

# Pollution atmosphérique en forêt domaniale de Saint-Avold (Moselle) Mesure du dioxyde d'azote et des poussières sédimentables

## Atmospheric pollution in the Saint-Avold forest (Moselle, France) Measure of nitrogen dioxide and coarse particles

Philippe LAVAL-GILLY\*, Dominique MORLOT\*, Mickaël MARIOTTI\*, Jaïro FALLA\*

### Résumé

Cette étude présente une évaluation de la pollution du domaine forestier de Saint-Avold au moyen d'échantillonneurs passifs (tubes passifs de Palmes) pour le NO<sub>2</sub> et de plaquettes de dépôts pour les poussières sédimentables. De plus, elle tente de mettre en évidence le caractère témoin de la forêt de La Houve. L'ensemble des résultats obtenus montre tout d'abord que la diffusion des pollutions par le NO<sub>2</sub> et les particules peut être étudiée en milieu forestier par le biais de tubes passifs et de plaquettes de dépôt. La forêt domaniale de La Houve apparaît comme peu polluée : son utilisation en tant que « forêt témoin » semble donc justifiée. En revanche, les forêts de Saint-Avold, de Longeville et du Steinberg sont exposées au NO<sub>2</sub> et aux particules. La concentration de NO<sub>2</sub> émise par l'autoroute A4 (15 à 23 µg/m<sup>3</sup>) est environ deux fois plus faible qu'en milieu urbain (35 à 40 µg/m<sup>3</sup>; Saint-Avold, 2000-2001) principalement à cause de la densité du trafic. Quant aux particules, la présence de billes d'aluminium semble désigner la combustion d'énergies fossiles comme principal producteur. Seule une analyse comparative des particules environnementales et des rejets des différentes sources (autoroutes, centres industriels) pourrait le confirmer. Ces données, associées à celles des études en cours (analyses des aiguilles des résineux et dendrochronologie, menées par l'INRA) devraient permettre d'utiliser la comparaison des forêts de La Houve et de Saint-Avold pour identifier des indicateurs significatifs de l'état du domaine et d'établir des plans de gestion adaptés.

### Abstract

In this article, we focus on the evaluation of the forest pollution on the domain of Saint-Avold (France), using passive samplers and small plates techniques. NO<sub>2</sub> and coarse particles were measured. Results obtained from the domain of "La Houve", show a low pollution level of this site: it could be taken as a control forest site. By contrast, the domains of "Saint-Avold", "Longeville" and "Steinberg" were exposed to NO<sub>2</sub> and coarse particles emitted by the vehicle traffic of the highway A4. Nevertheless, NO<sub>2</sub> concentration was almost two fold lower than those of urban sites because of the density of the road traffic. Concerning particle analysis, aluminium microbeads were detected on particles, revealing a possible influence of the combustion proceedings, near to the site. Only the comparison between the analysis of particles found and those from industrial fumes and highway pollution could confirm their origin. Data presented here were related to those obtained by INRA (coniferous needles analysis, dendrochronology), allowing the comparison between the control site "La Houve" and the studied forest site, "Saint-Avold". It could lead to significant indicators determination and the management of the studied forest for wood exploitation.

\*Laboratoire d'Immunologie – Microbiologie (LIM), IUT de Thionville – Yutz, Impasse A. Kastler, 57970 Yutz, France.  
Correspondance : [plg@iut.univ-metz.fr](mailto:plg@iut.univ-metz.fr)

