

DOSSIER Ozone troposphérique

Francis Massen, meteoLCD
francis.massen@education.lu

version 1.0 18 Septembre 2012
quelques corrections typographiques le 18 juillet 2013

Ce dossier représente les résultats d'une recherche scientifique concernant l'épisode de pics d'ozone du 25 au 27 juillet 2012 au G. D. de Luxembourg. Il comporte une analyse de l'évolution des concentrations d'ozone au sol mesurées par 5 des 6 stations de l'Administration de l'Environnement, une discussion sur les choix des stations de référence et l'opportunité de restrictions de la vitesse de circulation.

Ce travail de recherche a été fait par l'auteur par curiosité scientifique personnelle ; il ne représente donc pas un travail commandé ni rémunéré. **Les idées exprimées sont celles de l'auteur, et n'engagent en rien le Lycée classique de Diekirch ou le Ministère de l'Education Nationale.** Tous les commentaires et discussions sont les bienvenus, et peuvent être adressés sur le site <http://meteolcd.wordpress.com/2012/09/22/dossier-ozone-2012/>

1. Provenance de l'ozone au sol

L'ozone troposphérique O_3 est un gaz présent en permanence dans l'atmosphère basse. Il peut provenir de 6 sources différentes, dont 3 sont les produits de réactions photochimiques. Une seule source peut être influencée par des décisions politiques (t.q. limitations du trafic), elle est la seule source anthropogène (voir fig.1).

Dans ce qui suit, nous allons négliger la production de l'ozone par les décharges électriques comme la foudre, les incursions stratosphériques et également l'apport par des transports à longue distance (comme hémisphérique), bien que ces derniers sont estimés être à la base d'une partie non négligeable du back-ground ozone .

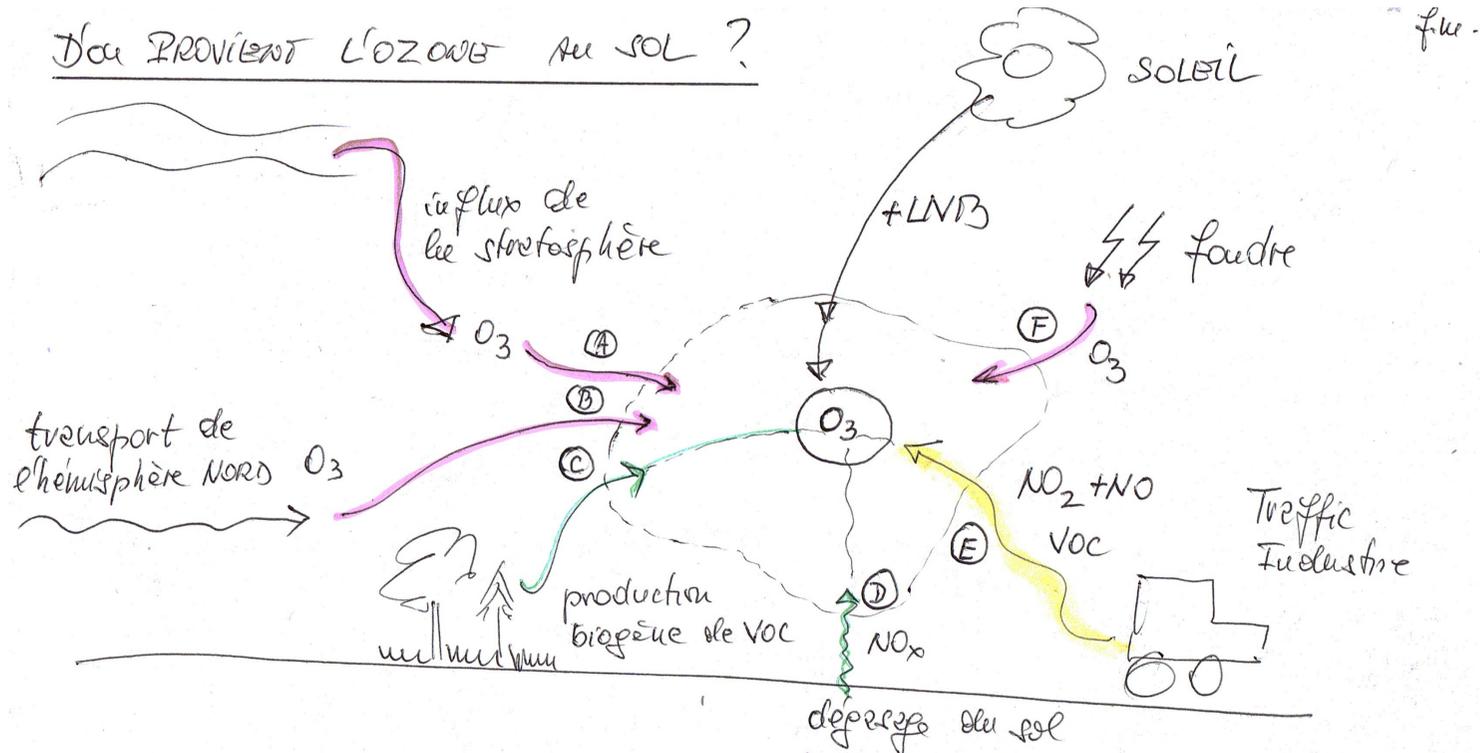
Il est important de remarquer qu'il n'existe pas d'atmosphère sans ozone : O_3 fait partir des gaz « naturels ». Sa concentration varie de façon importante selon les saisons, conditions météorologiques et émissions biogènes (= naturelles) ou anthropogènes (= causés par l'activité humaine).

