reste du réseau, s'étalant du 1 janvier 2014 au 30 juin 2017.

TABLE 1 – Caractéristiques des stations et des polluants mesurés

Stations	Type	Environnement	NO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	BC
Berchem	Station de fond	Résidentiel	X	X	X	
Avant-Port (Haren)	Industriel	Industriel et trafic	X	X	X	X
Meudon	Station urbaine*	Résidentiel près de zone industrielle	X	X	X	
Molenbeek	Trafic	Trafic dense industrie/résidentiel	X	X	X	X
Uccle	Station de fond	Station de fond, résidentiel	X	X	X	X
Woluwe	Trafic	Trafic dense, environnement ouvert	X	X	X	X
Ste Catherine	Station urbaine*	Trafic commerces résidentiel	X	X	X	
Parlement EU	Station urbaine*	Zone piétonne	X	X	X	
Carrefour Arts-Loi	Trafic	Trafic dense, important carrefour	X	X		
Avenue de la couronne	Trafic	Rue canyon, trafic dense	X	X		X
Eastman-Belliard	Trafic	Rue canyon, trafic dense	X	X		

\*Les stations urbaines se trouvent à l'écart d'un trafic intense.

### 2.2 Chimie des composés

#### Chimie de l'ozone (O<sub>3</sub>)

L'O<sub>3</sub> des basses couches de la troposphère est une espèce cible en matière de pollution atmosphérique. Si la molécule a des effets phyto-toxiques sur la production agricole lorsqu'elle est présente en grande concentration, elle peut également être nocive pour la santé humaine. Connue principalement pour son rôle d'oxydation, l'O<sub>3</sub> troposphérique réagit sous l'effet de la photodissociation produisant des radicaux OH. Ces radicaux OH ont un rôle de "détergent" dans la troposphère et peuvent réagir avec les NO<sub>x</sub> (Aumont, 2005).

#### Chimie des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Les NO<sub>x</sub> interviennent dans plusieurs réactions chimiques troposphériques. Produits à près de 70% par le trafic routier (Joumard, 1989), les NO<sub>x</sub> analysés par les réseaux regroupent deux espèces chimiques : le NO et NO<sub>2</sub>. La quantité de NO<sub>x</sub> que rejette une voiture moyenne par km est une information pouvant être estimée, ainsi que le rapport NO/NO<sub>2</sub> qui compose les émanations de gaz. Le NO et le NO<sub>2</sub> forment les principaux précurseurs de l'O<sub>3</sub> troposphérique sur base de la réaction d'équilibre suivante :



1. Le Black Carbon (BC), également nommé "carbone suie", est un polluant de l'air émis lors de réactions de combustion. Il s'agit de particules primaires avec un diamètre compris entre 20 et 150 nanomètres (nm) (IBGE, 2014)

La réaction inverse est normalement favorisée ( $K \simeq 1.6 * 10^{-35}$ ). Cependant, en journée, l'équilibre de cette réaction est déplacé vers la droite sous l'effet de la lumière : le  $\text{NO}_2$  subit une photodissociation, en présence d'un rayonnement de courte longueur d'onde (comprise entre 280 et 430 nm), produisant un atome d'oxygène excité :



Si l'atome d'oxygène est suffisamment excité par la lumière, il réagit alors avec du dioxygène pour former de l' $\text{O}_3$  :



Le processus chimique inverse se produit pendant la nuit où l' $\text{O}_3$  est dégradé par le NO. D'après la constante d'équilibre, il semble que l' $\text{O}_3$  réagit très vite en présence de NO. En milieu urbain, les concentrations plus élevées en NO lors des pics de trafic routier peuvent donc fortement influencer les concentrations en  $\text{O}_3$ .

Outre le NO produit par le trafic routier, le milieu urbain est fortement susceptible d'avoir de grandes concentrations en différents hydrocarbures qui réagissent avec le NO, le rendant ainsi indisponible pour la réaction 1. Sur base du principe chimique de Le Chatelier, l'absence de NO dans la réaction 1 tend à utiliser le  $\text{NO}_2$  et l' $\text{O}_2$  pour produire de l' $\text{O}_3$  et du NO, augmentant ainsi les concentrations en  $\text{O}_3$ .

## 2.3 Description de la dynamique des concentrations

### 2.3.1 Dynamique journalière

Les données fournies par les stations ont été analysées sur le logiciel JMP pour remarquer les tendances et les dynamiques des différentes espèces chimiques. On peut observer sur la Figure 1 l'évolution journalière de ces espèces.

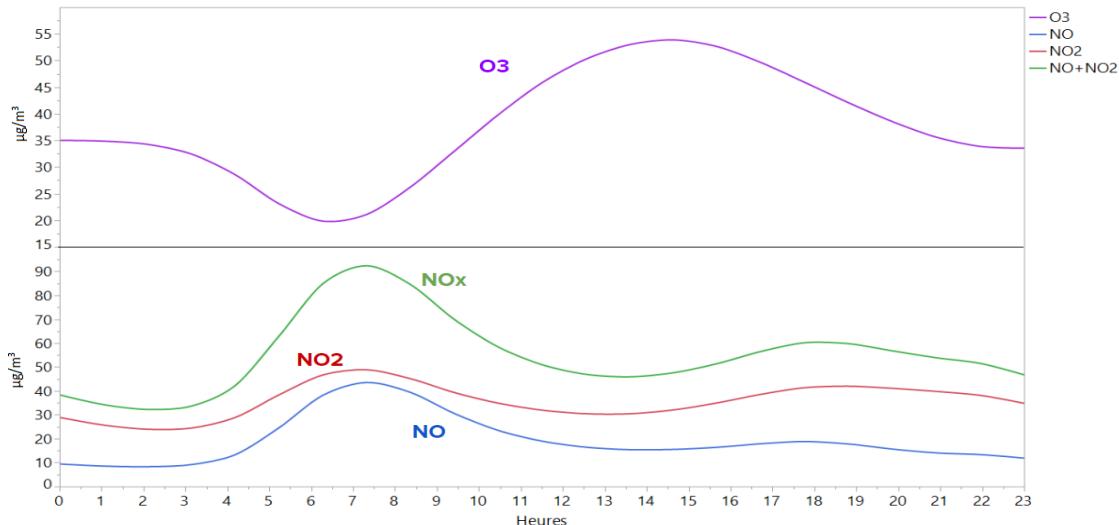


FIGURE 1 – Evolution de l' $\text{O}_3$  et des  $\text{NO}_x$  au cours d'une journée moyenne

## NO<sub>2</sub>

Durant la nuit, les concentrations diminuent continuellement et cela est attribué à la diffusion par le vent. Le matin entre 6 et 9h les concentrations augmentent de manière brutale à cause de la circulation qui s'intensifie rapidement et atteint son maximum vers 7h30 du matin. Puis les concentrations recommencent à diminuer avant de réaugmenter vers 15h, heure correspondant au retour des étudiants et travailleurs et à une augmentation de l'intensité de la circulation. La circulation étant moins dense et plus étalée dans le temps l'après-midi, la courbe de concentrations suit la même dynamique. Ce pic atteint son maximum vers 18h15 puis diminue de manière relativement constante jusqu'au petit matin.

## NO

Le NO est à un niveau assez faible le matin comparé au  $\text{NO}_2$ . Il suit la même dynamique aux heures de pointe du matin que le  $\text{NO}_2$ , à savoir une augmentation importante avec un pic vers 7h30 puis une diminution relativement légère. L'après-midi par contre la dynamique est fortement différente car même si le NO augmente légèrement, l'amplitude est bien inférieure au premier pic comparativement aux pics de  $\text{NO}_2$ .

Cette observation est surprenante puisque nous savons que le rapport d'émission de  $\text{NO}/\text{NO}_2$  est constant pour un véhicule moyen. Dès lors le NO et le  $\text{NO}_2$  devraient avoir des dynamiques similaires car ils sont tous les deux majoritairement produits par le trafic routier. Or durant l'après-midi, les courbes évoluent différemment. Il est donc cohérent de penser qu'un des composés subit une réaction chimique. Nous suspectons le NO d'avoir réagi avec l' $\text{O}_3$ . Cependant, même si l'on a observé le matin une diminution de l' $\text{O}_3$  correspondant au pic d'émission de NO, ceci n'est pas aussi marqué l'après-midi. De plus, si le NO a réagit il doit produire du  $\text{NO}_2$  or il n'y a graphiquement rien qui peut laisser penser que du  $\text{NO}_2$  a été produit.

Une autre possibilité serait qu'il y ait une accumulation des hydrocarbures au cours de la journée qui réagiraient avec le NO du 2<sup>ième</sup> pic de trafic, le rendant indisponible pour la réaction avec l' $\text{O}_3$ . Le  $\text{NO}_2$  réagirait alors pour produire de l' $\text{O}_3$  et du NO. Cette hypothèse permettrait d'expliquer l'absence de pic de NO ainsi que la légère diminution du pic de  $\text{NO}_2$  vers 15h. Cependant, les hydrocarbures ne sont pas quantifiés, rendant difficile la validation de cette hypothèse.

## Rapport $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$

Lorsqu'on observe le rapport de concentration entre le NO et le  $\text{NO}_2$  pour les différentes stations, on observe que les courbes suivent une tendance générale qui change d'amplitude selon les stations.

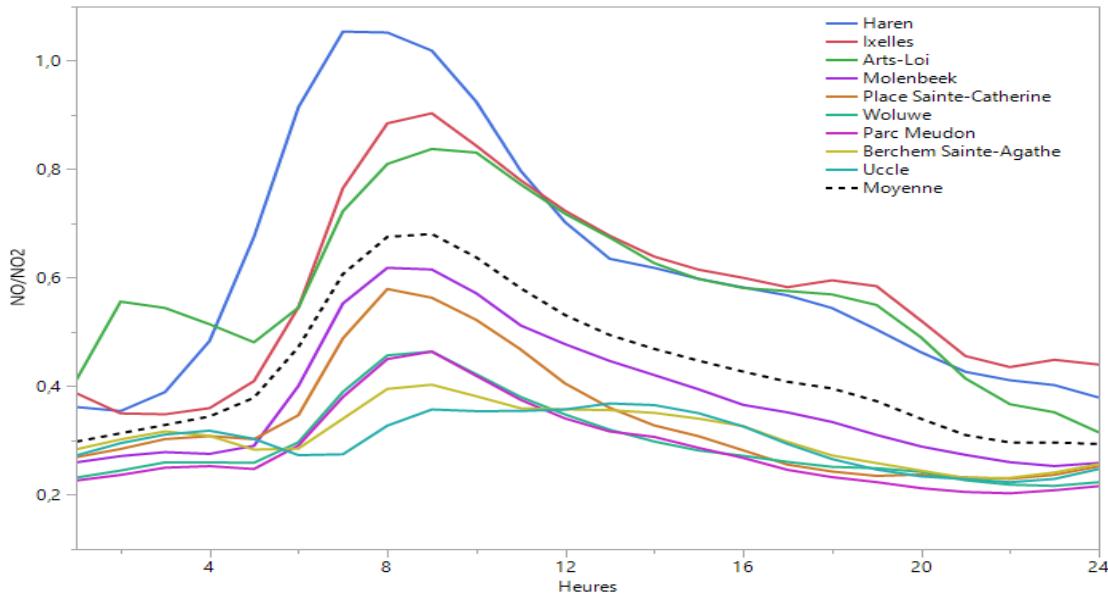


FIGURE 2 – Evolution du rapport de concentration  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  au cours d'une journée moyenne. Chaque courbe correspond à une station avec une couleur différente par station. La courbe en pointillé correspond à la moyenne de toutes les stations.

## $\text{O}_3$

L' $\text{O}_3$  semble avoir une concentration moyenne de fond autour des  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cette concentration diminue lors du premier pic de trafic à 7h en même temps que les concentrations en NO augmentent, ce qui fait sens au vu de la réaction 1. Après cela, les concentrations vont augmenter jusqu'à 15h dû à l'effet

de la lumière sur la production d' $O_3$  (réaction 2). Après 15h, la concentration en  $O_3$  commence à diminuer jusqu'à revenir à la concentration de fond vers 22h30 ce qui laisse penser que l'intensité lumineuse après 15h n'est plus suffisante pour la production d' $O_3$ .

### Relation BC et $NO_x$

Sur base des informations données par l'IBGE, il existe une corrélation entre le BC et les  $NO_x$  (IBGE, 2019). Nous avons décidé de voir comment les concentrations de ces composés évoluent au cours d'une journée moyenne.

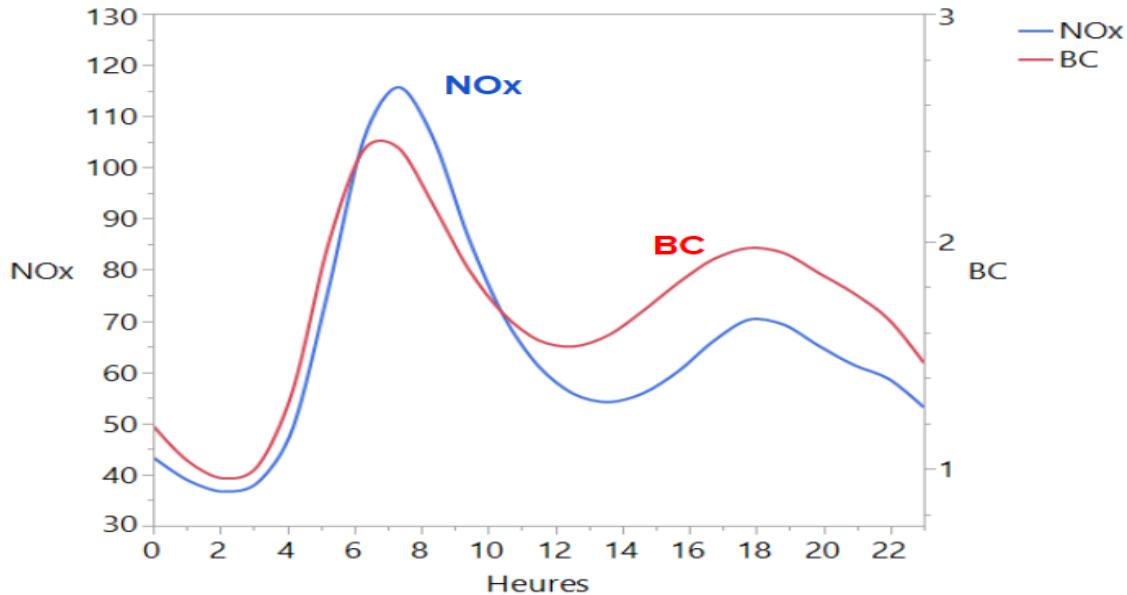


FIGURE 3 – Evolution du BC et des  $NO_x$  au cours d'une journée moyenne [ $\mu g/m^3$ ]

On peut remarquer que la forme de la courbe pour la concentration en  $NO_x$  suit relativement bien la courbe pour la concentration en BC et ce, pour les deux pics de trafic. Au deuxième pic de trafic, avec les échelles choisies, la courbe des  $NO_x$  est plus basse que celle de BC ce qui est l'inverse du premier pic de trafic. On retrouve donc la dynamique des NO vue précédemment à travers le deuxième pic de trafic.

#### 2.3.2 Dynamique hebdomadaire

Il est évident que les émissions en  $NO_x$  ne sont pas identiques pour tous les jours de la semaine puisqu'on peut s'attendre à ce que le trafic le samedi et le dimanche soit plus faible que le trafic des autres jours de la semaine (Figure 4).