## Introduction

Le domaine forestier géré par l'ONF de Saint-Avoid (Office national des forêts, Saint-Avoid, France) se situe dans une région où l'activité industrielle principale est constituée par le centre pétrochimique de Carling (Elf Atochem) et la centrale électrique Émile Huchet (centrale thermique). Elles sont, comme le soulignent les relevés des stations de mesures du réseau ESPOL (Association pour la mesure de la qualité de l'air de l'est mosellan, Saint-Avoid, France), les principales sources industrielles de polluants du site. Deux voies de circulation automobile importantes traversent le site de part en part, induisant la présence d'une pollution diffuse essentiellement constituée par le NO<sub>2</sub> [1]. Conscients de l'impact des polluants atmosphériques sur la forêt (diminution de la biomasse, altération de la distribution des réserves nutritives, augmentation de la sensibilité aux maladies...) [2], l'ONF de Saint-Avoid a lancé un programme d'étude visant à mieux comprendre la répartition des polluants au sein du domaine dont il a la charge. Dans ce cadre, les forêts de Saint-Avoid et de La Houve ont été divisées en 58 placettes circulaires de six ares. Le plan d'échantillonnage repose sur une stratification du massif en zones homogènes dont les bases sont le type de station, le type de peuplement et l'âge du peuplement. Ainsi, le pin sylvestre occupe, en moyenne, 59 % de la surface terrière, le hêtre étant l'espèce d'accompagnement majoritaire [3]. La réalisation d'un état des lieux permettrait aussi de définir des indicateurs significatifs, facilement accessibles par les agents de l'ONF, de l'état du domaine pour établir des plans de gestion adaptés. Pour atteindre ces objectifs, l'ONF de Saint-Avoid, l'INRA (Champenoux), ESPOL et le Département Génie biologique Génie de l'Environnement de l'IUT de Thionville – Yutz ont été sollicités (Yutz).

L'objectif du travail présenté ici est d'évaluer la propagation des polluants au sein du domaine forestier de Saint-Avoid et de déterminer si la forêt de La Houve peut être utilisée comme « témoin » d'un développement forestier soumis à un air peu pollué. Dans ce cadre, la dispersion des polluants au niveau du houppier sera évaluée par mesure du NO<sub>2</sub> au moyen de tubes passifs de Palmes, et par la mesure des poussières sédimentables grâce à la méthode des plaquettes de dépôt [4, 5].

## Matériel et méthodes

### Description de la zone d'étude

La zone d'étude est composée des forêts de Longeville, de Saint-Avoid, du Steinberg et de La Houve. L'ensemble du domaine peut se décomposer en deux sous-ensembles :

- les forêts domaniales de Saint-Avoid, de Longeville et du Steinberg occupent une surface totale d'environ

2 740 ha, regroupées sous la dénomination de « forêt de Saint-Avoid ». Elles sont traversées d'est en ouest par l'autoroute A4 et du nord au sud par la N33. De plus, la centrale électrique du Huchet (centrale électrique au charbon) et la plate-forme chimique de Carling (Elf Atochem) y occupent une position centrale ;

- la forêt domaniale de La Houve se situe au nord de Creutzwald et occupe une surface totale d'environ 1 340 ha. Elle n'est située ni à proximité ni sous le vent de sources polluantes « importantes » (industries, réseaux routiers...).

### Les échantillonneurs passifs

#### Principe et analyses

Les tubes à diffusion passive sont utilisés depuis 1976 pour mesurer le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère [6]. Ces capteurs se composent d'un tube de 7 cm de long et de 1 cm de diamètre interne, obturé à l'extrémité supérieure par un bouchon coloré renfermant deux grilles en acier inoxydable imprégnées de 30 µl de milieu absorbant composé d'une solution de triéthanolamine (TEA) à 10 % (v/v) contenant 0,3 % (v/v) de Brij 35. Les tubes sont fermés hermétiquement et conservés à 4 °C avant exposition sur site [7-9].

Au cours de l'échantillonnage, un gradient de concentration s'établit entre le milieu extérieur et la colonne d'air contenue dans le tube. Le polluant diffuse alors jusqu'aux grilles selon la première loi de Fick qui est fonction des caractéristiques géométriques des tubes utilisés ainsi que du coefficient de diffusion moléculaire des gaz en milieu gazeux. Puis le NO<sub>2</sub> réagit avec la solution aqueuse de TEA.

La concentration de NO<sub>2</sub> atmosphérique est déterminée suivant la méthode de Griess-Saltzman appliquée aux tubes passifs [10]. Le NO<sub>2</sub> piégé par la TEA réagit avec le sulfanilamide, formant un sel de diazonium qui donne une coloration rose pourpre lors de son association avec la N-naphtyl-éthylènediamine. Celle-ci est suivie par colorimétrie à une longueur d'onde de 542 nm.

#### Échantillonnage et validation des données

Le choix des sites repose sur un maillage homogène issu des 58 placettes communes à l'ensemble des membres du programme d'étude.