Environ 90% de l'ozone (= le « bon » ozone) se trouve dans la stratosphère et protège la surface terrestre des rayons UVC, qui ont un fort potentiel biocide. Le reste est l'ozone au sol.(ozone troposphérique)

Depuis de nombreuses années, l'ozone, les NO_x et les rayons UVB sont mesurés par la station météorologique du Lycée classique Diekirch, ainsi que par les stations du réseau national de l'Administration de l'Environnement (qui cependant ne font pas de mesures UVB). La tendance observée à Diekirch est vers une augmentation de l'épaisseur de la couche d'ozone (c.à.d. du « bon » ozone), et une diminution de la concentration de l'ozone au sol (c.à.d. du « mauvais » ozone). Voir <http://meteo.lcd.lu/trends/trends.html>

La recherche sur les dangers de l'ozone pour les humains et la végétation n'aboutit pas à des conclusions unanimes : certains chercheurs placent le seuil où pourraient apparaître des gênes sur certaines personnes à $180 \mu g/m^3$ (environ 90 ppb), d'autres disent qu'il n'y a pas de seuil sans danger. Il est évident que cette dernière conclusion est difficile à accorder à la situation naturellement présente !

Où PROVIENT L'OZONE AU SOL ?



- SEUL (E) PEUT-ÊTRE MODIFIÉ (fermeture, microsites)
- (A) (C) (D) (F) SONT DES SOURCES NATURELLES
- (C) (D) (E) exigent LNB pour PRODUIRE OZONE
- EN ÉTÉ LORS DES PICS OZONE, (C) (D) (E) SONT LES PLUS IMPORTANTS
- L'OZONE EST DÉTRUIT PAR NO

f. werraen

Fig.1 Provenance de l'ozone troposphérique : Seule la voie E peut-être influencée par des décisions à court terme.

2. Réactions photochimiques simplifiées de production d'ozone troposphérique

La production de O_3 exige la présence de 2 facteurs: rayons UVB et gaz précurseurs : les plus importants sont les NO_x (essentiellement NO_2 et NO) et les composés organiques volatils (VOC). Tous ces gaz ont à la fois une origine biogène et humaine : NO_x = dégazage des terres (activité microbienne) et gaz d'échappement ou de combustion, VOC = terpènes émis par les conifères, isoprènes émis par les arbres à feuilles, prairies etc. et aussi comme faisant partie des gaz d'échappement ou de solvants divers.

En simplifiant on peut dire que NO_2 crée l'ozone et NO le détruit. Les VOC entraînent la création de NO_2 et de là d'ozone.

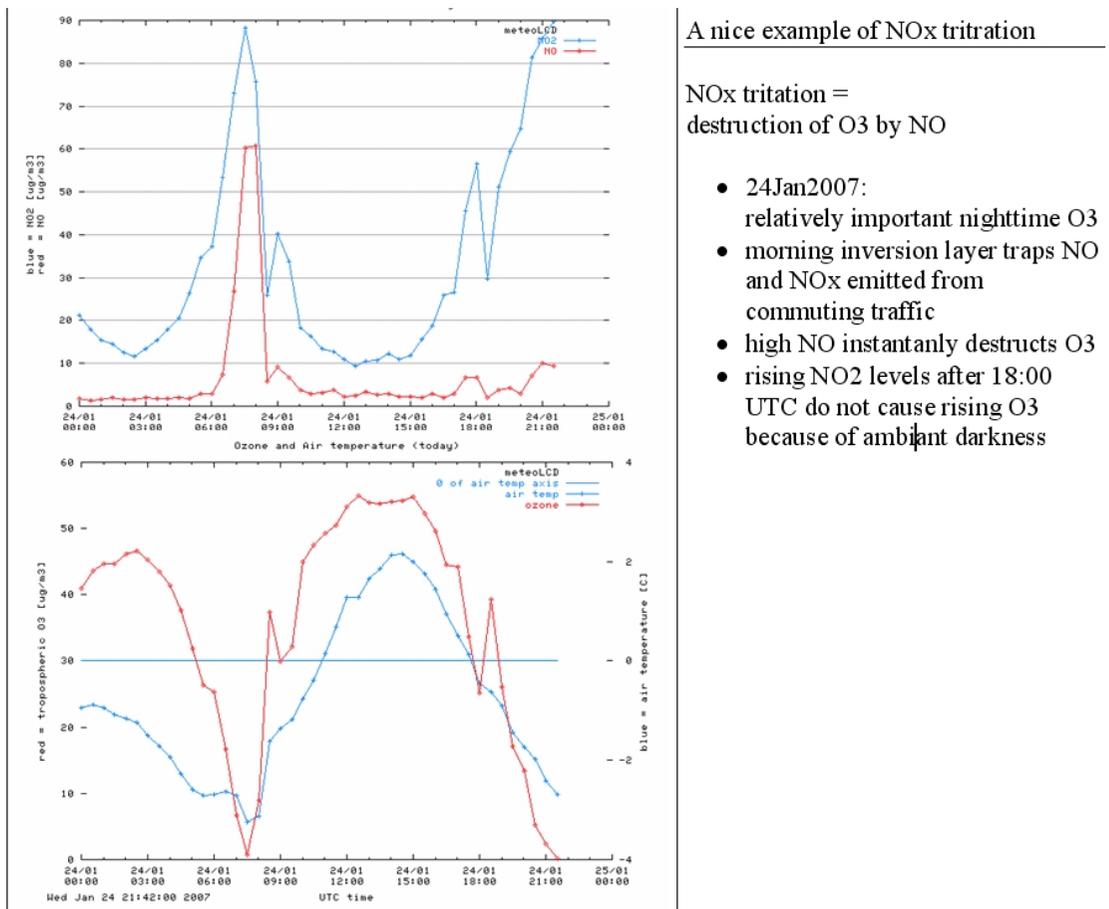
La figure 2b montre de façon très simplifiée ces réactions chimiques (pour les VOC il y en a des milliers !). Il est important de noter que le dégazage biogénique des VOC augmente avec la température. Ceci signifie que les périodes de pics d'ozone sont des périodes de fort ensoleillement (UVB important), de hautes températures et de vitesse de vents faibles : ceci est le cas lors des périodes anticycloniques de beau temps en fin de printemps et en été (fin mai jusque mi-août) et certainement des périodes caniculaires d'été.

L'apparition de pics d'ozone durant ces périodes est donc un facteur normal, naturel et prévisible.