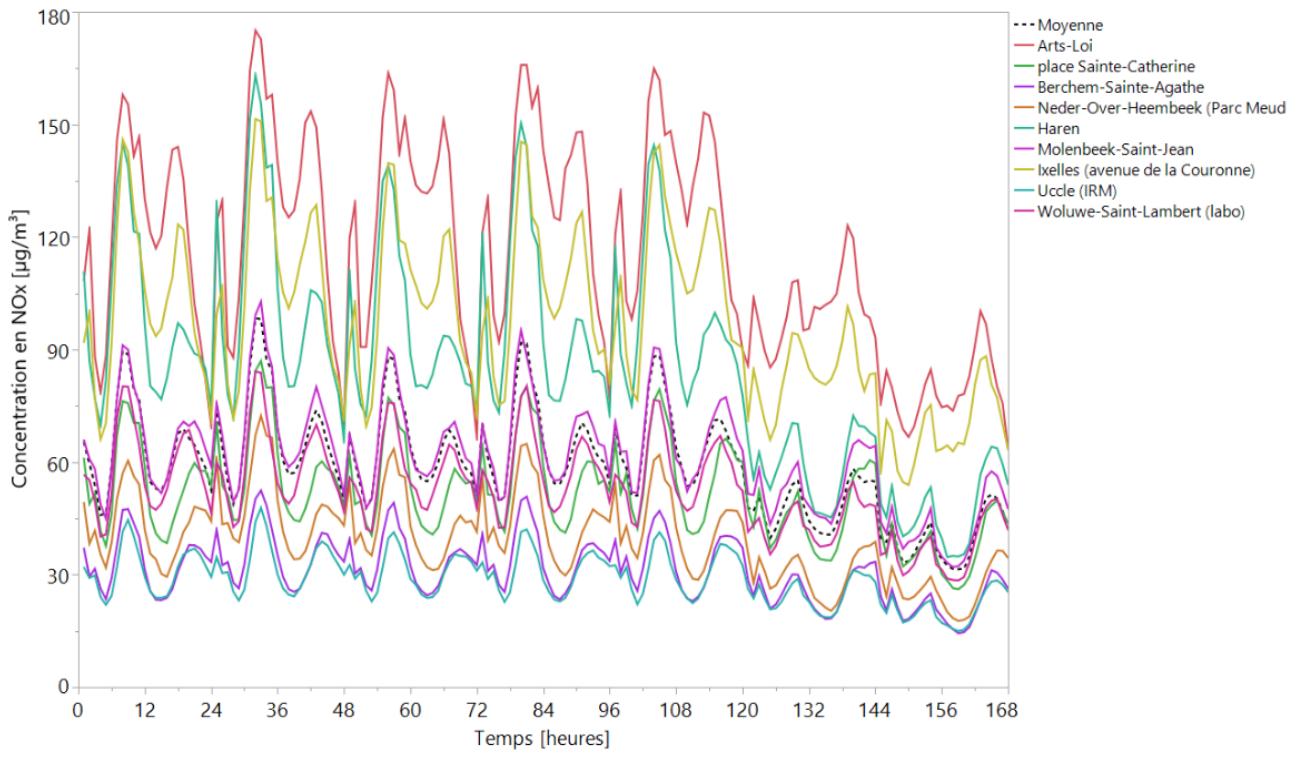


FIGURE 4 – Evolution des NO<sub>x</sub> au cours d'une semaine moyenne pour différentes stations. Le weekend commence à partir de l'heure 120 où on peut remarquer que la concentration en NO<sub>x</sub> est plus faible.

### 3 Modélisation

#### 3.1 Données sources : BC spatialisé

Suite au travail effectué dans le cadre du projet ExpAIR, il est possible d'évaluer les concentrations en BC dans les principales rues de Bruxelles. Un fichier reprenant ces résultats sous forme de shapefile a été mis à notre disposition. Les concentrations en BC sont spatialisées vectoriellement sous forme de polygones. A chaque polygone sont affectées deux valeurs de concentration en BC : l'une moyennée pour les heures de pointe (entre 7h et 10h et entre 16h et 19h) et l'autre pour les heures creuses (entre 11h et 15h). Ces valeurs s'appliquent de manière homogène à toute la surface du polygone.

Une même rue est souvent découpée en plusieurs polygones, permettant des variations de concentration au sein de celle-ci. La plupart des stations mesurant le BC n'étant pas situées directement dans une rue, il est difficile de faire un lien direct entre les mesures et la spatialisation. La stratégie employée consiste à utiliser les valeurs de BC spatialisées pour déterminer les concentrations en NO et NO<sub>2</sub>. Ceci se fait au moyen d'opérations déterminées et calibrées sur base des mesures de BC, de NO et de NO<sub>2</sub> du réseau télémétrique. La modélisation est pensée sur base horaire, en concordance avec les mesures. Elle est adaptée aux heures de pointe et aux heures creuses pour la spatialisation effectuée dans ce rapport.

#### 3.2 La concentration en NO<sub>x</sub>

La concentration totale en NO<sub>x</sub> est déterminée sur base d'une relation linéaire liant le logarithme des NO<sub>x</sub> au logarithme du BC. Les transformations logarithmiques sont utilisées dans le but d'améliorer la normalité des résidus et l'homogénéité de la variance. La relation générale, représentée à la Figure 5, est déterminée à l'aide de toutes les données moyennées pour les différentes stations, à l'exception des weekends<sup>2</sup>. Son équation est la suivante ( $R^2=0.71$ ) :

$$\log(NO_x) = 3.69 + 0.82 * \log(BC). \quad (4)$$

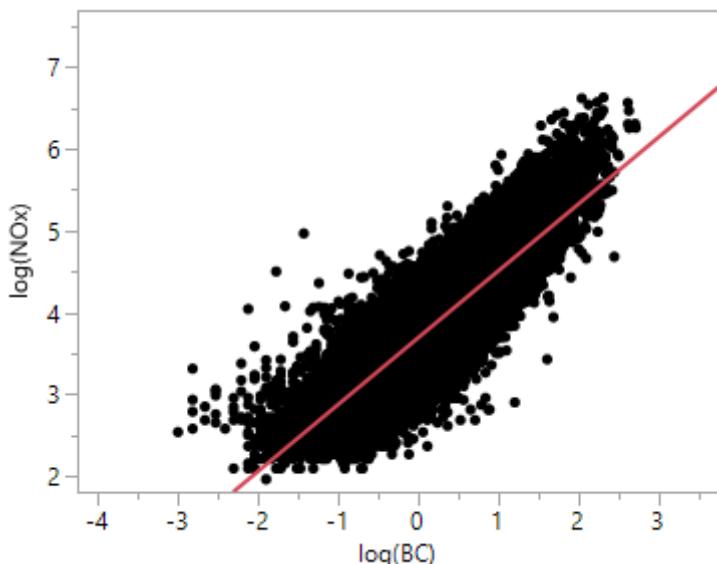


FIGURE 5 – Régression sur  $\log(NO_x)$  en fonction du  $\log(BC)$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en utilisant l'ensemble des données moyennées pour les différentes stations (weekends exclus)

2. La dynamique des polluants étant fort différentes durant les weekends à cause de la diminution du trafic automobile, il a été décidé de s'émanciper de ces mesures pour améliorer la précision du modèle.

Étant donné qu'elle ne permet pas de reproduire correctement le pic de  $\text{NO}_x$  apparaissant durant les heures de pointes matinales, la relation a également été estimée à l'aide de chaque mesure prise entre 6h00 et 9h00 en excluant toujours les weekends (Figure 6,  $R^2=0.82$ ). Les mesures de chaque station sont cette fois-ci utilisées directement sans être moyennées. La réduction du nombre d'heures prises en compte ne se traduit donc pas par une nette diminution du nombre de données utilisées. On obtient alors :

$$\log(\text{NO}_x) = 3.98 + 0.88 * \log(\text{BC}). \quad (5)$$

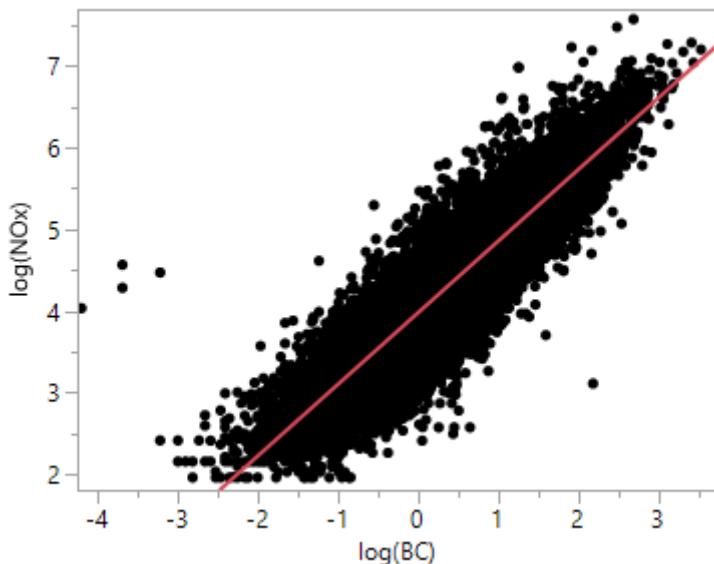


FIGURE 6 – Régression sur  $\log(\text{NO}_x)$  en fonction du  $\log(\text{BC})$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en utilisant les mesures entre 6h00 et 9h00 des différentes stations (weekends exclus)

Cette relation est utilisée pour les heures de pointe matinales, quand le trafic est le plus intense, car pour une même concentration en BC, elle estime une concentration en  $\text{NO}_x$  plus élevée qu'avec l'Equation 4.

Pour une mesure unique de BC, la concentration en  $\text{NO}_x$  estimée est donc donnée par :

$$\text{NO}_x = \exp(a + b * \log(\text{BC})). \quad (6)$$

avec a et b des coefficients qui varient selon l'heure de la journée et qui sont déterminés sur base des coefficients des deux équations précédentes (4 et 5).

Afin de ne pas provoquer de discontinuités dans l'estimation des  $\text{NO}_x$  au cours d'une journée, dues à l'utilisation de deux équations différentes, nous avons choisi d'appliquer une transition douce en faisant varier légèrement les coefficients d'heure en heure. Les calculs des valeurs des coefficients pour chaque heure de la journée sont présentés dans la Table 2.

TABLE 2 – Coefficients a et b selon l'heure de la journée

Heure	a	b
<b>0 :00 - 4 :00</b>	$\frac{3}{3} 3.69 + \frac{0}{3} 3.98$	$\frac{3}{3} 0.82 + \frac{0}{3} 0.88$
<b>5 :00</b>	$\frac{2}{3} 3.69 + \frac{1}{3} 3.98$	$\frac{2}{3} 0.82 + \frac{1}{3} 0.88$
<b>6 :00</b>	$\frac{1}{3} 3.69 + \frac{2}{3} 3.98$	$\frac{1}{3} 0.82 + \frac{2}{3} 0.88$
<b>7 :00 - 8 :00</b>	$\frac{0}{3} 3.69 + \frac{3}{3} 3.98$	$\frac{0}{3} 0.82 + \frac{3}{3} 0.88$
<b>9 :00</b>	$\frac{1}{3} 3.69 + \frac{2}{3} 3.98$	$\frac{1}{3} 0.82 + \frac{2}{3} 0.88$
<b>10 :00</b>	$\frac{2}{3} 3.69 + \frac{1}{3} 3.98$	$\frac{2}{3} 0.82 + \frac{1}{3} 0.88$
<b>11 :00 - 23 :00</b>	$\frac{3}{3} 3.69 + \frac{0}{3} 3.98$	$\frac{3}{3} 0.82 + \frac{0}{3} 0.88$

Au niveau de la carte, les concentrations en  $\text{NO}_x$  en heures creuses sont uniquement calculées sur base de la relation 4. Pour les heures de pointe, nous avons pondéré les relations 4 et 5 selon la répartition des heures de la Table 2. Les coefficients qui en résultent sont présentés à la Table 3.

TABLE 3 – Coefficients a et b utilisés pour les cartes

Tranche horaire	a	b
<b>Heures de pointe (7 :00 - 10 :00 et 16 :00 - 19 :00)</b>	$0.625*3.69 + 0.375*3.98$	$0.625*0.82 + 0.375*0.88$
<b>Heures creuses (11 :00 - 15 :00)</b>	3.69	0.82

L'Equation 6, permettant d'estimer une concentration en  $\text{NO}_x$  sur base d'une mesure de BC, n'est valable que pour une observation individuelle, en raison de la nature de la relation log-log. Elle est donc utilisée pour les mesures horaires aux stations mais pas pour la carte, à laquelle sont associées des valeurs moyennes durant les heures de pointe et les heures creuses. Pour déterminer une valeur moyenne de  $\text{NO}_x$  attendue sur base d'une valeur moyenne de  $\log(\text{BC})$ , on calcule l'espérance de la valeur des  $\text{NO}_x$  en tenant compte de la variance des données de  $\log(\text{BC})$  ayant servi à établir la relation. Cela nous donne :

$$E(\text{NO}_x) = \exp(a + b * E(\log(\text{BC})) + \frac{1}{2} * s^2), \quad (7)$$

avec s, l'écart-type estimé des valeurs de  $\log(\text{BC})$  valant :

- 0.68 pour toutes les données de la relation 4
- 0.48 pour les heures creuses de la relation 4
- 0.57 pour les heures de pointe de la relation 4
- 0.87 pour la relation 5 (heures de pointe)

### 3.3 Le rapport $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$

L' $\text{O}_3$  réagissant facilement avec le NO pour produire du  $\text{NO}_2$ , nous avons tenté de prendre en compte ce phénomène pour estimer la concentration en NO et en  $\text{NO}_2$  sur base des mesures en  $\text{NO}_x$  totaux. Malheureusement, cette approche ne nous a pas permis d'approfondir notre compréhension de la dynamique journalière de ces composés à Bruxelles. Pour ne pas alourdir le rapport, ces approches ont été reportées en annexe 7.1 et 7.2. Nous avons donc cherché une autre manière d'estimer le NO et le  $\text{NO}_2$  à partir du

total des  $\text{NO}_x$ .

Nous nous sommes basés une courbe caractéristique du rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$ . En effet, lors de l'analyse des données, il a été remarqué que l'évolution du rapport moyen  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  au cours d'une journée prenait une allure générale similaire aux différentes stations (voir Figure 2). Ce rapport permet de dissocier la concentration en  $\text{NO}_x$  en la concentration en NO et la concentration en  $\text{NO}_2$  sachant que la somme pondérée de NO et  $\text{NO}_2$  donne les  $\text{NO}_x$ .

Une courbe moyenne a donc été établie grâce aux concentrations en NO et  $\text{NO}_2$  moyennées pour les différentes stations (en pointillés sur la Figure 2). Pour chacune des stations, il est possible de multiplier cette courbe moyenne par un certain facteur correctif lié à la station concernée afin d'obtenir une nouvelle courbe qui se rapproche de celle qui est réellement observée. Par facilité, nous appelons ce facteur correctif W. Un W est déterminé à chaque station par minimisation du RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) entre la courbe du rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  observé et le produit de la courbe moyenne par W.

En pratique, la valeur de W ne peut être calculée qu'aux stations. Cependant, dans l'optique de la spatialisation à l'ensemble de Bruxelles, il est utile de pouvoir déterminer un tel facteur correctif en chaque lieu. Le rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  étant plus élevé aux endroits les plus pollués, il paraît rationnel d'expliquer W par la concentration en BC. Une régression linéaire est donc établie sur base des concentrations en BC aux stations. Les concentrations utilisées sont les moyennes de toutes les mesures disponibles indépendamment de l'heure, en excluant les weekends.