Les tubes passifs sont fixés verticalement, capsule colorée vers le haut, sur des tasseaux permettant de les écarter d'environ 10 cm par rapport au support. Ceux-ci sont installés sur des poteaux à 3,50 m du sol, c'est-à-dire au même niveau que le houppier, et placés à égale distance des troncs, au centre de chaque placette [11]. Des mesures sont réalisées sur des tubes disposés en duplicata sur certains sites. Pour chaque couple, l'écart relatif est calculé afin de s'assurer la répétabilité de la mesure [12]. De plus, le rendement de la mesure par tubes passifs est estimé

par la comparaison des valeurs trouvées sur un site témoin avec celles obtenues, sur une période équivalente, par les analyseurs « actifs » du réseau ESPOL après intégration des mesures. Deux campagnes hivernales et deux campagnes estivales ont été réalisées. La durée d'exposition de chaque campagne est de 15 jours et chaque campagne de mesures est réalisée en duplicata, ce qui conduit à une durée globale de deux fois quatre semaines.

### Les poussières sédimentables

#### *Principe et analyses*

Les poussières sédimentables sont mesurées selon la méthode des « plaquettes de dépôt » (NF X43 – 007 de décembre 1973). Ces supports sont des plaquettes métalliques minces en acier inoxydable pourvues d'une zone de collecte de poussières, de 10 cm de long et de 5 cm de large, et d'une zone de fixation. La zone de collecte est enduite d'un corps gras sur le site d'exposition. Les plaquettes sont ensuite disposées horizontalement. Les poussières véhiculées par l'air s'y déposent et sont piégées par la graisse.

Après exposition, un lavage de la surface exposée avec un solvant organique permet de séparer l'enduit des particules qui sont recueillies par filtration à 0,1 µm. La teneur en poussière est alors déterminée par pesée et exprimée en mg/m<sup>2</sup>/j.

#### *Échantillonnage et validation des données*

Les sites sont retenus selon des critères de choix identiques à ceux des campagnes de mesures du NO<sub>2</sub>. Les plaquettes sont déposées sur les mêmes supports que les tubes passifs mais du côté opposé pour éviter toute perturbation des flux polluants tant gazeux que particulaires.

Des mesures sont réalisées sur des plaquettes disposées en duplicata sur certains sites. Pour chaque couple, l'écart relatif est calculé afin de s'assurer la répétabilité de la mesure. Seule une campagne hivernale a été réalisée afin d'éviter les perturbations liées aux dépôts végétaux (pollens, feuilles...). La durée d'exposition est de 30 jours.

### Répartition des données par groupes

Les valeurs individuelles représentent une première estimation de l'état de la station. Toutefois, afin de pouvoir porter un jugement plus global sur le milieu forestier, il convient d'assigner chaque mesure à des classes de qualité. En premier lieu, la normalité des distributions est vérifiée par les tests de Kolmogorov-Smirnov et de Lilliefors. Une classification hiérarchique ascendante est ensuite utilisée. Les distances interclasses sont évaluées par calcul de leur distance euclidienne suivant la règle du saut minimum, ou *single linkage*.

## Résultats

### Évaluation de la pollution par les tubes passifs de Palmes

#### *Validation des données*

Pour chaque campagne réalisée, la moyenne des écarts relatifs est comprise entre 9 % et 10 %. Leur moyenne sur l'ensemble des campagnes est égale à 9,4 %, indiquant une bonne reproductibilité de la méthode. L'ensemble des résultats obtenus est comparable à ceux relatifs aux études en milieu urbain comme Madrid, Paris, Rouen, Toulouse et Thionville [10, 12-15].

Après avoir vérifié la répétabilité de la mesure, les valeurs relevées sur un site témoin ont été comparées avec celles d'une station mobile appartenant au réseau ESPOL placée sur la zone d'étude. L'ensemble des résultats montre que le rendement moyen de la méthode passive est d'environ 73 %, ce qui est peu différent des résultats trouvés dans d'autres études [12, 15].