Puisque l'intensité des UVB est maximale dans les régions d'air pur, il ne faut pas s'étonner qu'au Luxembourg la station de Vianden située au Mont St. Nicolas, entourée d'une végétation abondante et où la turpitude atmosphérique est petite, présente de loin les concentrations d'ozone les plus élevées et les pics les plus fréquents ! Ces épisodes sont donc un phénomène naturel.

L'évolution de la concentration de l'ozone au cours d'une journée est très différente entre les stations rurales et les stations urbaines. Dans les stations rurales, la destruction nocturne de l' O_3 (plus de production, parce que plus de rayons UVB) est lente et partielle; dans les régions urbaines où existe un trafic permanent, les rejets de NO détruisent rapidement l'ozone existant, de sorte que les concentrations tombent très vite à des niveaux bas lorsque la production par les UVB s'arrête. La figure 3 montre ceci de façon schématique.

La destruction de l'ozone par le NO est très bien documentée par la figure 2a suivante (mesures de meteoLCD) : Les pics matinaux de NO (courbe rouge, figure supérieure) font tomber la concentration de l'ozone (courbe rouge, figure inférieure) pratiquement à zéro.



A nice example of NOx titration

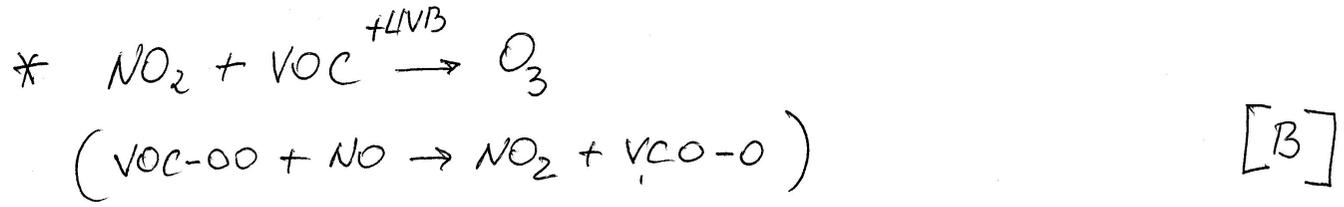
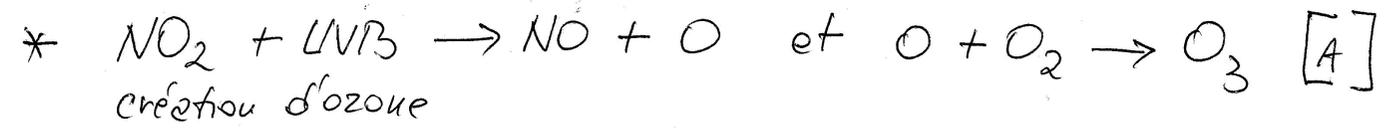
NOx titration =
destruction of O3 by NO

- 24Jan2007:
relatively important nighttime O3
- morning inversion layer traps NO and NOx emitted from commuting traffic
- high NO instantly destroys O3
- rising NO2 levels after 18:00 UTC do not cause rising O3 because of ambient darkness

Fig. 2a: Exemple de la destruction de l'ozone par NO (meteoLCD, colloque Henvi 2008)

f.l.u.

RÉACTIONS SIMPLIFIÉES



* $\frac{VOC}{NO_x}$ élevé \rightarrow [B] (situation VIANDEN, "NO_x limited"
 LE SEUL MOYEN DE RÉDUIRE [O₃] EST DE RÉDUIRE VOC)

$\frac{VOC}{NO_x}$ faible \rightarrow [A] (situation Luxembourg, "VOC-limited"
 RÉDUIRE NO_x AUGMENTE [O₃])