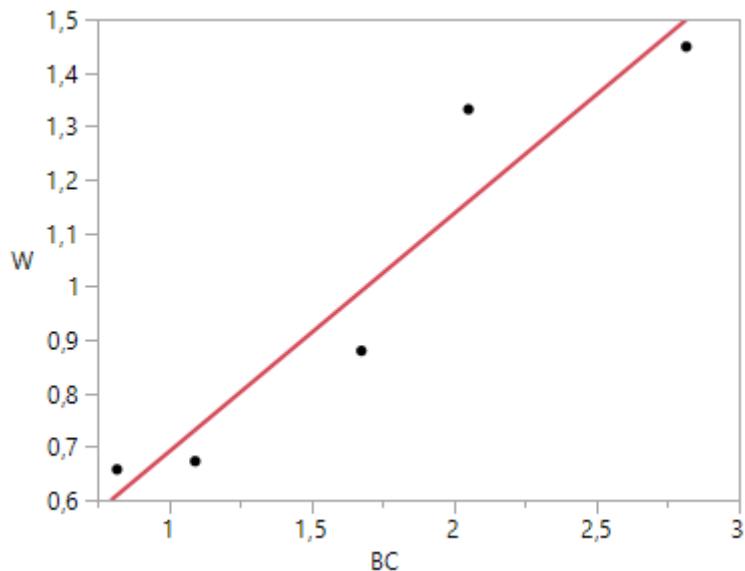


FIGURE 7 – Régression sur W en fonction du BC pour les stations disposant de mesures de BC

Ne disposant que de 5 stations mesurant le BC, cette régression est à considérer avec précaution malgré un bon  $R^2(0.91)$ . C'est pourquoi une seconde régression de ce type a été réalisée. Pour les stations ne mesurant pas le BC, le BC est estimé à partir des mesures de  $\text{NO}_x$  (NO et  $\text{NO}_2$ ). On utilise pour cela la relation inverse de l'Equation 4, à savoir :

$$\log(\text{BC}) = -3.12 + 0.87 * \log(\text{NO}_x). \quad (8)$$

L'utilisation de concentrations moyennes demande une rectification à l'aide de la variance des  $\text{NO}_x$ , la valeur moyenne de BC estimée vaut donc :

$$E(\text{BC}) = \exp(-3.12 + 0.87 * E(\log(\text{NO}_x)) + \frac{1}{2} * s^2), \quad (9)$$

avec  $s = 0.66$ , l'écart-type des valeurs de  $\log(\text{NO}_x)$ . On dispose ainsi de 11 valeurs de BC pour faire la régression ( $R^2 = 0.79$ ). Cette dernière est utilisée pour déterminer le facteur correctif W à partir de la mesure de BC. Pour obtenir le rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  en un lieu et à une heure donnée, il faut donc multiplier la valeur moyenne du rapport à l'heure considérée (indépendante du lieu) par le W obtenu via la concentration en BC au lieu et à l'heure en question.

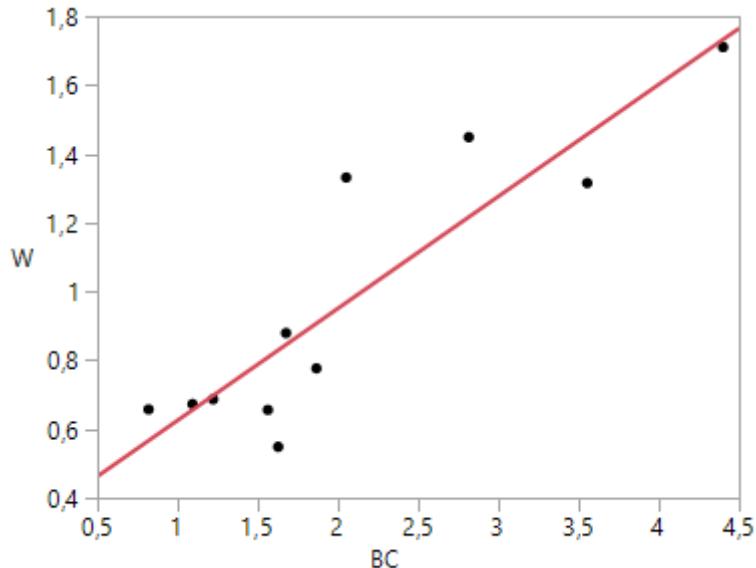


FIGURE 8 – Régression sur W en fonction du BC à chacune des stations, en estimant le BC à partir des  $\text{NO}_x$  s'il n'est pas disponible

Ne disposant que de valeurs de BC spatialisées moyennées pour des tranches horaires fixées, les valeurs de rapport moyen utilisées sont les moyennes de ces rapports moyens horaires d'une part entre 7h-10h et 16-19h et d'autre part entre 11h et 15h. Le rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  moyen vaut 0.51 en heure de pointe et 0.47 en heure creuse.

### 3.4 Distinction entre NO et $\text{NO}_2$

Une fois la concentration totale en  $\text{NO}_x$  et le rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  connus, il est possible de retrouver les concentrations en NO et en  $\text{NO}_2$  séparément. Précisons que si la concentration en  $\text{NO}_x$  en ppm est simplement la somme des concentrations en NO et en  $\text{NO}_2$  en ppm, ce n'est pas le cas lorsqu'on travaille en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il est nécessaire d'employer des facteurs de conversion prenant en compte la masse molaire et le volume molaire des gaz. La somme des  $\text{NO}_x$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  est équivalente à

$$\text{NO}_x = 1.912 * \left( \frac{\text{NO}_2}{1.912} + \frac{\text{NO}}{1.247} \right)$$

Le calcul des concentrations séparées en NO et  $\text{NO}_2$  est donc donné par :

$$\text{NO}_2 = \frac{\text{NO}_x}{1 + \frac{1.912}{1.247} * \frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}} \quad (10)$$

$$\text{NO} = \frac{\text{NO}}{\text{NO}_2} * \text{NO}_2 \quad (11)$$

### 3.5 Résidus

Afin d'obtenir une idée des erreurs commises par le modèle et de quantifier l'incertitude liée à une prédiction, il est intéressant d'analyser les écarts entre les mesures et les prédictions effectuées par le

modèle. Les résidus ont été calculés pour toutes les données, c'est-à-dire pour les mesures horaires sur la période de temps de janvier 2014 à juillet 2019 aux stations mesurant le BC. Ils sont ensuite regroupés par heure afin d'affiner l'incertitude du modèle selon le moment de la journée.

La Figure 9 présente de manière simplifiée la distributions des résidus pour le NO<sub>2</sub> au cours des heures de la journée via des boxplots. L'écart interquartile a tendance à être plus grand durant les heures de pointe.

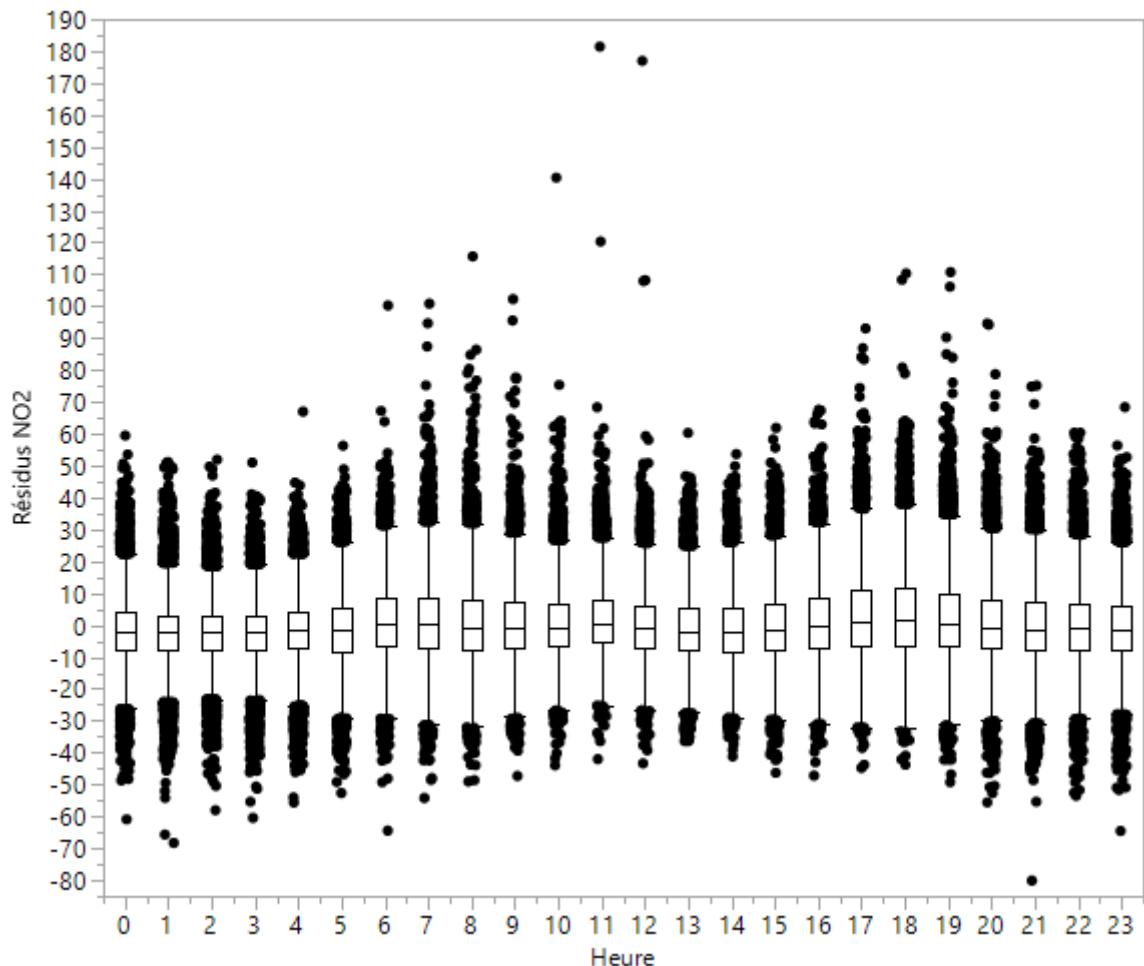


FIGURE 9 – Distribution des résidus NO<sub>2</sub> selon l'heure de la journée

Avec comme objectif de réaliser une carte des probabilités de dépassement d'un seuil (voir fin de l'annexe 7.5), à savoir 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>, les résidus de NO<sub>2</sub> ont été regroupés par plages horaires (heures creuses et heures de pointe). La distribution de ces résidus est caractérisée par une moyenne, comme attendu proche de 0, ainsi qu'un écart-type valant 13.32 pour les heures de pointe et 11.42 pour les heures creuses. Chaque valeur de NO<sub>2</sub> estimée est alors affectée de la valeur d'écart-type correspondant. En chaque lieu, on considère donc une distribution normale avec l'estimation de NO<sub>2</sub> comme moyenne et l'écart-type attribué. Il est ensuite possible de calculer la probabilité de dépasser 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>, sur base de la moyenne et de l'écart-type. Nous avons réalisé ces calculs à l'aide de la fonction pnorm de R.

## 4 Résultats et validation

### 4.1 Dynamique des concentrations en NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>

Afin de vérifier que la méthodologie choisie produit des résultats cohérents, les prédictions fournies par le modèle sont comparées aux données observées aux stations.

L'évolution des concentrations en NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> sur une semaine choisie arbitrairement (du 25 avril au 1 mai 2016) est représentée ci-dessous pour la station de Molenbeek. Cette station est intéressante car elle est influencée par un trafic relativement dense, ainsi que par des activités industrielles et résidentielles. Les sources de pollution sont donc multiples mais les niveaux de concentration atteints sont intermédiaires.

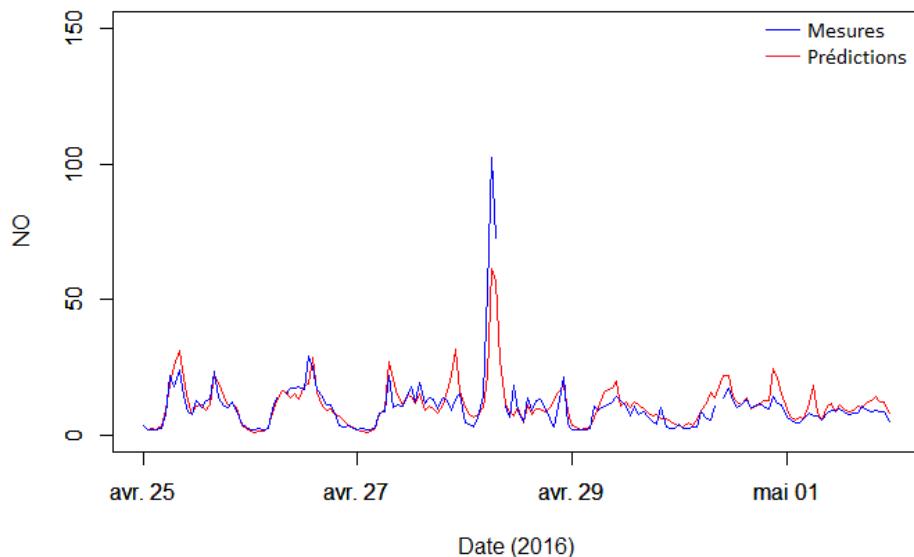


FIGURE 10 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictées durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek

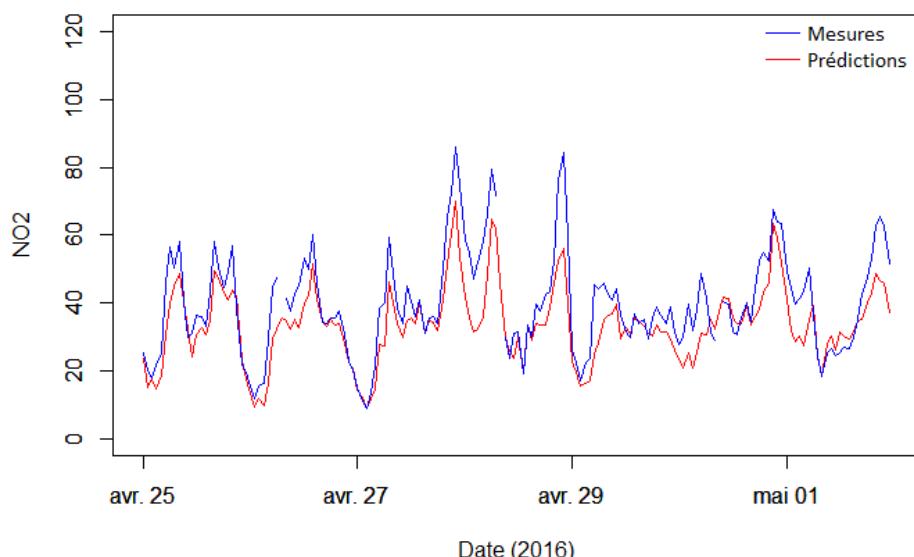


FIGURE 11 – Evolution des concentrations en NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictées durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek

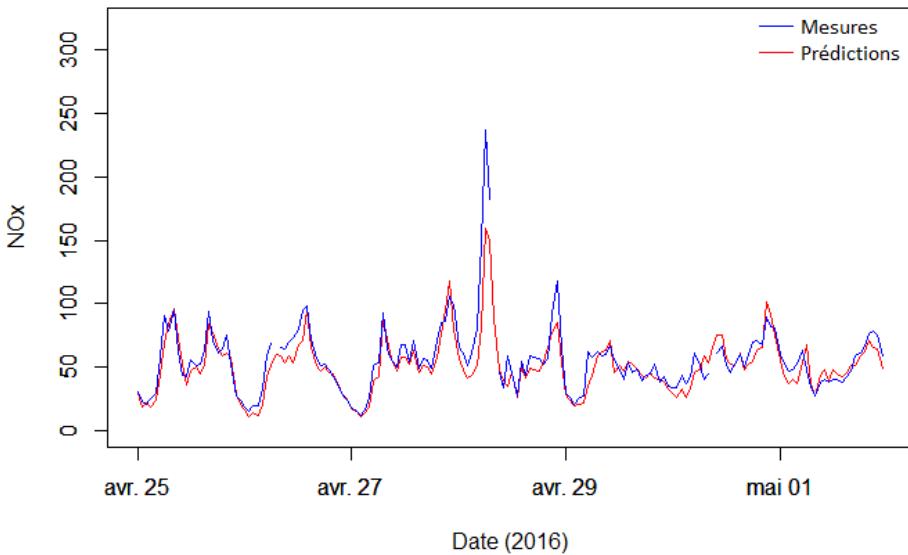


FIGURE 12 – Evolution des concentrations en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station de Molenbeek

Les dynamiques de concentration sont généralement bien suivies. Précisons que la station de Molenbeek semble particulièrement bien représentée par le modèle, les écarts observés pour les prédictions ponctuelles à d'autres stations pouvant être plus importants. De plus, les pics particulièrement prononcés sont souvent sous-estimés.