#### *Évaluation de la pollution azotée*

Les résultats des campagnes Printemps 2000 et Hiver 2001 sont représentés, respectivement, par les figures 1, 2 et 3. L'analyse des données par classification hiérarchique ascendante, fait apparaître trois classes de concentrations de NO<sub>2</sub> avec des différences statistiquement significatives. Les regroupements sont réalisés avec des distances d'agrégation variant d'environ 2,2 à 2,7 pour les classes de pollutions faibles et moyennes. Les classes pour lesquelles le niveau de pollution est le plus élevé, ont des distances d'agrégation supérieures à 3,1, montrant ainsi une plus grande hétérogénéité dans le regroupement. De plus, la classification fait apparaître une répartition des zones de pollution similaire pour les campagnes hivernales qui seront donc regroupées. En revanche, la répartition des zones de pollution par le NO<sub>2</sub> diverge pour les deux campagnes estivales selon que le couvert végétal est en place ou non, même si les feuillus ne représentent en moyenne qu'environ 41 % de la surface terrière des sites d'échantillonnage [3]. Le feuillage semble alors constituer à la fois un obstacle à la diffusion des gaz mais aussi un piège pour le NO<sub>2</sub> dont la concentration moyenne le long de l'axe autoroutier passe d'environ 23 µg/m<sup>3</sup> à environ 15 µg/m<sup>3</sup> alors que la densité de trafic est augmentée d'environ 10 % sur les mêmes périodes (Figures 1 et 2). Il apparaît aussi que la répartition des zones « polluées » est comparable entre la période estivale avant la mise en place du feuillage et la campagne hivernale, même si les niveaux de concentration en NO<sub>2</sub> enregistrés en hiver sont globalement plus faibles.

L'autoroute A4 (23 000 à 25 000 véhicules par jour) est une source importante de NO<sub>2</sub> dans le domaine forestier de Saint-Avoid quelle que soit la période de l'année considérée, confirmant le fait que le trafic routier reste aujourd'hui encore la source



Figure 1.

Distribution moyenne des concentrations en NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) sur les forêts domaniales de Saint-Avold et de La Houve (Moselle, France) au printemps 2000 hors feuillaison (24 avril 2000-8 mai 2000). Les vents dominants proviennent du sud-sud-ouest. (Données : LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Carte : ONF. Reproduit avec autorisation).

NO<sub>2</sub> concentration distribution (µg/m<sup>3</sup>) over the domain forests of Saint-Avold and La Houve (Moselle, France) during spring 2000; trees without leaves (24 April 2000-8 May 2000). The dominant winds come from S-SW. (Data: LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Map: ONF. Reproduced with permission).

Figure 2.  
Distribution moyenne des concentrations en NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) sur les forêts domaniales de Saint-Avold et de La Houve (Moselle, France) au printemps 2000 avec feuillaison (8 mai 2000-22 mai 2000). Les vents dominants proviennent du sud-sud-ouest.  
(Données : LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Carte : ONF. Reproduit avec autorisation).



Figure 2.



Figure 3.

Distribution moyenne des concentrations en  $\text{NO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sur les forêts domaniales de Saint-Avold et de La Houve (Moselle, France) au cours de l'hiver 2001 (26 février 2001-26 mars 2001). Les vents dominants proviennent du sud-sud-ouest. (Données : LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Carte : ONF. Reproduit avec autorisation).

$\text{NO}_2$  concentration distribution ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) over the domain forests of Saint-Avold and La Houve (Moselle, France) during winter 2001 (26 February 2001-26 March 2001). The dominant winds come from S-SW. (Data: LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Map: ONF. Reproduced with permission).