Fig.2b. Réactions simplifiées

SITUATIONS RURALE et URBAINE

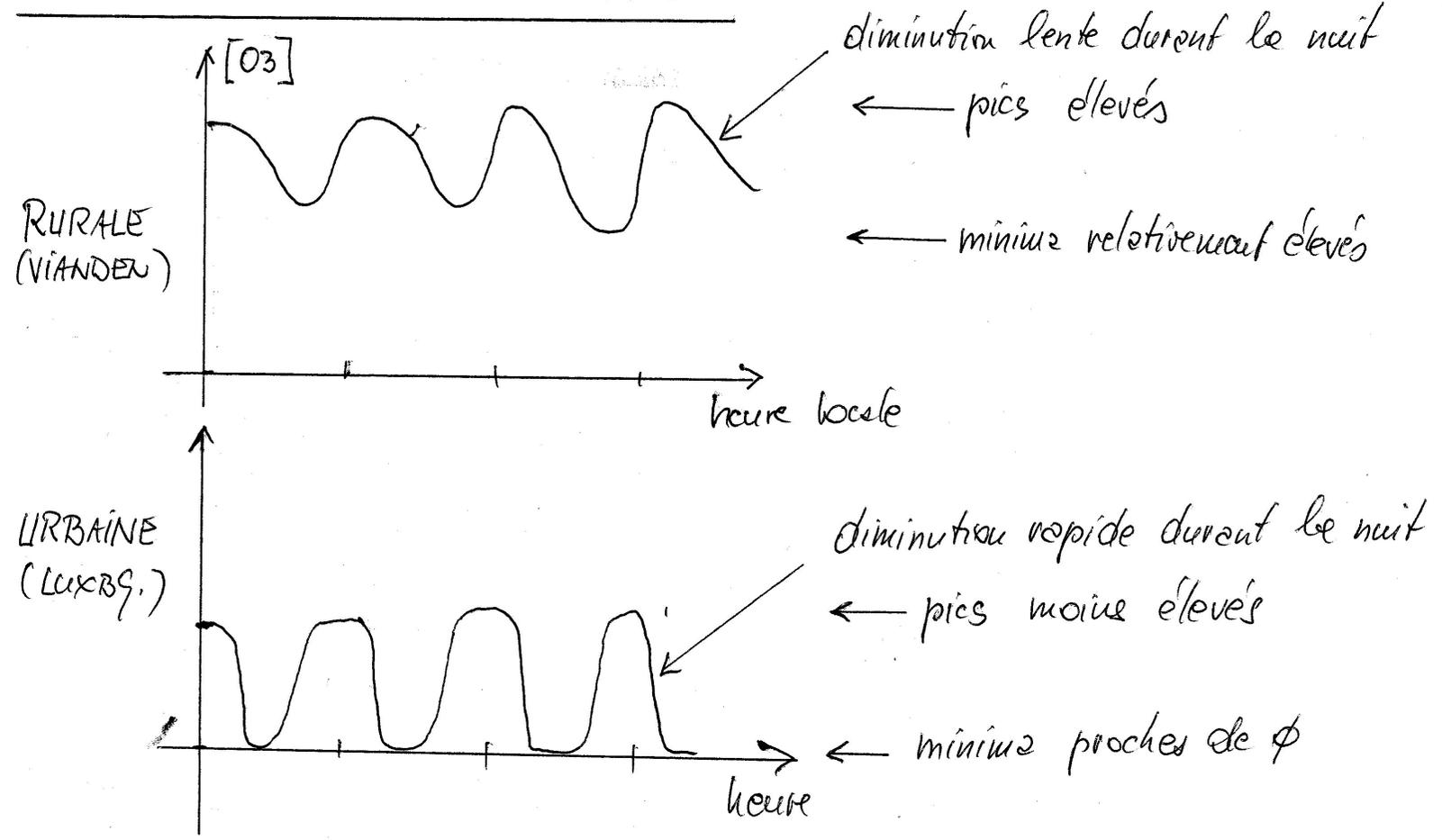


Fig.3. Evolution diurne des concentrations d'ozone dans une station rurale (p.ex. Vianden) et urbaine (p.ex. Luxembourg)

3. Les limites de concentration et seuils d'avertissement ou d'alarme

Le seuil d'alarme est de 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 120 ppb) en Europe ; ce seuil n'est pratiquement jamais atteint au Luxembourg. Le seuil d'information est de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Europe ; à partir de ce seuil des restrictions (comme diminution des vitesses de circulation) peuvent être imposées.

Pour des raisons inconnues le Luxembourg adopte un seuil encore inférieur : 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ suffisent pour déclencher une limitation des vitesses à 90 km/h sur les autoroutes et la publication de toutes sortes d'avertissements et de « bons » conseils (dont certains sont d'une évidence banale, comme ne pas faire des efforts trop importants durant ces périodes caniculaires !)

L'actuelle directive européenne *Council Directive on air pollution by ozone (92/72/EEC)* adoptée en septembre 1992 prescrit que :

Table 4: Threshold levels set by the Council Directive on air pollution by ozone

<i>Threshold value set by</i>	<i>Description</i>	<i>Criteria based on</i>	<i>Value $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$</i>
<i>European Council Directive 92/72/EEC</i>	<i>Population information threshold</i>	<i>1 hour average concentration</i>	<i>180</i>
	<i>Population warning threshold</i>	<i>1 hour average concentration</i>	<i>360</i>

<http://www.eea.europa.eu/publications/TOP08-98/page006.html>

On voit donc que le seuil d'alarme est très élevé (360) ; à ma connaissance il n'a jamais été atteint au Luxembourg.

La directive dit en plus que :

1. *Stations should be located at geographically and climatologically representative sites where:*

- *the risk of approaching or exceeding threshold values is highest;*
- *it is likely that either the population or vegetation is exposed.*

La station de Vianden (qui chaque année tient les records de maxima d'O₃) n'est pas située en un endroit représentatif ni de la géographie du Luxembourg, ni de la population, puisque la très grande majorité des habitants se trouve dans la région de la capitale et dans des régions plus au sud. Etant une station rurale où la circulation est minimale, elle n'est non plus représentative des conditions de vie de la majorité des habitants du pays.

Les taux élevés de cette station sont essentiellement dus à la disponibilité de VOC biogènes.

Le seuil de 160 ug/m₃ n'existe pas en France, et celui de 180 ug/m₃ permet de donner une information et des recommandations, mais ne constitue pas encore un seuil d'alerte. **Le niveau d'alerte 1 correspond à une concentration supérieure à 240 microgrammes/m³ en moyenne horaire dépassée pendant 3 heures consécutives et permet d'imposer des restrictions de vitesse.** (voir fig. 4)

On voit donc que par rapport à la France, le Luxembourg s'est imposé des limites très basses.

Si le Luxembourg suivait la réglementation française, il n'y aurait en général pas « d'alerte SMOG » n'y de restrictions de vitesse sur autoroute.

Seuils d'information-recommandations et seuils d'alerte

4 polluants font l'objet d'arrêtés préfectoraux définissant les mesures d'information de la population en cas de pic de pollution. Il s'agit du dioxyde de soufre SO₂, du dioxyde d'azote NO₂, de l'ozone O₃ et des particules PM10.

Polluant	Seuil d'information-recommandations	Seuil d'alerte
Dioxyde de soufre SO ₂	300 µg/m ³ en moyenne horaire	500 µg/m ³ en moyenne sur 3 heures
Particules en suspension PM10	80 µg/m ³ en moyenne sur 24 heures	125 µg/m ³ en moyenne sur 24 heures
Dioxyde d'azote NO ₂	200 µg/m ³ en moyenne horaire	<ul style="list-style-type: none">400 µg/m³ en moyenne horaireou 200 µg/m³ en moyenne horaire si le dépassement a été enregistré pendant deux jours consécutifs et s'il est prévu pour le lendemain
Ozone O ₃	180 µg/m ³ en moyenne horaire	<ul style="list-style-type: none">240 µg/m³ en moyenne sur 3 heures300 µg/m³ en moyenne sur 3 heures360 µg/m³ en moyenne horaire

Fig.4 . Seuils ozone en France.