L'ensemble des mesures et prédictions de NO<sub>x</sub> ont ensuite été moyennés par heure afin de comparer l'évolution des concentrations sur une journée type. Les résultats pour différentes stations sont présentés en annexe 7.3.

A Molenbeek, l'évolution journalière moyenne des concentrations modélisée est cohérente. Les ordres de grandeur ainsi que la forme de la courbe suivent assez fidèlement les observations. De manière générale, les évolutions journalières moyennes modélisées suivent correctement les observations. Cependant, à la station d'Ixelles, on remarque que les prédictions sous-estiment la réalité. En plus d'être clairement visible pour la semaine du 25 avril au 1 mai 2016 (voir annexe 7.4), cela est même marqué en regardant les courbes journalières moyennes (annexe 7.3.2). La différence entre mesures et prédictions se marque dès le matin et persiste pour la majeure partie de la journée.

## 4.2 Cartes

Après avoir extrait les données de BC de la table d'attribut du shapefile fourni, elles sont sauveées sous format csv. Ce dernier est ensuite importé dans R afin de réaliser les opérations décrites dans la partie modélisation. Un nouveau fichier contenant, en plus des colonnes présentes dans la table d'attribut du shapefile fourni, les colonnes suivantes est ensuite exporté :

- NOx : concentration en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ;
- W : coefficient W ;
- rap\_NO\_NO2 : rapport  $\frac{\text{NO}}{\text{NO}_2}$  ;
- NO2 : concentration en NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ;
- NO : concentration en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ;
- probNO2 : probabilité de dépasser 40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de NO<sub>2</sub>.

Chaque colonne est présente deux fois, une fois suivie de " \_peak" pour les heures de pointe et une fois suivie de " \_bulk" pour les heures creuses. Après avoir correctement converti le fichier en format dbf, il est

utilisé comme table d'attribut du shapefile fourni initialement, à la place du fichier dbf de base. A l'aide d'un logiciel de système d'information géographique, il est alors possible d'obtenir une carte représentant une des variables listées ci-dessus.

Nous avons utilisé ArcMap pour réaliser des cartes affichant la concentration en NO durant les heures de pointe, la concentration en NO<sub>2</sub> durant les heures de pointe et la probabilité de dépasser 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> durant les heures creuses. La carte des concentrations moyenne en NO<sub>2</sub> durant les heures de pointe est présentée à la Figure 13. L'ensemble des cartes réalisées sont présentées en annexe 7.5.

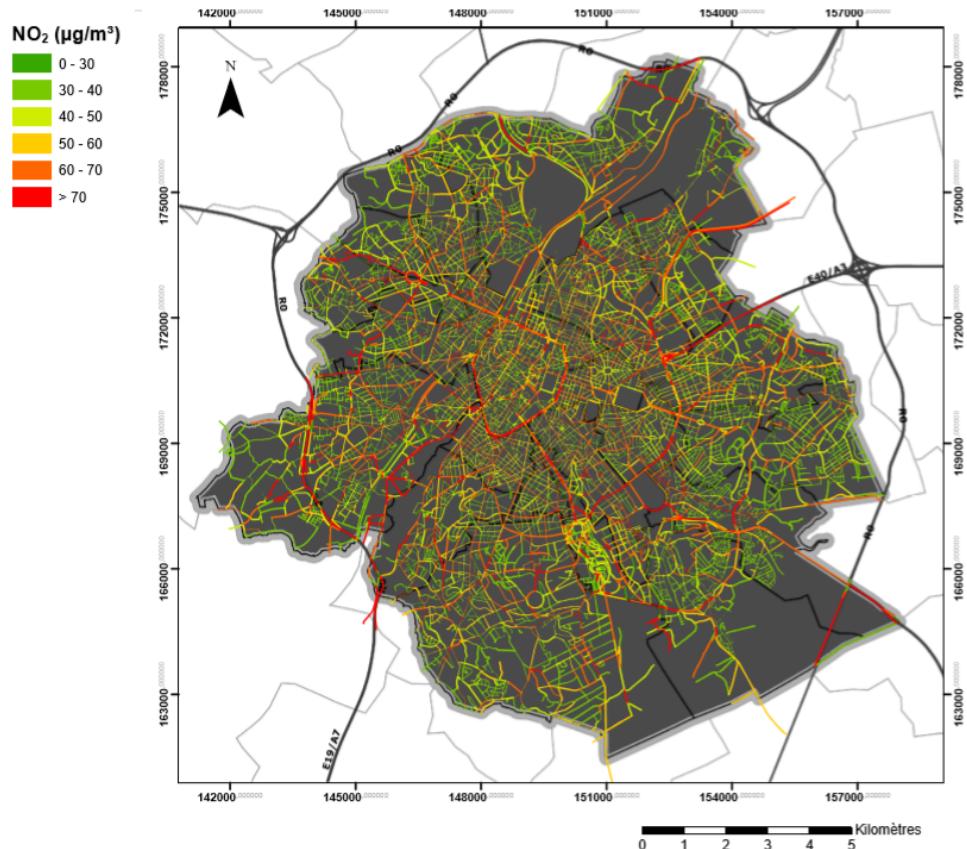


FIGURE 13 – Concentration moyenne en NO<sub>2</sub> à Bruxelles durant les heures de pointe (7h-10h et 16h-19h)

## 5 Discussion des limites du modèle

### 5.1 Données sources

Les données utilisées pour créer le modèle proviennent de mesures effectuées en temps réel pouvant être entachées d'erreurs de mesure (IBGE-LRE, 2012). Les données de BC ayant servi à la modélisation spatiale du NO<sub>2</sub> proviennent du modèle CANS<sub>BC</sub> utilisé par l'IBGE dans le cadre du projet ExpAIR (Expair, 2015). Bien que le modèle ait été calibré grâce à une campagne de mesures (*ibid*) et que la validation pour certaines rues attestent que les prédictions semblent correctes (Brasseur et al., 2016), il convient de considérer que ces données sont entachées d'erreurs autres que des erreurs de mesures. A celles-ci s'ajoutent ensuite les erreurs de notre modèle pour la détermination des concentrations en NO<sub>x</sub>.

### 5.2 Saisonnalité

Les données de BC spatialisées sur le shapefile correspondent à des moyennes annuelles. Les droites de calibration et les coefficients W ont également été établis de la sorte. Les cartes ne sont basées que sur un

profil type de pollution au  $\text{NO}_x$  moyen sur une année. Cependant, il existe une variabilité saisonnière (voir mensuelle) des concentrations en polluants et du rapport  $\text{NO}/\text{NO}_2$ . Il est probable que les prédictions moyennes n'illustrent pas directement les risques subis par les citoyens, la durée d'exposition à certaines concentrations n'étant pas considérée. Il semble que certaines périodes de l'année soient plus critiques en terme d'exposition au  $\text{NO}_2$ . De manière générale, les variations saisonnières de concentration, pouvant notamment s'expliquer par une production plus importante d' $\text{O}_3$  durant l'été, seraient intéressantes à étudier.

### 5.3 Estimation des concentrations en $\text{NO}_x$

Pour la majeure partie de la journée, la concentration totale en  $\text{NO}_x$  est déterminée à l'aide d'une relation générale établie sur l'ensemble des données (Equation 4), mais la Figure 3 a montré que le pic matinal de BC est comparativement moins marqué que celui des  $\text{NO}_x$ . Cela joue pourrait expliquer que la relation générale ne permet pas de correctement modéliser le pic matinal de  $\text{NO}_x$ . L'utilisation d'une régression spécifique durant les heures de pointes matinales (Equation 5) permet de pallier à ce problème.

Il a tout de même été remarqué que les pics de concentrations en  $\text{NO}_x$  particulièrement élevés ont tendance à être moins bien reproduits par le modèle. S'agissant d'épisodes très ponctuels et occasionnels, ils n'impactent pas trop les valeurs moyennes. De plus, ils sont malgré tout reproduits par le modèle mais l'amplitude prédictive est souvent moindre que celle observée. Dans ces cas, on saura que la concentration est particulièrement élevée mais l'estimation peut-être moins précise. Cette constatation n'est pas forcément surprenante car la relation directe entre les valeurs de BC et de  $\text{NO}_x$  affiche une variabilité importante pour les concentrations les plus élevées. Les pics particulièrement marqués de  $\text{NO}_x$  peuvent ne pas toujours s'accompagner d'une augmentation aussi conséquente de BC. Ils ne sont dès lors pas estimés correctement puisque la prédiction est effectuée uniquement sur base de la mesure de BC.

Concernant les estimations fournies pour la station d'Ixelles (Annexe 7.4), il a été mentionné qu'elles avaient tendance à être bien inférieures aux mesures. On pourrait d'abord simplement penser que le modèle est moins bon pour de grandes concentrations en  $\text{NO}_x$ , la station d'Ixelles présentant un niveau de pollution assez élevé. Mais une telle sous-estimation n'est pas entrevue à la station d'Haren qui présente pourtant des concentrations en  $\text{NO}_x$  similaires, voire supérieures à celles d'Ixelles. Une hypothèse explicative pourrait venir du fait que la station d'Ixelles est située dans une rue dite canyon, bordée des deux côtés par de hauts bâtiments. La dispersion des polluants est limitée et on peut imaginer que le BC et les  $\text{NO}_x$  réagissent différemment à cette contrainte. La direction du vent peut induire l'accumulation préférentielle des polluants d'un côté de la rue plutôt que de l'autre (Expair, 2015). Le BC consistant en des particules fines et les  $\text{NO}_x$  étant des gaz, il est envisageable que la concentration en  $\text{NO}_x$  s'homogénéise plus facilement au sein de la rue que celle du BC. L'emplacement de la station de mesure dans un endroit où l'accumulation n'est pas favorisée pourrait entraîner des mesures de BC plus faible que celles que nous devrions obtenir en considérant toute la largeur de la rue. Tout cela reste bien sûr très hypothétique. Etant donné que nous avons pu disposer des largeurs de rues et hauteurs de bâtiments les bordant, nous aurions voulu intégrer dans le modèle une information sur la géométrie de la rue afin de voir si elle pouvait d'une quelqu'une manière apporter de l'information utile. Le rapport hauteur sur largeur a été utilisé dans le modèle CANS<sub>BC</sub> portant sur le BC dans les rues canyons (Brasseur et al., 2015). Malheureusement, les stations de mesures étant pour la plupart situées en dehors des rues, il était difficile de décrire la géométrie de leur environnement et donc d'étudier l'effet de ce paramètre.

Les erreurs de prédiction semblent plus grandes à certaines stations qu'à d'autres. L'incertitude que nous avons associée à nos prédictions est cependant basée sur l'heure de la journée plutôt que sur la typologie du lieu, car le modèle ne caractérise pas l'endroit de la prédiction, seule la concentration en BC étant utilisée. L'incertitude aurait aussi pu se baser sur cette dernière, mais elle est fortement liée à l'heure de la journée puisque les concentrations sont conditionnées par le trafic dont l'intensité fluctue selon l'heure de la journée.

## 5.4 Rapport $\frac{NO}{NO_2}$

La droite de régression entre le BC et les coefficients W a finalement été établie grâce à 11 points dont 6 correspondent à des valeurs de BC estimées sur bases des mesures en  $NO_x$  et de la relation 4. Il semble compliqué d'augmenter le nombre de stations de mesure à Bruxelles mais des informations concernant le BC à un plus grand nombre d'endroits permettraient d'obtenir une régression illustrant mieux la réalité de la relation entre le BC et les coefficients W.

Cependant, il est nécessaire de rappeler que cette approche a été choisie car nous n'avions pas d'informations quantitatives caractérisant les stations avec lesquelles nous aurions pu établir une régression expliquant les coefficients W. En effet, nous aurions également souhaité évaluer l'effet de la géométrie des rues. S'il était possible d'évaluer son impact, peut-être serait-il possible d'attribuer un coefficient W à chacune des rues sans ne devoir se baser que sur les moyennes de BC.

Il est à noter que, dans notre modélisation, le coefficient W est évalué à chaque heure. Initialement, un coefficient W est déterminé par station sur base des valeurs moyennes du rapport  $\frac{NO}{NO_2}$  de la station divisées par les valeurs moyennes du rapport  $\frac{NO}{NO_2}$  de toutes les stations. Ce coefficient W permet de changer l'amplitude de la courbe caractéristique de ce rapport  $\frac{NO}{NO_2}$  et est valable pour une station. Nous reisons ensuite un W à la concentration **moyenne** en BC de sa station dans le but de déterminer un coefficient W pour chaque lieu (hors station) (Figure 7). Or, dans la modélisation, un nouveau coefficient W est calculé selon la valeur de BC à chaque heure (au lieu de la concentration moyenne). La concentration en BC étant généralement plus élevée durant les heures de pointe que durant les heures creuses, le W sera plus élevé pour ces tranches horaires et changera le rapport  $\frac{NO}{NO_2}$ . Pour un même lieu, on aura donc un W différent selon le moment de la journée. En effet, durant les heures de pointe, une station d'un niveau de pollution intermédiaire a une concentration en BC et un rapport NO/NO<sub>2</sub> se rapprochant d'avantage des valeurs moyennes d'une station plus fortement polluée que de ses propres valeurs moyennes. Un coefficient W variant selon la concentration instantanée de BC permet de mieux modéliser les variations temporelles de  $NO_x$ .

## 5.5 Cartes

Dans le contexte d'émissions de  $NO_x$  trop élevées, nous présentons dans ce rapport la cartographie des concentrations séparées en NO et NO<sub>2</sub> durant les heures de pointe, période pendant laquelle les concentrations sont censées être les plus hautes. La carte de probabilité de dépassement du seuil annuel moyen de 40 µg/m<sup>3</sup> est réalisée sur base des données en heure creuse. En effet, durant la période des heures creuses (11h à 15h), on s'attend à avoir des concentrations plus basses que lors des heures de pointe mais plus élevées que pendant la nuit, ce qui semble plus approprié pour modéliser une concentration annuelle moyenne que les concentrations durant les heures de pointe. Malgré cela, cette carte ne prétend pas encore identifier précisément les zones en infraction par rapport à la norme de NO<sub>2</sub>. Elle a surtout pour but de présenter une méthodologie permettant de s'en rapprocher. Il serait plus pertinent de réaliser une carte similaire en considérant les données de BC de toute la journée. On peut néanmoins utiliser les cartes produites pour se faire une première idée des zones à risques. Sans surprise, les grands axes et la petite ceinture apparaissent comme les zones les plus critiques.