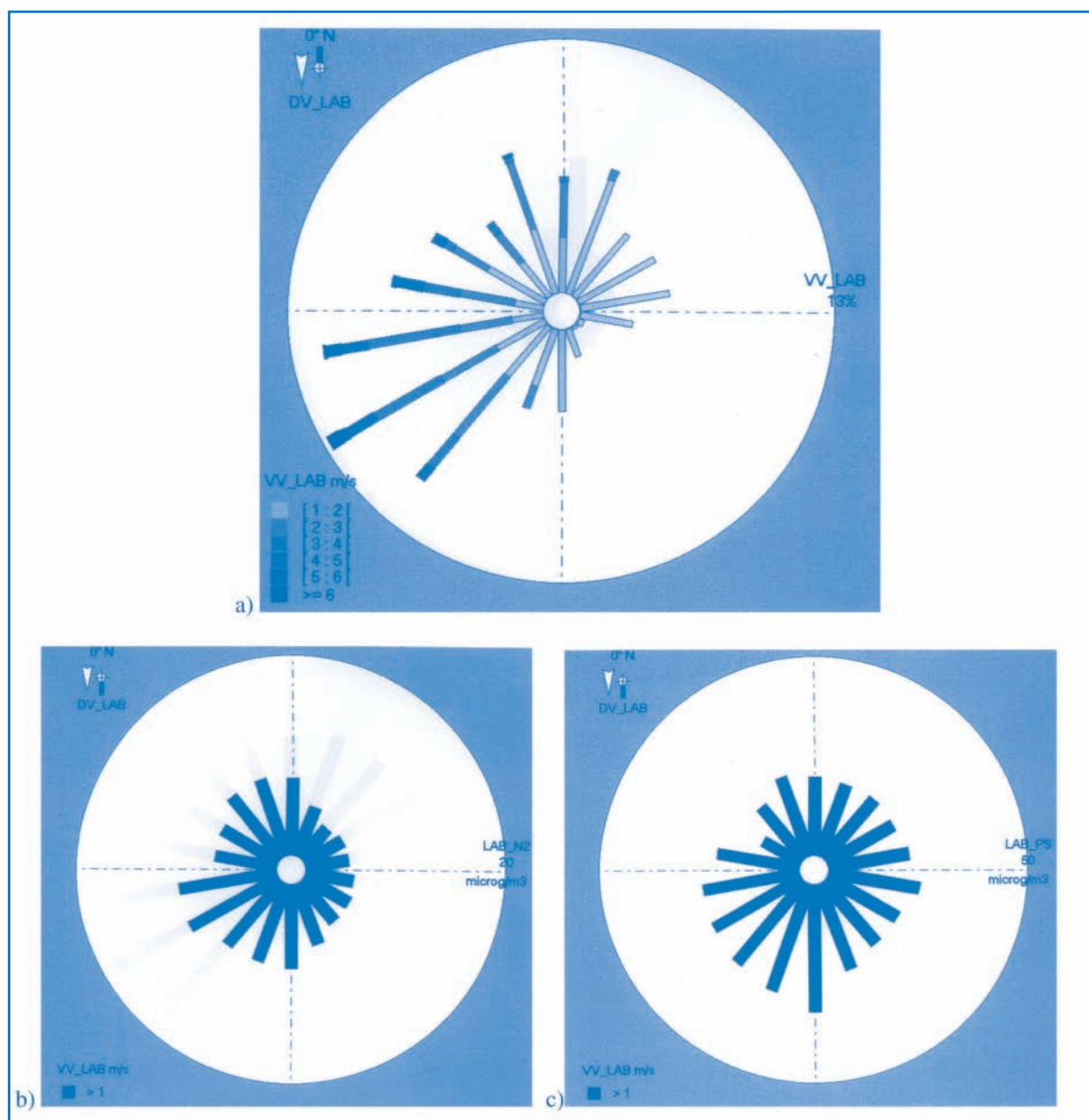


Figure 4.

a) Roses des vents, b) roses de pollution par le  $\text{NO}_2$  et c) par les particules, établies à Guertin pendant l'été 2000 par le camion-laboratoire du réseau ESPOL.

a) Wind rose, b)  $\text{NO}_2$  rose and c) coarse particles rose in Guertin during summer 2000 according to the data recorded by the laboratory truck of ESPOL.

principale de  $\text{NO}_2$  [16]. Les polluants émis migrent ensuite au sein de la forêt suivant la direction des vents dominants (Figures 1, 3 et 4). La nationale N33 n'a, quant à elle, aucune incidence notable sur la quantité de  $\text{NO}_2$  apportée dans le massif. Par ailleurs, le massif forestier de La Houve présente une concentration de  $\text{NO}_2$  faible pour l'ensemble des campagnes réalisées, avec une moyenne annuelle d'environ  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En ce qui concerne la centrale thermique Émile Huchet et la plate-forme pétrochimique de Carling, elles semblent être des sources d'apport de  $\text{NO}_2$  de moindre importance pour le domaine fores-

tier, comme le montre la répartition périphérique des sites à pollution moyenne autour de ces zones. De plus, la proximité des deux industries au regard des sites d'échantillonnage ne permet pas d'établir de ratio quant à la production de  $\text{NO}_2$ . Quant aux agglomérations situées à proximité du domaine forestier, seules les villes de Saint-Avoid et de Longeville-lès-Saint-Avoid sont situées dans le sens des vents dominants (Figure 4a). Cependant, leur influence directe paraît faible si on considère les parties sud de la forêt domaniale de Saint-Avoid qui font globalement apparaître des classes de pollution faible.