4. Analyse de la période de pics d'ozone en juillet 2012

Le 25 juillet 2012 une alerte à l'ozone a été diffusée et des restrictions de circulation imposées. Les figures suivantes montrent pour la période du 18 juillet au 1 août l'évolution des concentrations horaires de O₃, NO₂ et NO. Les figures ont été réalisées en consultant le site internet de l'Administration de l'Environnement.

(http://www.environnement.public.lu/air_bruit/dossiers/PA-reseaux_mesure_air/reseau_automatique/resultats_mesures_live/index.html)

Parmi les 6 stations de l'administration, celle de Luxembourg-Centre était inopérante.

L'analyse des concentrations de NO₂ et de NO montre clairement que les stations de Vianden et de Beidweiler sont des stations rurales (pratiquement pas de concentrations de NO₂ et NO visibles) ; Beckerich est une station semi-rurale (trafic frontalier non négligeable, démontré par des pics visibles mais pas très importants de NO₂ et NO), Bonnevoie et Esch sont des stations urbaines (pics journaliers NO₂ et NO importants).

Les figures 5 à 9 document l'évolution des trois gaz O₃, NO₂ et NO pour la période du 18 juillet au 1 août 2012.

Vianden

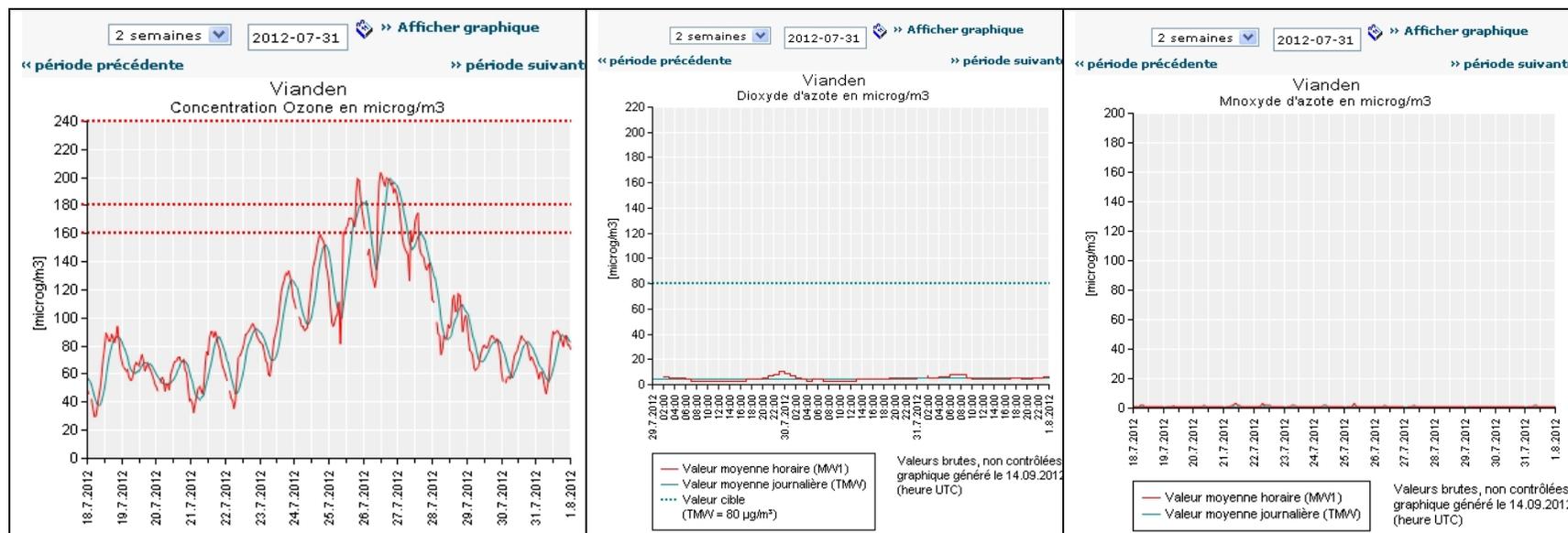


Fig. 5. Station rurale, très peu de trafic

Pratiquement pas de précurseurs anthropogéniques (NO₂). Réduction nocturne faible (pas de NO)
 Hautes concentrations O₃ dues aux émissions naturelles de terpènes (conifères) et isoprènes (p.ex. chênes)