# 6 Conclusion

Le modèle mis au point permet d'estimer séparément les concentrations en NO et en NO<sub>2</sub> par la détermination d'une part de la quantité totale de  $NO_x$ , et d'autre part du rapport de concentration entre les deux composés.

La quantité totale de  $NO_x$  est clairement corrélée au BC et est déterminée à l'aide de la spatialisation du BC effectuée dans le cadre du projet ExpAIR. Le rapport  $\frac{NO}{NO_2}$  a également pu être relié au BC par l'intermédiaire d'un facteur correctif appliqué à une courbe d'évolution moyenne. Il est important de garder à l'esprit que les concentrations en BC utilisées sont préalablement entachées d'erreurs, puisqu'elles sont elles-mêmes issues d'un processus de modélisation. A cela, doivent s'ajouter les erreurs du modèle

proposé ici. Les concentrations en NO et en NO<sub>2</sub> ont pu être cartographiées séparément. Nous espérons que la méthodologie proposée pourra servir à l'IBGE dans le cadre des actions requises pour l'Union Européenne.

## Bibliographie

- B. Aumont. Production d'ozone troposphérique et régimes chimiques. *Cours Master Recherche "SGE" spécialité "Atmosphère et qualité de l'air"*, Université Paris VII, 2005.
- O. Brasseur, P. Declerck, B. Heene, and P. Vanderstraeten. Modelling black carbon concentrations in two busy street canyons in brussels using cansbc. *Atmospheric Environment*, 101 :72–81, 2015.
- O. Brasseur, P. Declerck, T. De Vos, and B. Heene. Modélisation de la pollution par le trafic à bruxelles. 2016. URL [https://www.issep.be/wp-content/uploads/S2\\_0Brasseur-2.pdf](https://www.issep.be/wp-content/uploads/S2_0Brasseur-2.pdf).
- J. De Villers, M. Squilbin, and P. Vanderstraeten. Bruxelles environnement-ibge, collection fiches documentées, thématique air : Fiche nox, 2016.
- I. P. Expair. projet expair, 2015. URL [https://environnement.brussels/sites/default/files/user\\_files/expair-info-fr.pdf](https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/expair-info-fr.pdf).
- IBGE. Les effets de black carbon sur la santé humaine, 2014. URL <https://environnement.brussels/etat-de-l'environnement/synthese-2011-2012/environnement-et-sante/les-effets-de-black-carbon-sur-la>.
- IBGE. Effets attendus de la zone de basses émissions sur le parc automobile et la qualité de l'air en région bruxelloise, 2019. URL <https://www.lez.brussels/medias/lez-note-fr-vdef.pdf?context=bWFzdGVyfGRvY3VtZW50c3w4NjgwMzQ5fGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxkb2N1bWVudHMvaDI5L2hjYi840DAxNjI2NzUxMDA2LnBkZnwwNTbjZTE5YTI4NWUyNjIzYzZmNTgxZDE4YWU5NjQ0Mjg4MmQ0MDY2ZWUwYjA2Zjk1YmZjMDQ0ZTAyODFlZTFj>.
- IBGE-LRE. La qualité de l'air en Région de bruxelles-capitale mesures à l'immission, 2012.
- R. Journard. Quels polluants ? contribution des transports. *Pollution atmosphérique*, 31(121) :5–8, 1989.
- G. Mégie. L'ozone atmosphérique et son évolution. In *Annales des Mines. Responsabilité et environnement*, pages 31–42, 2001.
- I. Roussel. La circulation automobile en ville : émission et qualité de l'air, difficultés méthodologiques. *Hommes et Terres du Nord*, 1(1) :107–120, 1993.

## 7 Annexes

### 7.1 Estimation des concentrations en NO et NO<sub>2</sub> indépendamment de l'effet de l'ozone.

L'observation de la dynamique journalière laisse penser que l'ozone réagit avec le NO le matin pour former du NO<sub>2</sub>. Cet effet est moins marqué l'après-midi mais nous ne pouvons affirmer qu'il n'a pas lieu. Nous avons voulu nous émanciper de ce phénomène pour mieux appréhender la dynamique des polluants.

La synthèse d'ozone est principalement déterminée par la température de l'air et le rayonnement solaire reçu (Mégie, 2001). Ceci implique une variation saisonnière importante. Les conditions météorologiques étant homogènes sur le territoire Bruxellois, nous avons supposé que la synthèse de l'ozone était la même en tout lieu de Bruxelles. Nous avons donc considéré que sa production non impactée par les voitures pouvait être approximée par la moyenne des mesures en ozone à Uccle (station de référence non impactée par le trafic) les dimanches d'un mois particulier.

Nous avons considéré que l'ozone réagissait principalement avec le NO et que toute autre réaction pouvait être négligée. Nous avons donc estimé l'ozone consommé par le trafic en une certaine station comme étant la différence entre les valeurs d'ozone mesurées et les valeurs de référence du mois en question.

Une fois l'ozone consommé déterminé, il devient possible d'estimer les quantités de monoxyde d'azote consommé par cette réaction ainsi que les quantités de dioxyde d'azote produit. La réaction étant de 1 mol pour 1 mol, il suffit d'appliquer un coefficient correctif correspondant à la masse molaire et de soustraire aux mesures de NO<sub>2</sub> le NO<sub>2</sub> produit et d'ajouter aux mesures de NO le NO consommé par la réaction. Nous obtenons ainsi des mesures dites ajustées correspondant aux concentrations devant se trouver dans l'atmosphère en l'absence de réaction avec l'ozone.

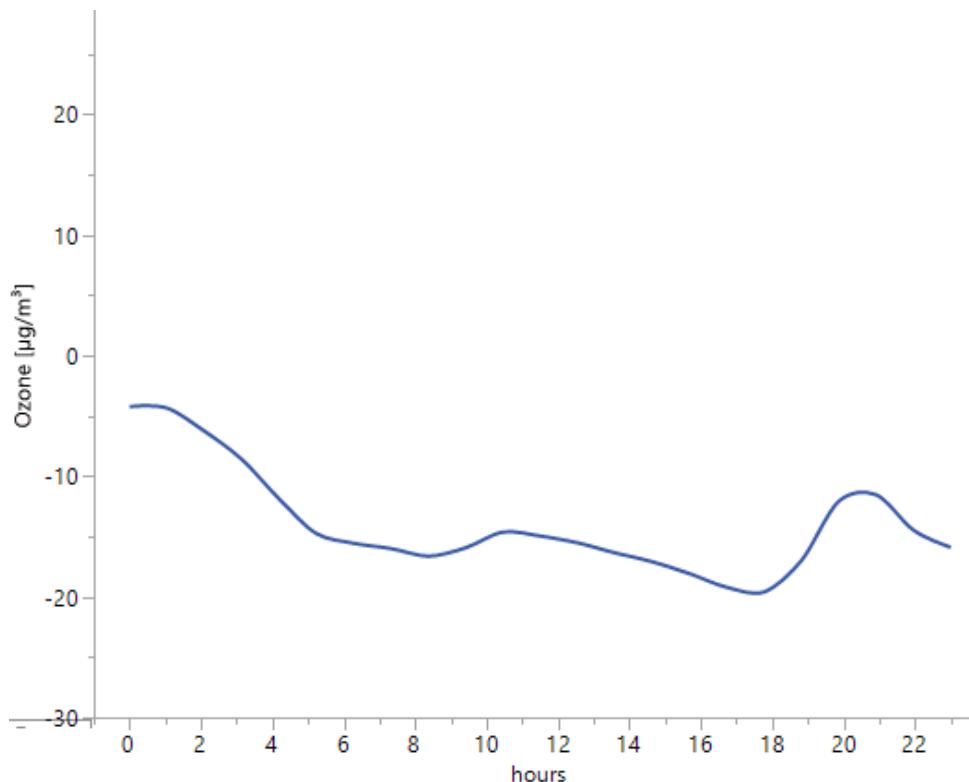


FIGURE 14 – Consommation d'ozone à Molenbeek moyenne pour le mois de septembre

La figure ci-dessus illustre l'ozone consommé à Molenbeek durant le mois de septembre et correspond

aux mesures à Molenbeek moyennées sur les mois de septembre auxquelles ont été soustraits les moyennes à Uccle pour la période correspondante. Nous observons que la différence est toujours négative, ce qui implique que l'ozone est toujours en concentration inférieure à la station de référence. Il est donc consommé continuellement au cours de la journée grâce au trafic. Cette différence s'accentue avec la journée et semble maximale aux heures de pointe ce qui semble cohérent avec nos connaissances *a priori* sur le phénomène.

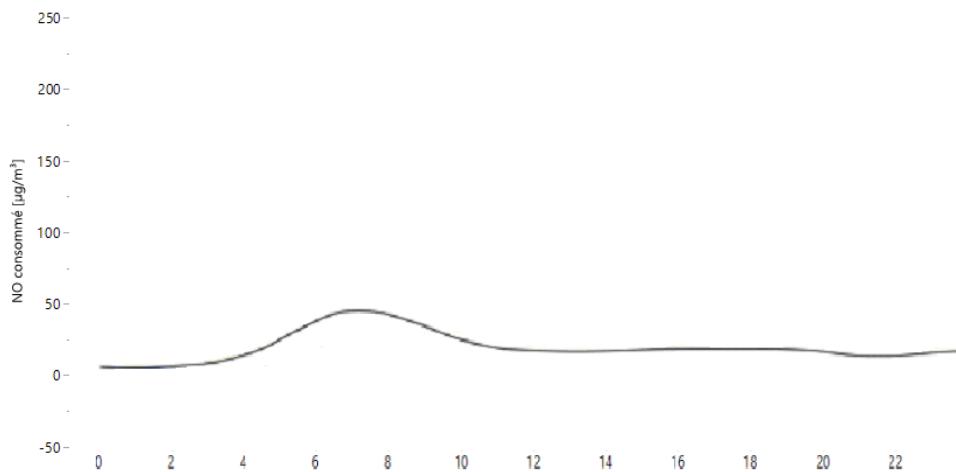


FIGURE 15 – Courbe moyenne de NO à Molenbeek sans la consommation d'ozone pour le mois de septembre

Cette figure illustre les mesures de NO à Molenbeek auxquelles ont été rajoutées le NO qui a été consommé par la réaction. Les résultats sont un peu surprenants. Le pic attendu de l'après-midi n'existe pas, au contraire nous observons une légère diminution en monoxyde d'azote après l'ajustement. Nous suspectons alors que l'absence de pic l'après-midi n'est pas due à la consommation de NO par l'ozone mais que ceci pourrait être du à sa consommation par les hydrocarbures.

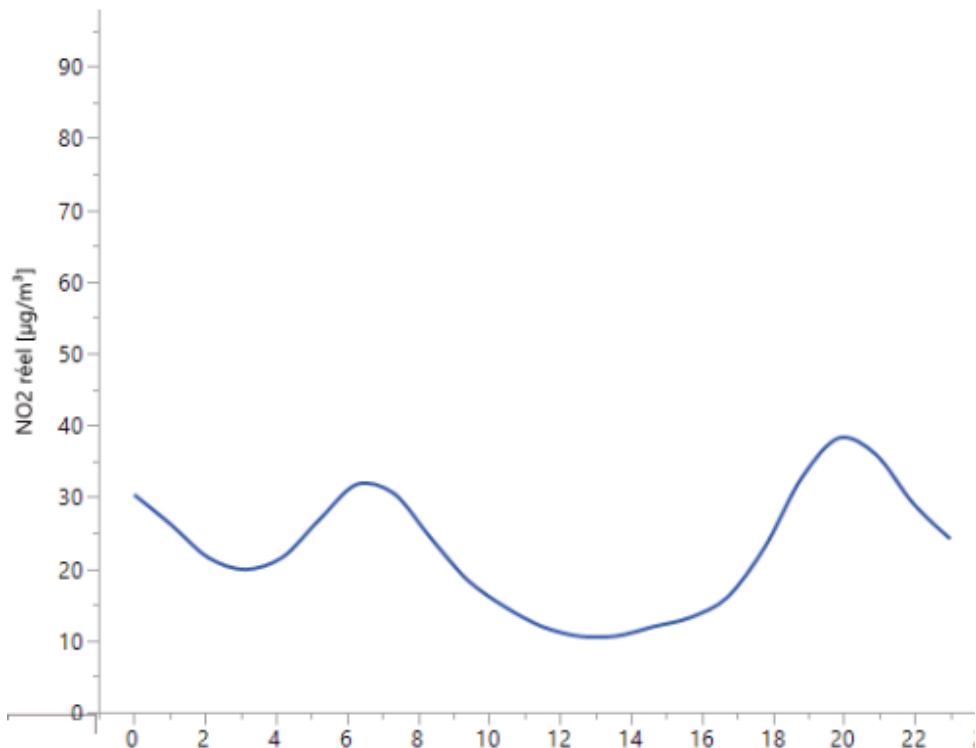


FIGURE 16 – Courbe moyenne de NO<sub>2</sub> à Molenbeek sans l'apport par réaction du NO avec l'ozone pour le mois de septembre

Pour le NO<sub>2</sub>, la courbe ajustée a une forme très similaire à la courbe originale qui semblait déjà cohérente avec nos connaissances *a priori* sur les phénomènes impactant sa dynamique. Le pic de NO<sub>2</sub> de l'après-midi étant légèrement supérieur à celui du matin, nous aurions pu penser que cela est causé par la consommation de NO par l'ozone pour former du NO<sub>2</sub> mais l'observation précédente est contradictoire avec cette conclusion. Il semble donc assez compliqué d'appréhender cette chimie atmosphérique avec cette approche simpliste.

Dans le but d'explorer les possibilités de modélisation, un modèle système a été réalisé avec le logiciel Scilab. Le fonctionnement de ce modèle est repris dans l'annexe 7.2 sous la forme d'un diagramme de Forrester.

En guise d'exemple, les concentrations en NO et NO<sub>2</sub> d'une semaine aléatoire sont visibles dans les figures suivantes. Seule l'allure des graphes est intéressante, ceux-ci ne respectent pas les ordres de grandeur.