Figure 5.

Distribution moyenne des concentrations en particules sédimentables ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$ ) sur les forêts domaniales de Saint-Avold et de La Houve (Moselle, France) au cours de l'hiver 2001 (26 février 2001-26 mars 2001). Les vents dominants proviennent du sud-sud-ouest.

(Données : LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Carte : ONF. Reproduit avec autorisation).

Particles concentration distribution ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ ) over the domain forests of Saint-Avold and La Houve (Moselle, France) during winter 2001 (26 February 2001-26 March 2001). The dominant winds come from S-SW.

(Data: LIM – IUT de Thionville – Yutz, 2000 ; ESPOL, 2000. Map: ONF. Reproduced with permission).

## Évaluation de la pollution particulaire par la méthode des plaquettes de dépôt

### Validation des données

Pour chaque campagne, la moyenne des écarts relatifs est comprise entre 8 % et 9 %. La moyenne sur l'ensemble des campagnes est égale à 8,6 %, indiquant une bonne reproductibilité de la méthode.

### Évaluation de la pollution particulaire

Les résultats de la campagne de mesure hivernale sont présentés dans la figure 5. Les tests de Kosmogorov-Smirnov et Lilliefors font état d'une distribution des données ne suivant pas la loi Normale. Les données peuvent alors être réparties en trois sous-ensembles distincts, suivant chacun la loi Normale.

Aucune source de particules ne semble prédominante. Cependant, les zones de dépôt les plus élevées sont regroupées autour de l'autoroute A4 et des centres industriels (centrale thermique Émile Huchet et complexe pétrochimique de Carling) alors que la forêt de La Houve reste faiblement polluée. De plus, l'analyse des particules recueillies sur les zones de dépôt les plus élevées par l'INRA (Champenoux), fait apparaître la présence de billes d'aluminium insérées dans une matrice solide qui pourrait être constituée de scories, laissant supposer qu'un procédé de combustion en est la source (Figure 6). Il semble donc que l'autoroute et les centres industriels puissent être à l'origine d'une pollution particulaire constituée de grosses particules retombant à proximité, ce dépôt n'étant que peu accentué par les précipitations sur la période de mesure (moyenne : 4 mm d'eau, dont 7 jours > 10 mm d'eau).

Enfin, le massif forestier de La Houve est peu « pollué » par les particules sédimentables, avec une moyenne d'environ 0,7 mg/m<sup>2</sup>/j. La différence observée entre les deux massifs, confirme l'origine anthropique des dépôts de la forêt de Saint-Avold. Toutefois, il est difficile de déterminer avec précision l'origine ainsi que la contribution des différentes sources de pollutions sans une analyse spécifique des rejets générés par chaque source.

## Conclusion

Cette étude présente une évaluation de la pollution du domaine forestier de Saint-Avold au moyen d'échantillonneurs passifs (tubes passifs de Palmes) pour le NO<sub>2</sub> et de plaquettes de dépôt pour les poussières sédimentables. De plus, elle tente de mettre en évidence le caractère témoin de la forêt de La Houve.

L'ensemble des résultats obtenus montre tout d'abord que la diffusion des pollutions par le NO<sub>2</sub> et les particules peut être étudiée en milieu forestier par le biais de tubes passifs et de plaquettes de dépôt. Cependant, les campagnes de mesures doivent préférentiellement être réalisées hors feuillaison, le couvert végétal représentant à la fois un obstacle physique à la propagation des polluants et un piège à NO<sub>2</sub>. Quant à la pollution du site, elle reste faible par rapport aux zones urbaines malgré la présence de l'autoroute A4 qui génère localement des concentrations variant respectivement de 0 à plus de 60 µg/m<sup>3</sup> pour le NO<sub>2</sub> et de 0 à 10 mg/m<sup>2</sup>/j pour les particules sédimentables. Producteur majoritaire de NO<sub>2</sub>, le trafic autoroutier qui traverse la zone d'étude génère cependant peu de polluants azotés [16, 17]. En ce qui concerne les dépôts de poussières sédimentables,