Beidweiler

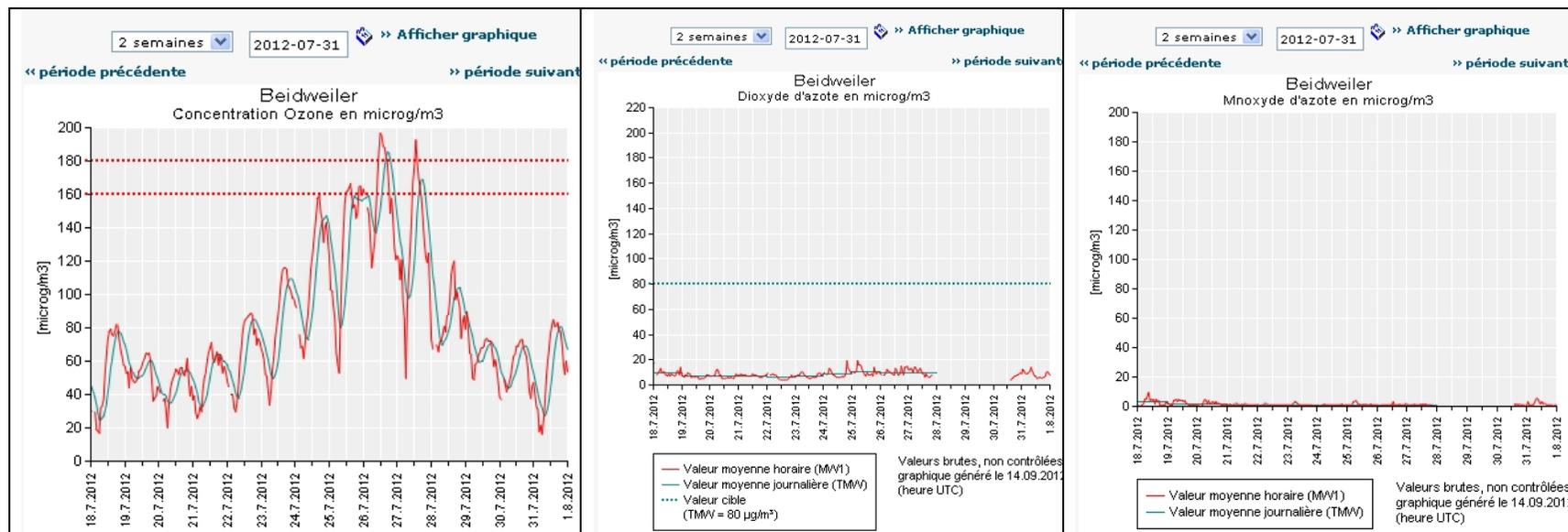


Fig. 6 Station rurale, peu de trafic.

Peu de précurseurs anthropogéniques (NO_2). Réduction nocturne faible (peu de NO)
Hautes concentrations O_3 dues aux émissions naturelles de terpènes (conifères) et isoprènes (p.ex. chênes)

Beckerich

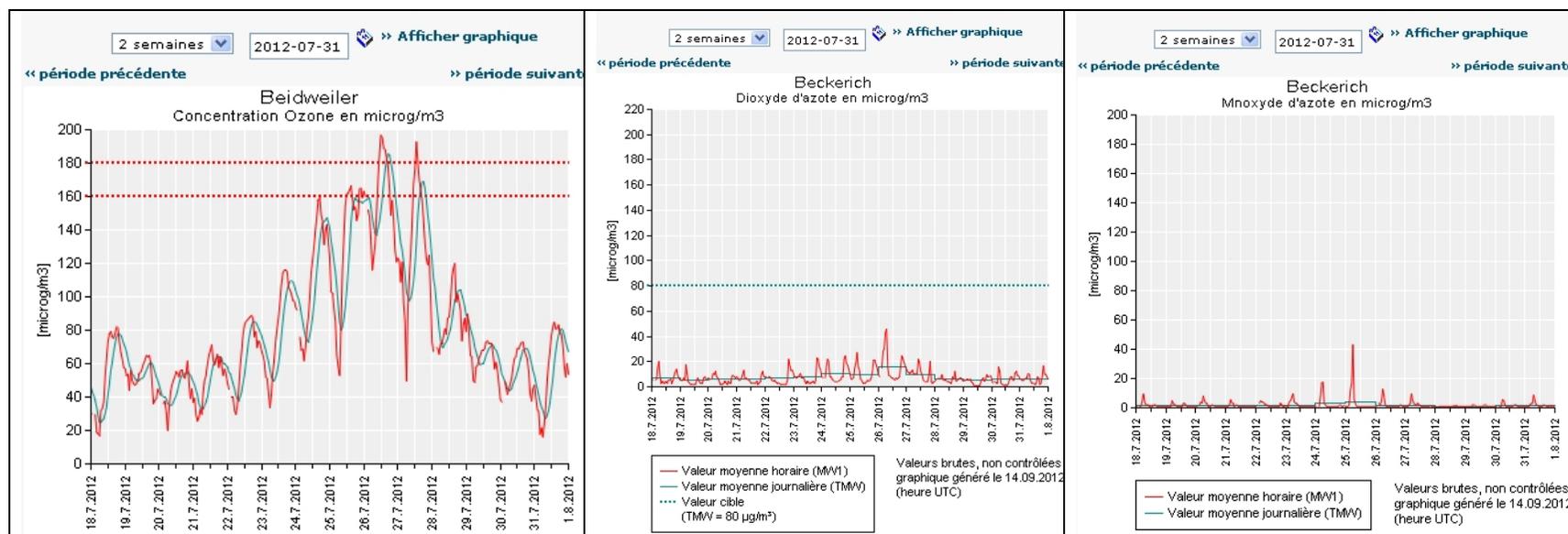


Fig. 7. Station semi-rurale, trafic moyen.

Faible concentration de Précurseurs anthropogéniques (NO_2). Faible réduction nocturne (assez peu de NO)
Hautes concentrations O_3 dues aux émissions naturelles de terpènes (conifères) et isoprènes (p.ex. chênes) et aux émissions du trafic.