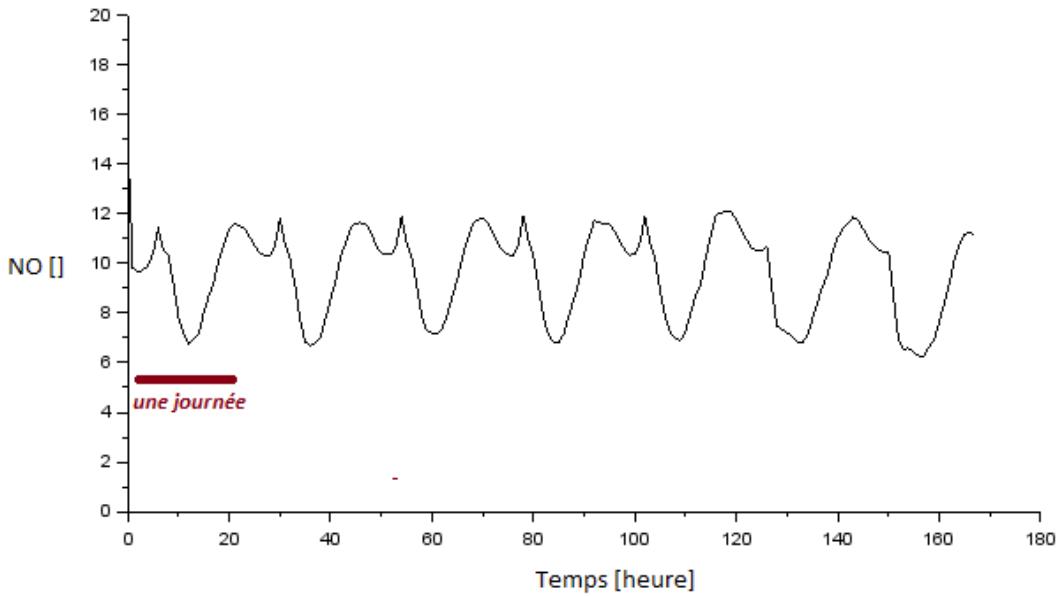


FIGURE 17 – Evolution des concentrations en NO pour une semaine aléatoire sur base d'un modèle système

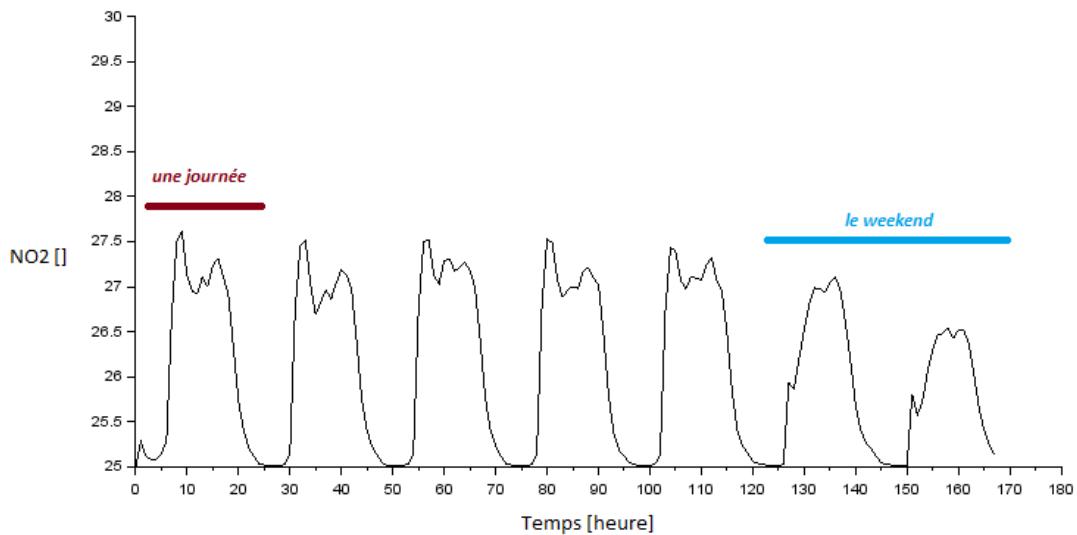


FIGURE 18 – Evolution des concentrations en NO<sub>2</sub> pour une semaine aléatoire sur base d'un modèle système

On peut remarquer qu'il est possible de reproduire les deux pics de concentrations en NO et de NO<sub>2</sub> par une approche système et que certaines dynamiques sont représentées comme la production moins intense de NO<sub>2</sub> lors des weekends. Bien que le modèle Scilab possède un certain potentiel, nous avons décidé de pas approfondir cette voie. En effet, cela demande un calibrage difficile de plusieurs paramètres, les données du comptage de voitures sont difficiles à exploiter et le modèle exige des données d'intensité lumineuse comme entrée pour la production d'O<sub>3</sub> (Equation 2).

## 7.2 Diagramme de Forrester utilisé en Scilab

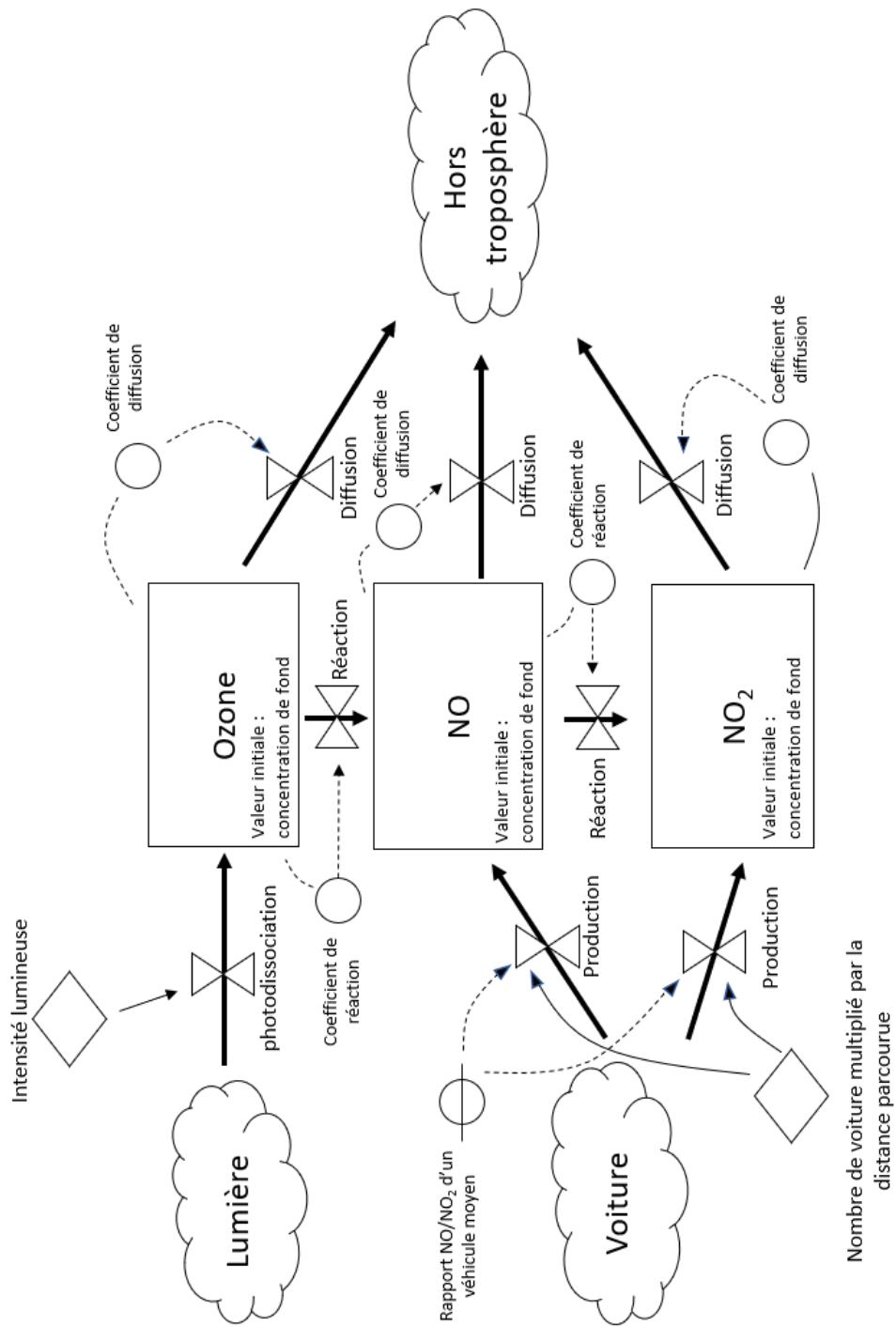


FIGURE 19 – Diagramme de Forrester utilisé comme base sur Scilab : Dynamique de la concentration en O<sub>3</sub>, NO et NO<sub>2</sub>

### 7.3 Evolution journalière moyenne des concentrations en NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> à différentes stations

#### 7.3.1 Molenbeek

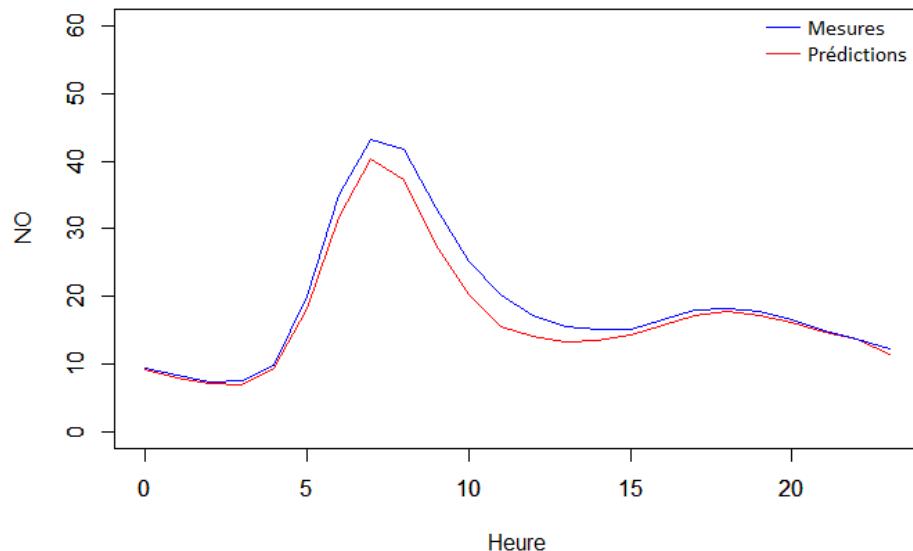


FIGURE 20 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Molenbeek

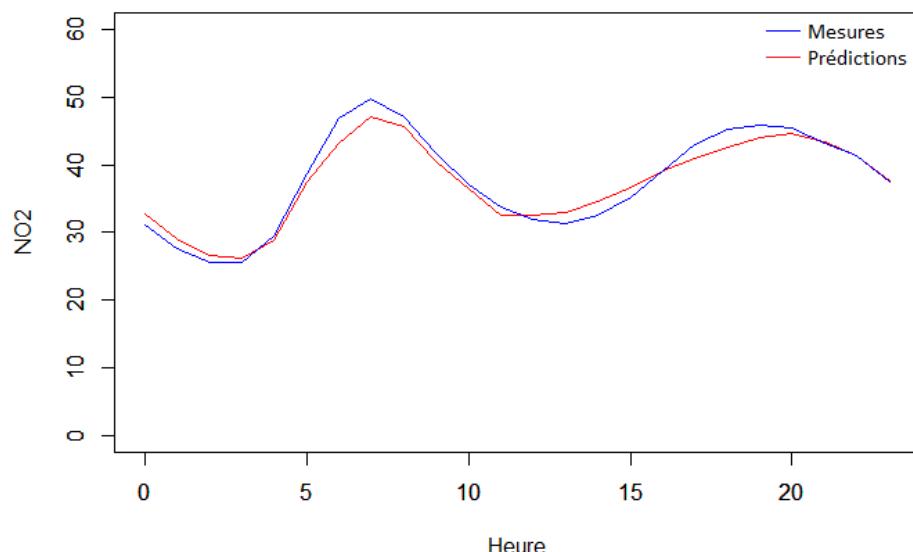


FIGURE 21 – Evolution des concentrations en NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Molenbeek

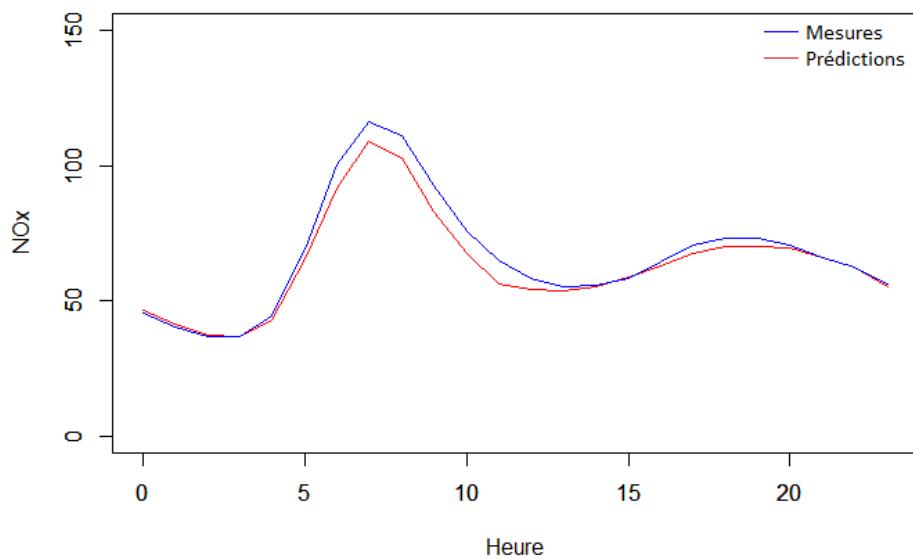


FIGURE 22 – Evolution des concentrations en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant une journée moyenne à la station de Molenbeek

### 7.3.2 Ixelles

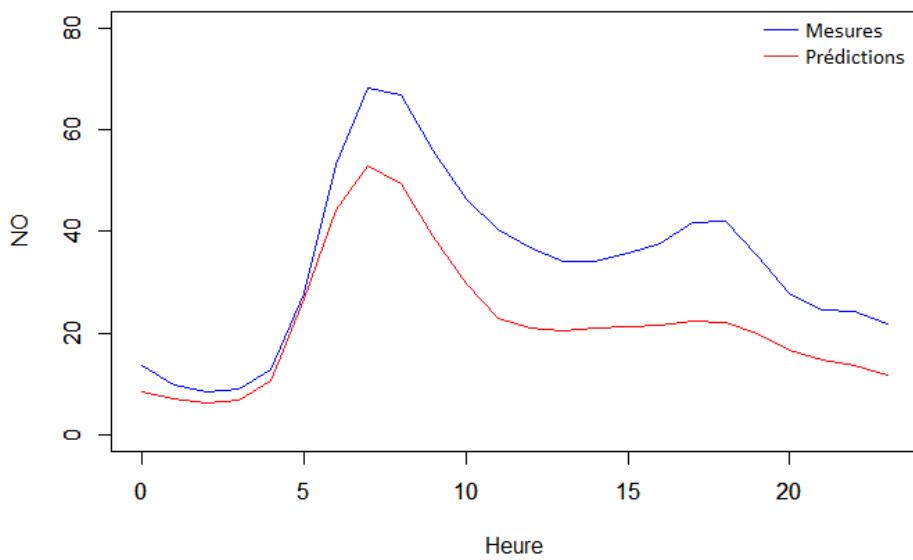


FIGURE 23 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant une journée moyenne à la station d'Ixelles

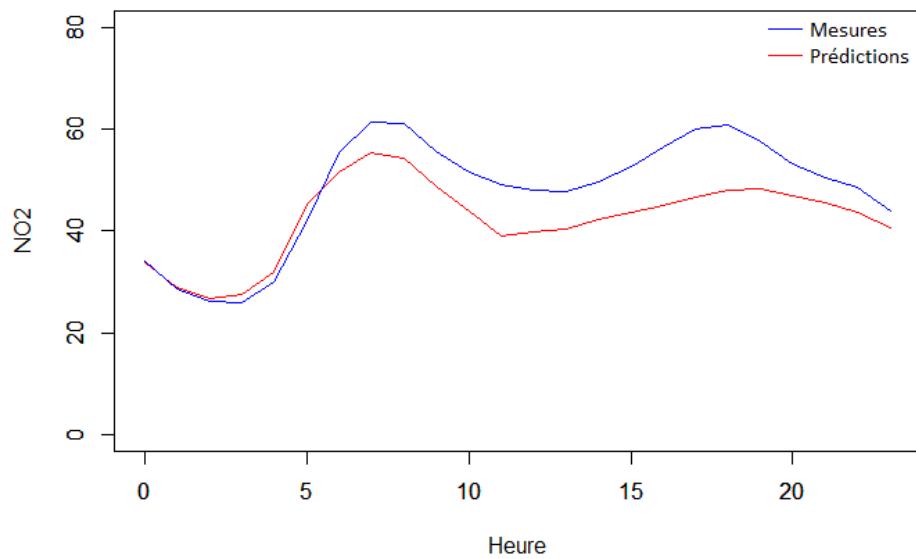


FIGURE 24 – Evolution des concentrations NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant une journée moyenne à la station d'Ixelles