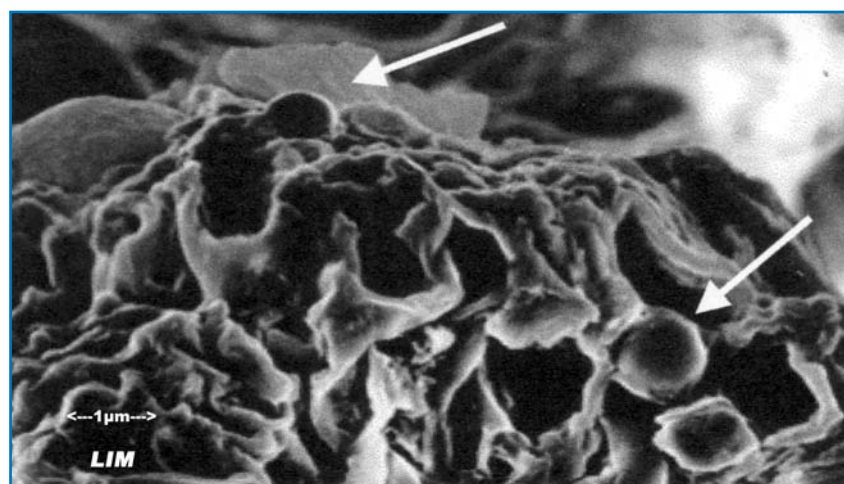


Figure 6.

Photographie d'une particule portant des billes d'aluminium (flèches blanches), recueillie à proximité de la centrale thermique Émile Huchet et du complexe pétrochimique de Carling, observée en microscopie électronique à balayage.

(Photo : LIM – IUT de Thionville – Yutz)

Image of coarse particle with aluminium balls included (white arrows), collected near the plant Émile Huchet observed by scanning electron microscopy.

(Photo: LIM – IUT de Thionville – Yutz)

aucune source (industrie, trafic routier ou forêt) ne paraît prépondérante, confirmant ainsi les données de Sambat (2002) qui font état, pour les  $PM_{10}$ , d'une répartition de production à 23,5 % pour les procédés de production, 20,5 % pour l'agriculture et la sylviculture et 19,9 % pour le trafic routier [18]. Cependant, les dépôts prélevés à proximité des sites industriels contiennent des billes d'aluminium enchâssées dans une matrice qui pourrait être constituée de scories. De même, l'étude de l'INRA de Champenoux portant sur les épines de résineux en forêt de Saint-Avoid, fait état de la présence d'aluminium piégé dans les structures végétales (données non présentées). La recherche systématique de billes d'aluminium dans les particules ainsi que leur comparaison (morphologique, chimique) avec des poussières captées dans les rejets issus des procédés de combustion du complexe industriel « Émile Huchet – plate-forme pétrochimique de Carling », pourraient fournir des indications plus précises quant à l'origine de la pollution particulaire de la forêt de Saint-Avoid. Il apparaît aussi que la forêt de La Houve est peu exposée au  $NO_2$  et aux poussières sédimentables, confirmant le fait que cette zone n'est sous le vent d'aucune source polluante importante.

L'ensemble de ces données conduit donc à la division du domaine forestier géré par l'ONF de Saint-Avoid en deux parties : la première, constituée par la forêt de Saint-Avoid est soumise à l'influence de

sources de pollutions locales (A4, site industriel) ; la seconde, constituée de la forêt de La Houve, peu soumise à l'influence polluante de ces mêmes sources pourrait donc servir de développement forestier « témoin ». Cette dichotomie semble aussi confirmée par les analyses préliminaires des aiguilles de conifères des placettes réalisées par l'INRA de Champenoux (données non présentées). De plus, l'approche dendrochronologique menée actuellement par ce même laboratoire, permettra de vérifier la pertinence de cette différence notamment vis-à-vis de l'occupation industrielle passée du site. Enfin, la comparaison des végétaux (phytosociologie, bio-indication...) composant les deux massifs forestiers, réalisée par le département Génie biologique de l'IUT de Thionville – Yutz, pourrait permettre l'identification d'indicateurs pertinents quant à l'état du domaine forestier et permettre ainsi une gestion adaptée [19].

### Remerciements

Cette étude a été conduite grâce au support financier de l'ONF de Saint-Avoid, au support technique de l'ONF de Saint-Avoid, de l'ESPOL, L'Hôpital, France, de l'INRA, Champenoux.

Nos remerciements vont aussi à Météo-France (Metz, 57) pour nous avoir fourni les données relatives aux précipitations, présentées dans ce document.