Bonnevoie

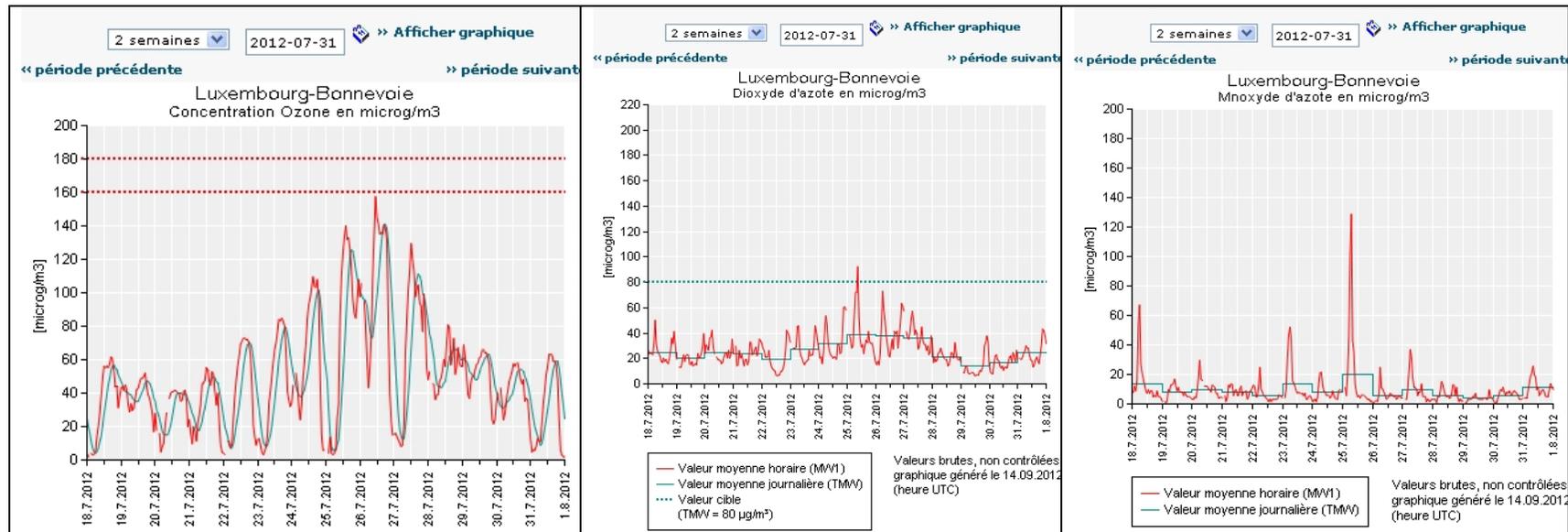


Fig. 8. Station urbaine, trafic très important.

Concentrations élevées de précurseurs anthropogéniques (NO_2). Importante réduction nocturne (émissions NO importantes). Pics de concentrations O_3 dues aux émissions du trafic et aux émissions biogéniques. Valeurs en-dessous du seuil d'information. ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Esch

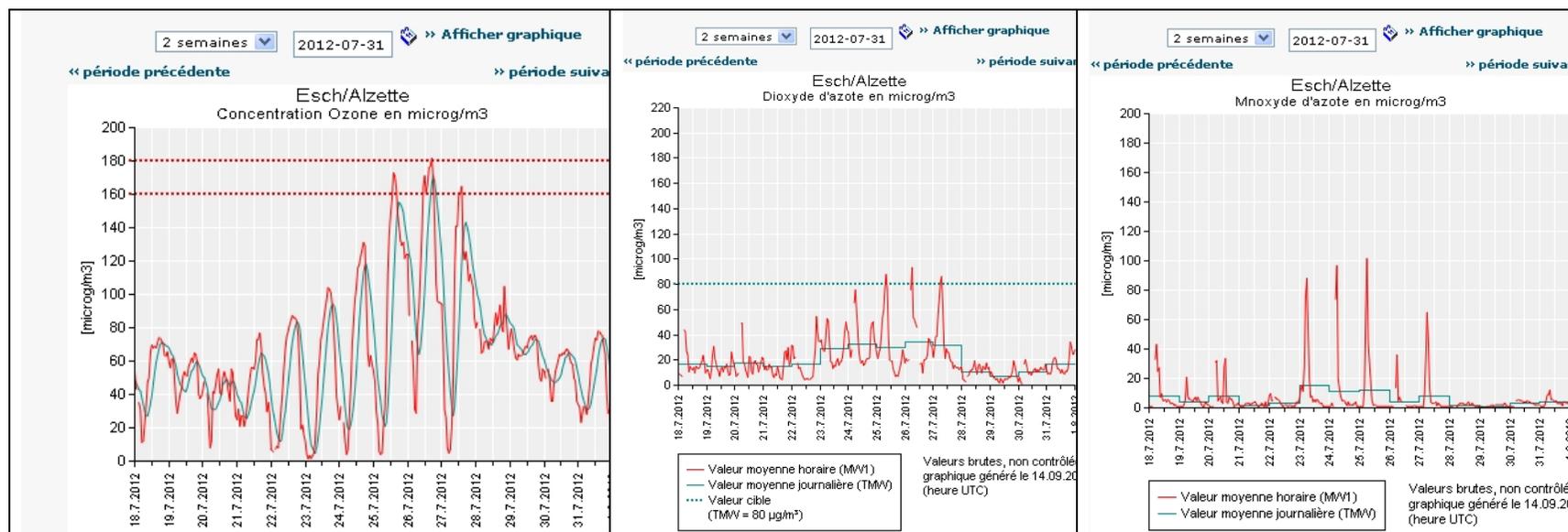


Fig. 9 Station urbaine, trafic très important.

Concentrations élevées de précurseurs anthropogéniques (NO_2). Importante réduction nocturne (émissions NO importantes). Pics de concentrations O_3 dues aux émissions du trafic et aux émissions biogéniques. Valeurs ne dépassant pas le seuil d'information. ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

On remarque que le seuil de 180 ug/m³ n'est jamais dépassé dans les stations urbaines (sauf 1 heure en Esch-Alzette)

La table suivante résume les heures de dépassement des concentrations de 160 et 180 ug/m³ pour les 5 stations.

Table des dépassements horaires des seuils de 160 et 180 ug/m³ durant les 3 jours de 25, 26 et 27 juillet 2012

	25 juillet 12		25 juillet 12		25 juillet 12		commentaire
	>=160	>=180	>=160	>=180	>=160	>=180	
Vianden	14	4	17	13	9	1	Record des dépassements
Beidweiler	6	0	12	6	5	2	Nombreux dépassements
Beckerich	0	0	9	8	2	0	Dépassement modestes
Luxembourg	0	0	0	0	0	0	Aucun dépassement !
Esch/Alzette	3	0	8	1	3	0	Un seul dépassement de 180

Cette table montre de façon convaincante que les stations rurales ont les dépassements les plus fréquents. Les figures précédentes montrent que les concentrations des NOx en ces stations sont minimales, ce qui signifie que les concentrations élevées d'ozone ne proviennent pas de régions industrielles situées à l'ouest (direction prédominante des vents).

Conclusions :

- 1. On ne peut pas prendre les stations rurales comme référence pour déclencher des restrictions ou alarmes, puisque les concentrations d'ozone y sont élevées par suite de processus naturels.**
- 2. Si les stations situées dans les parties du pays rassemblant la très grande majorité de la population (Luxembourg, Esch/Alzette) étaient prises comme référence, aucune alarme ni restriction n'aurait été nécessaire !**

L'erreur principale des autorités semble d'ignorer les phénomènes naturels, tel que la production importante de VOC biogéniques, de confondre production naturelle et production causée par l'activité humaine et de choisir comme référence des stations (une seule station ?) non représentatives.