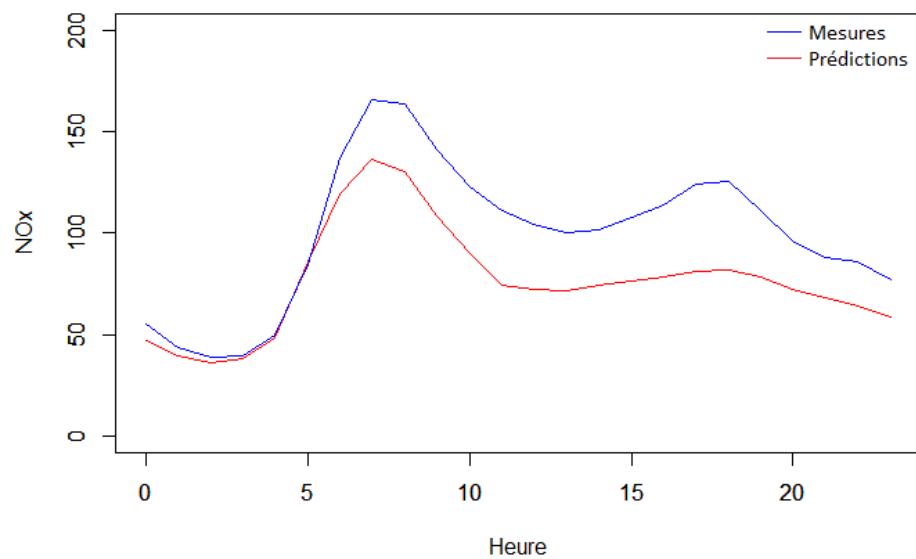


FIGURE 25 – Evolution des concentrations en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédictes durant une journée moyenne à la station d'Ixelles

### 7.3.3 Haren

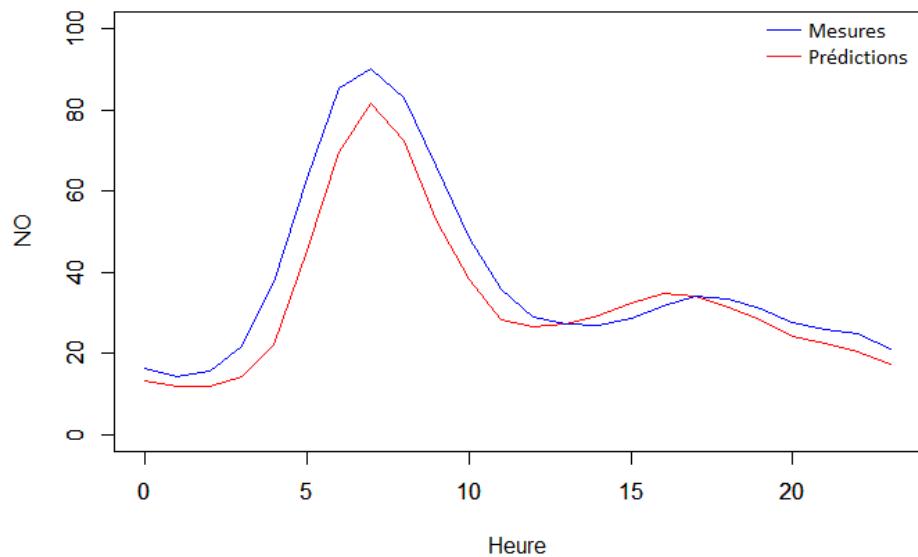


FIGURE 26 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren

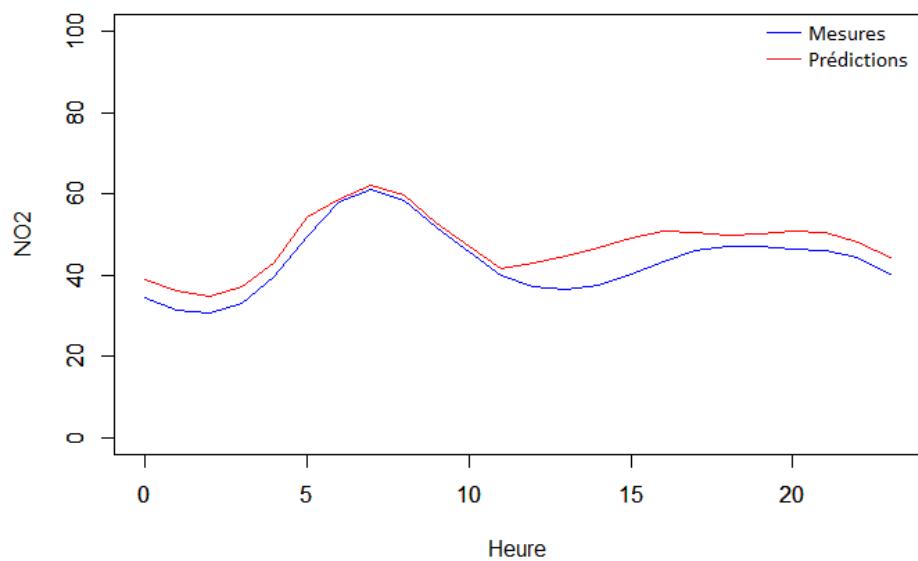


FIGURE 27 – Evolution des concentrations NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren

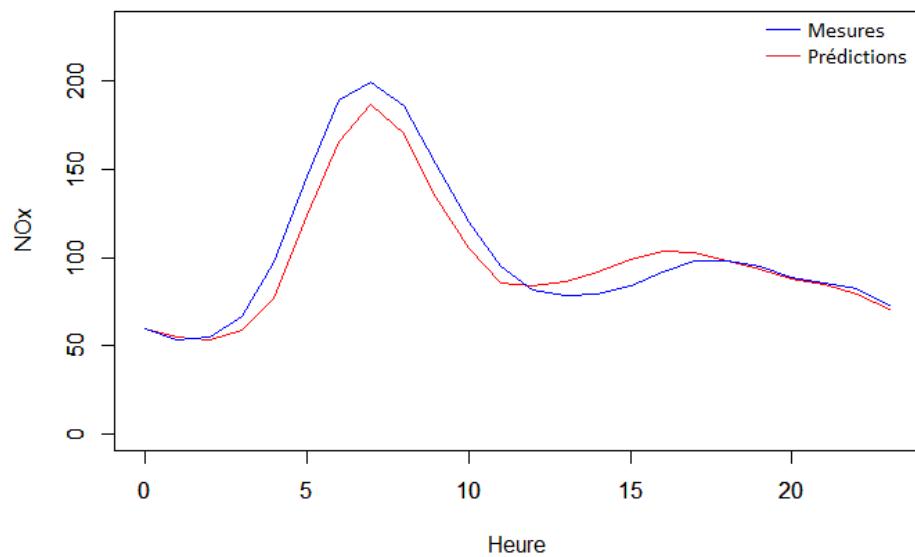


FIGURE 28 – Evolution des concentrations en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Haren

#### 7.3.4 Uccle

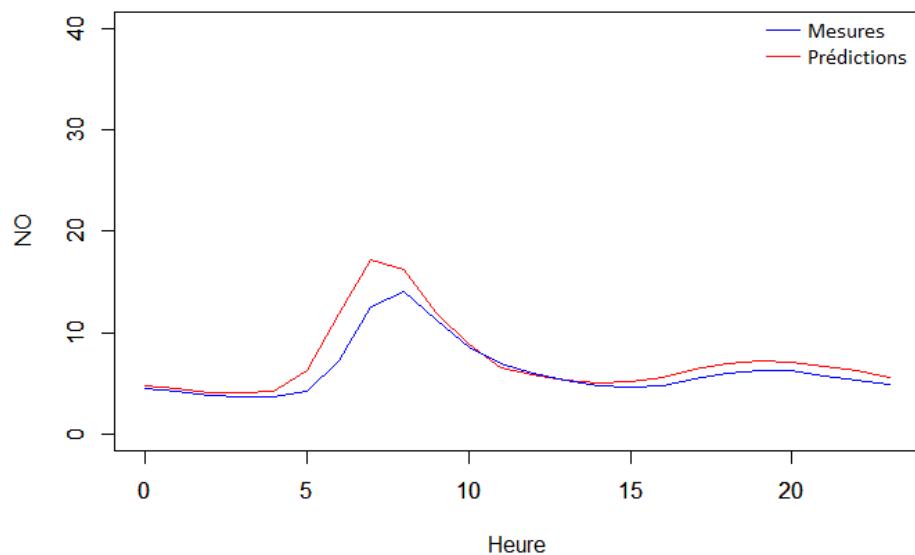


FIGURE 29 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Uccle

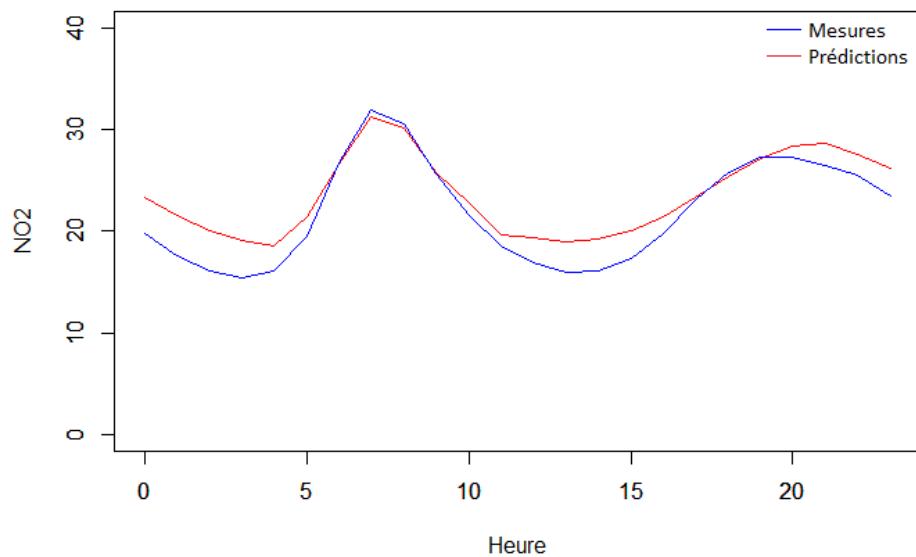


FIGURE 30 – Evolution des concentrations en  $\text{NO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Uccle

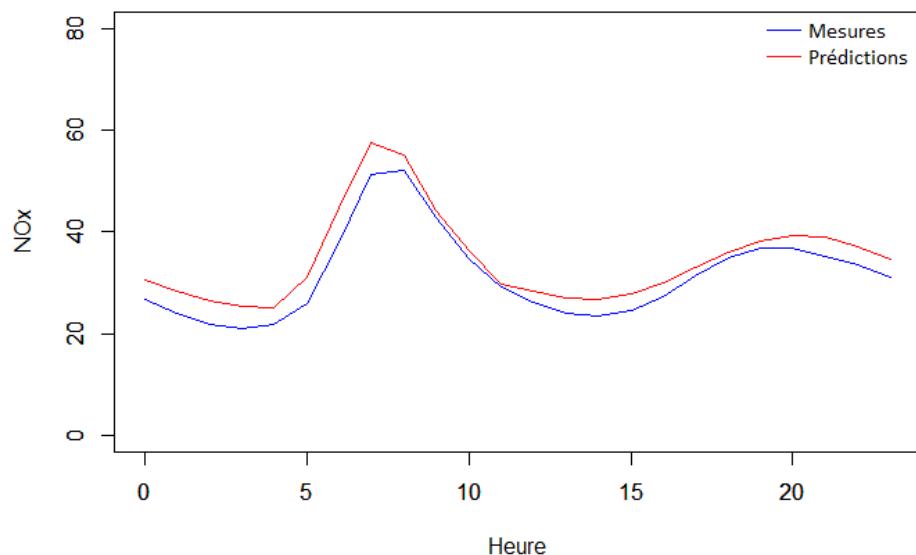


FIGURE 31 – Evolution des concentrations en  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant une journée moyenne à la station de Uccle

#### 7.4 Evolution des concentrations en NO, NO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> à Ixelles durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016

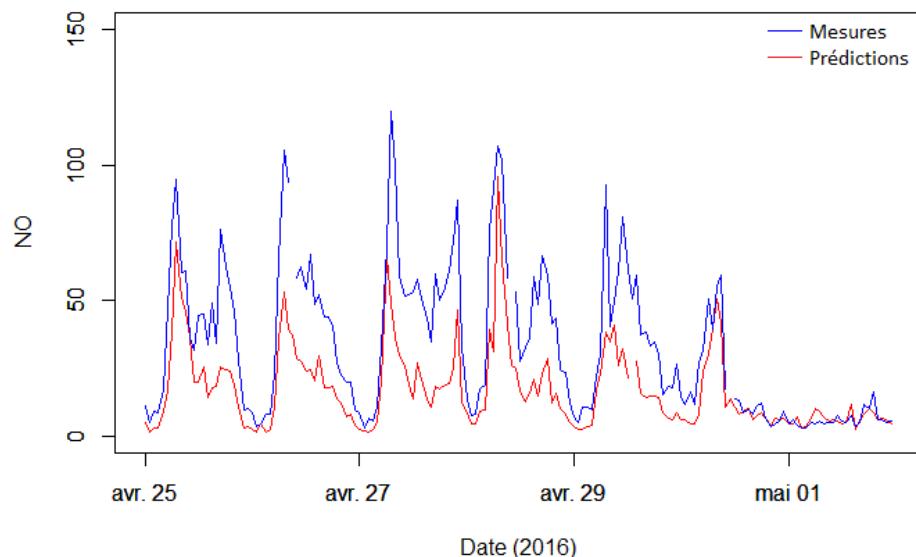


FIGURE 32 – Evolution des concentrations en NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles

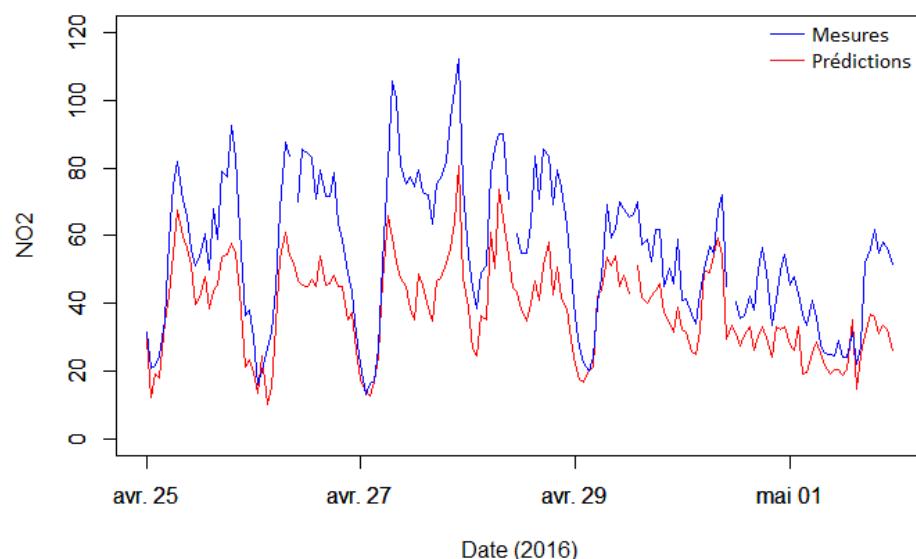


FIGURE 33 – Evolution des concentrations en NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles

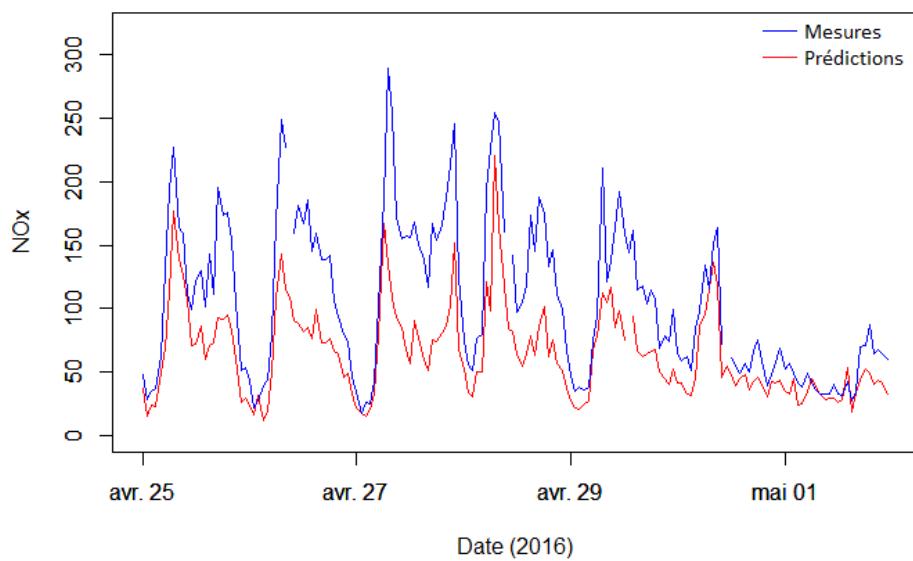
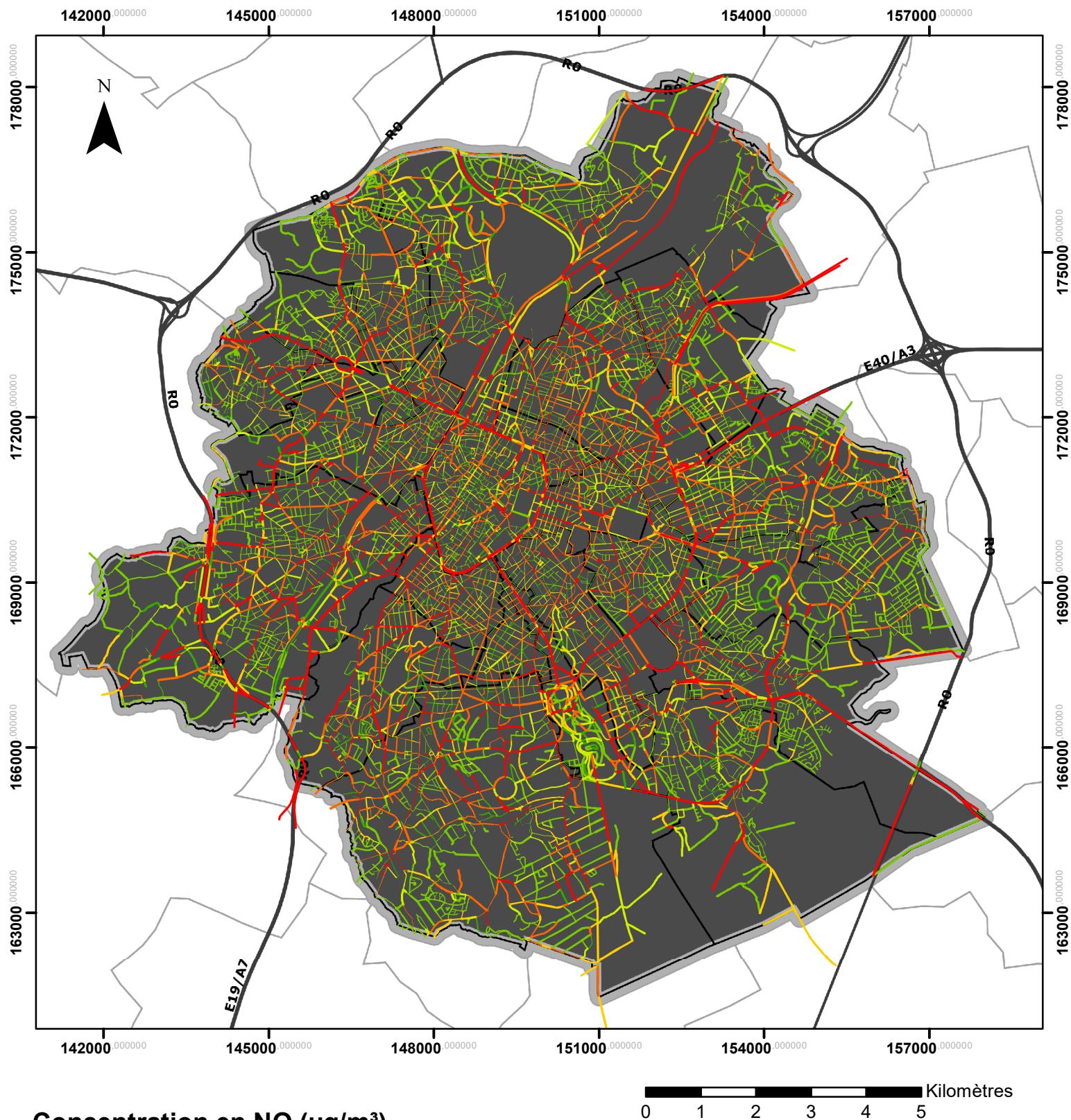


FIGURE 34 – Evolution des concentrations en NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mesurées et prédites durant la semaine du 25 avril 2016 au 1 mai 2016 à la station d'Ixelles

## **7.5 Cartes**

Aux pages suivantes sont présentées les cartes réalisées.

# Concentration moyenne en NO à Bruxelles durant les heures de pointe (7h-10h et 16h-19h)



Système de coordonnées: Lambert Belge 1972

Projection: Lambert Conique Conforme

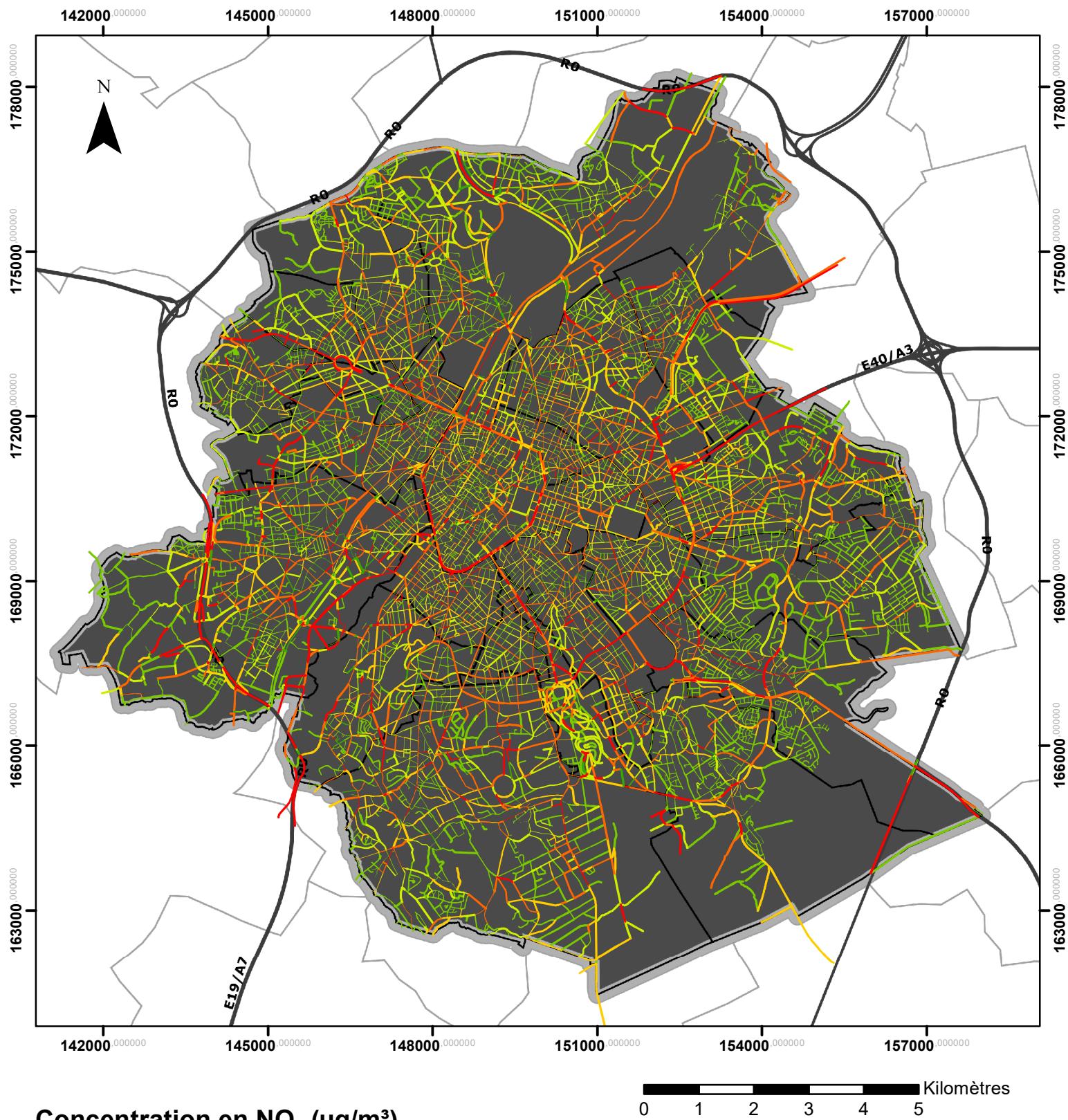
Datum: Belge 1972

Unités: Mètres

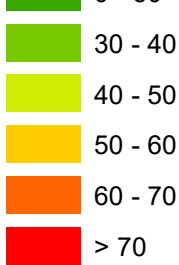
Auteurs: Guillaume De Meue, Dilhan Ozturk, Henri Moens de Hase  
Date: 18-12-19

Données sources: Concentrations en black carbon (2014-2016)  
Projet ExpAIR - IBGE

# Concentration moyenne en NO<sub>2</sub> à Bruxelles durant les heures de pointe (7h-10h et 16h-19h)



Concentration en NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



Système de coordonnées: Lambert Belge 1972

Projection: Lambert Conique Conforme

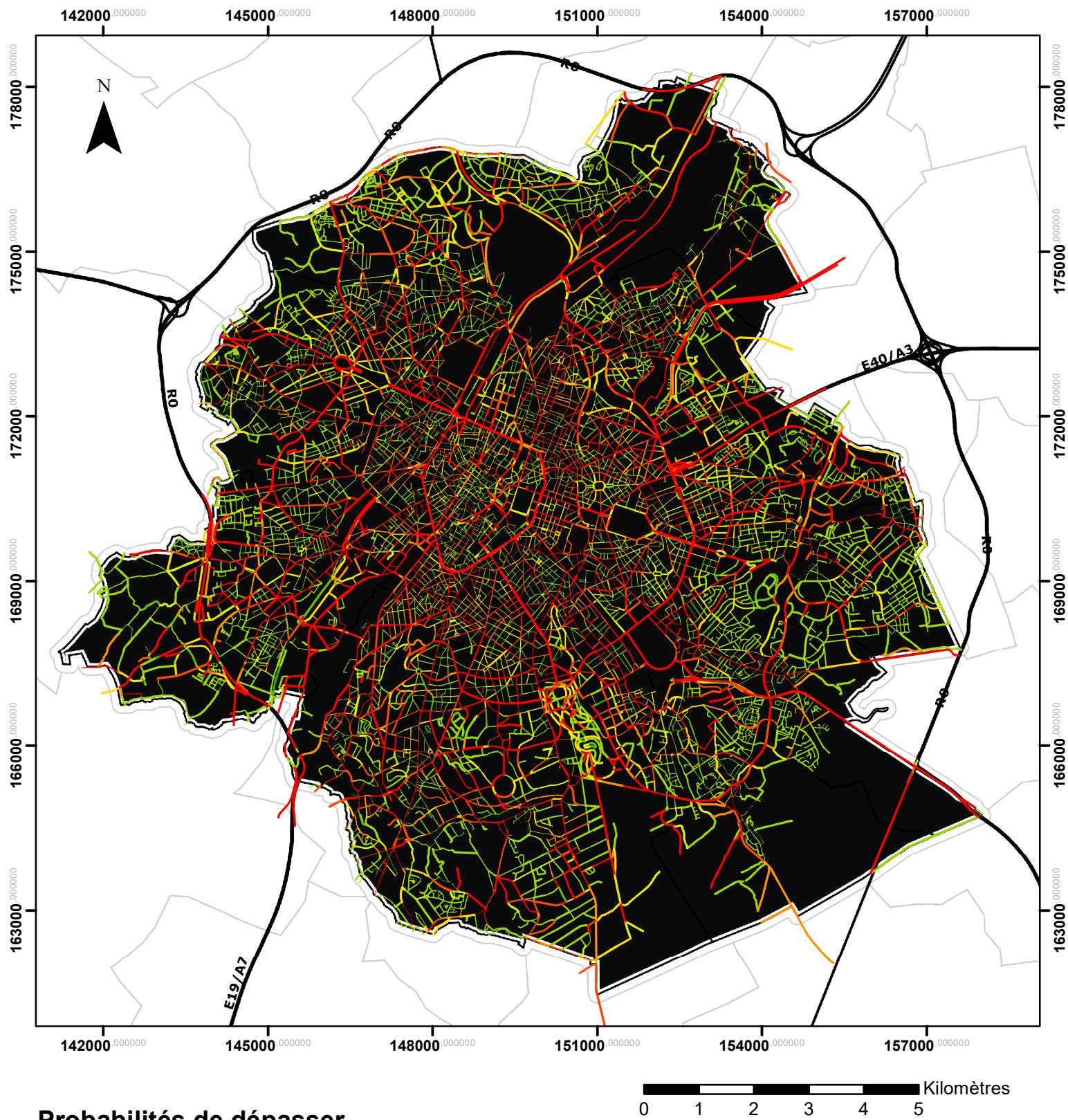
Datum: Belge 1972

Unités: Mètres

Auteurs: Guillaume De Meue, Dilhan Ozturk, Henri Moens de Hase  
Date: 18-12-19

Données sources: Concentrations en black carbon (2014-2016)  
Projet ExpAIR - IBGE

# Probabilités de dépasser en moyenne 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> durant les heures creuses (11h-15h)



## Probabilités de dépasser 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>

[Color Box]	0,000 - 0,125	[Color Box]	0,500 - 0,625
[Color Box]	0,125 - 0,250	[Color Box]	0,625 - 0,750
[Color Box]	0,250 - 0,375	[Color Box]	0,750 - 0,875
[Color Box]	0,375 - 0,500	[Color Box]	0,875 - 1,000

Système de coordonnées: Lambert Belge 1972

Projection: Lambert Conique Conforme

Datum: Belge 1972

Unités: Mètres

Auteurs: Guillaume De Meue, Dilhan Ozturk, Henri Moens de Hase  
Date: 18-12-19

Données sources: Concentrations en black carbon (2014-2016)  
Projet ExpAIR - IBGE