### Mots clés

Dioxyde d'azote,  $NO_2$ . Poussières sédimentables. Forêt. Tubes passifs.

### Keywords

Nitrogen dioxide,  $NO_2$ . Coarse particle. Forest. Passive sampling.

## Références

1. Chiron M, Quénel P, Zmirou D. La pollution d'origine automobile et la santé publique. *Pollution Atmosphérique* 1997 ; 153 : 41-55.
2. Arbaugh M, Bytnerowicz A, Grulke N, *et al.* Photochemical smog effects in mixed conifer forests along a natural gradient of ozone and nitrogen deposition in the San Bernardino Mountains. *Environment International* 2003 ; 29: 401-6.
3. Peiffer M. Variations de la croissance radiale du pin sylvestre au cours du xx<sup>e</sup> siècle en forêt de Saint-Avoid – Rôle possible de la pollution atmosphérique. Metz : Office National des Forêts 2000 : 35.
4. Garcia-Fouqué S, Plaisance H, Houdret J-L, Mathé F, Galloo J-C, Guillermo R. Performance des tubes à diffusion pour la mesure de l'ozone, du dioxyde d'azote et du dioxyde de soufre dans l'air ambiant. *Pollution Atmosphérique* 1999 ; 167 : 89-96.
5. Krupa S, Legge A. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants : an assessment from an ecological perspective. *Environmental Pollution* 2000 ; 107 : 31-45.
6. Palmes E, Gunnison A, Dimattio J, Tomczyk C. Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal* 1976 ; 37 : 570-7.
7. Fromage-Mariette A, Le Meur S. Groupe de travail français « Échantillonneurs passifs » de la Fédération ATMO. *Pollution Atmosphérique* ; Numéro spécial « Centre Commun de Recherche, Ispra » 2002 : 103-12.
8. Synthèse de l'expérience acquise par les réseaux sur l'échantillonnage passif du NO<sub>2</sub>. LCSQA – École des Mines de Douai 2000.
9. Protocole harmonisé des tubes NO<sub>2</sub>. GT Échantillonneurs passifs – Fédération ATMO – École des Mines de Douai 2000.
10. Atkins D, Sandalls J, Law D, Hough A, Stevenson K. The measurement of nitrogen dioxide in the outdoor environment using passive diffusion sampler. Oxford: Environment and Medical Sciences Division – Harwell Laboratory 1986.
11. Manuel de pose-ramassage. GT Échantillonneurs passifs, Fédération ATMO 2000.
12. Papazian-Meybeck M, Della Massa J-P. Étude de la distribution du dioxyde d'azote sur l'agglomération toulousaine par la méthode des échantillonneurs passifs. Été 1996-Hiver 1996-1997 – Évolution sur cinq ans : 1991-92 – 1996-97. *Pollution Atmosphérique* 1998 ; 160 : 120-34.
13. De Saeger E, Gerboles M, Payrissat M. La surveillance du dioxyde d'azote à Madrid au moyen d'échantillonneurs passifs. Commission of the European Communities 1991.
14. Delmas V. Contrôle du NO<sub>2</sub> dans la région de Basse-Seine. Commission of the European Communities; 1992.
15. Laval-Gilly P, Falla J, Morlot D. Impact de l'agglomération thionvilloise (Moselle, France) sur la qualité de l'air depuis 1998 : méthode des échantillonneurs passifs et relevés lichéniques. *Pollution Atmosphérique* 2001 ; 171 : 427-36.
16. Seigneur C, Cohen-Solal E. Modélisation des particules dans l'atmosphère. *Pollution Atmosphérique* 2002 ; 174 : 255-73.
17. Meybeck M, Della-Messa J-P, Simon V, Grasset E, Torres L. Étude de la distribution atmosphérique de composés organiques volatils aromatiques : benzène, toluène, xylènes (BTX) et du dioxyde d'azote sur l'agglomération toulousaine. *Pollution Atmosphérique* 2000 ; 168 : 569-82.
18. Sambat S. Inventaire national des émissions de particules et comparaison de résultats à ceux de quelques autres pays. *Pollution Atmosphérique* 2002 ; 176 : 447-62.
19. Falla J, Laval-Gilly P, Henryon M, Morlot D, Ferard J-F. Biological air quality monitoring : a review. *Environmental Monitoring and Assessment* 2000 ; 64 : 627-44.