De nombreuses recherches montrent l'importance des émissions biogènes :

1. Dans "The impacts of reactive terpene emission from plants on air quality in Las Vegas, Nevada" les auteurs Papiez Maria et al. écrivent que "*biogenic terpenes increased time-dependent ozone production rates by a factor of 50*" [Atmospheric environment, 2009]

2. Dans "Isoprene effect on urban ozone " on trouve: "*The general conclusions drawn from these studies were that biogenic emissions enhanced O₃ formation in most areas and naturally emitted VOCs, especially isoprene, played a significant role in ground-level O₃*" [JGR, 2006]

3. F. Massen a rappelé dans sa présentation de posters lors du colloque Henvi (Luxembourg, 2008) que :
." It is assumed that natural VOC's globally outweigh anthropogenic sources: isoprene: 675 Tgy⁻¹, aVOC's: 140 Tgy⁻¹ [Royal Society, 2008]."

5. Les réductions de vitesses sont-elles efficaces?

Plusieurs études récentes montrent, soit par des mesures (observations), soit par des modélisations, que les réductions de la vitesse de circulation sont inefficaces à diminuer les concentrations locales de l'ozone au sol :

1. Keller et al : “The impact of reducing the maximum speed limit on motorways in Switzerland to 80 kmh⁻¹ on emissions and peak ozone” [Environmental Modeling and Software, 2008] concluent:

Les réductions de NOx ont été en-dessous de 4% ; les émissions de VOC n'ont pas changés. Les pics d'ozone ont diminué de moins de 1%

2. Dijkema et al : “Air quality effects of an urban highway speed limit reduction “ [Atmospheric Environment, 2008] :

Pas de réductions des NOx (étude faite à Amsterdam)

3. Moussiopoulos et al : “ Assessing ozone abatement strategies in terms of their effectiveness on the regional and urban scales “ [Atmospheric Environment, 2000]:

Les limitations de vitesse peuvent conduire à une augmentation des taux d'ozone par suite de la diminution des taux de NO

4. Une seule étude prévoit des réductions de NOx et en déduit une réduction de l'ozone (non mesurée) : Keuken et al : “Reduced NOx and PM10 emissions on urban motorways in the Netherlands by 80 km/h speed management“ [Science of the Total Environment, 2010]. Cependant les mesures des NOx n'ont pas été horaires, mais seulement sur des périodes très longues, et il n'y a pas de mesures sur les réductions éventuels de l'ozone. (Amsterdam et Rotterdam)

5. Une grande expérience de restriction de vitesse (Heilbronn Ozon Experiment, 23-26 Juni 1994) ne donnait pas de résultats de mesure convaincants. Les diminutions des NOx étaient calculées, faute d'avoir pu être mesurées.

Même le UBA (Umweltbundesamt) écrit que des mesures ponctuelles (comme le sont les réductions de vitesse au Luxembourg) sont inefficaces : « Eine Minderung der Ozon-Spitzenwerte um höchstens 5% « (si restriction de vitesse à 80 et 60 km/h (voitures, camions) [UBA : Hintergrundinformation Sommersmog, 2005]

6. Les questions à poser pour préciser les problèmes.

La problématique des restrictions de la vitesse de circulation, des avertissements et mesures annexes par les autorités compétentes appelle les questions suivantes :

1. Quelles sont les (ou la station) de mesure qui servent (sert) comme référence pour fixer les seuils d'information ou d'alarme au Luxembourg?
2. Pourquoi les stations les plus représentatives des régions peuplées (Luxembourg, Esch/Alzette) ne sont-elles pas retenues exclusivement ?
3. Pourquoi les émissions naturelles des VOC biogènes, et par suite les concentrations ozone naturellement élevées des stations rurales (Vianden, Beidweiler) ne sont elles pas reconnues comme un phénomène indépendant de l'activité humaine ?
4. Existe-t-il une seule mesure faite au Luxembourg montrant une quelconque efficacité des restrictions de vitesse ?
5. Pourquoi les renseignements des recherches scientifiques récentes montrant l'inefficacité des restrictions de vitesse ne semblent elles pas être considérés ?
6. Pourquoi les panneaux bleus « SMOG » posés aux frontières et à l'intérieur du pays sont-ils souvent enlevés avec un grand retard sur la levée des restrictions, sachant que l'effet de ces avertissements sur les touristes peut être désastreux ?

Références :

- Umwelt-Bundesamt : Hintergrundinformation : Sommersmog (2005).
www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3562.pdf
- Keller, Johannes et al.: The impact of reducing the maximum speed limit on motorways in Switzerland to 80 kmh-1 on emissions and peak ozone.
Environmental Modelling and Software, 23 (2008) p. 322-332.
- Sillman, Sanford: Overview: Tropospheric ozone, smog and ozone-Nox-VOC sensitivity.
www-personal.umich.edu/~sillman/ozone.htm
- Dijkema, Marieke et al.: Air quality effects of an urban highway speed limit reduction
Atmospheric Environment 42 (2008) p. 9098 – 9105
- Keuken, M.P. et al. Reduced NOx and PM₁₀ emissions on urban motorways in the Netherlands by 80 km/h speed management.
Science of the Total Environment 408 (2010) 2517 – 2526
- Moussiopoulos, N. et al.: Assessing ozone abatement strategies in terms of their effectiveness on the regional and urban scales
Atmospheric Environment 34 (2000) p. 4691 – 4699
- Massen, Francis: 10 years ozone measurements at meteoLCD
Poster presentation at the colloque Henvi 2008, Luxembourg
http://meteo.lcd.lu/papers/Henvi_2008/Henvi8_allmeteoLCDposters.pdf



Panneau d'avertissement maintenu longtemps après la fin des épisodes de pic d'ozone (2006, Gilsdorf)
(photo F. Massen)