

# Le dispositif BRAMM : un outil de biosurveillance de la qualité de l'air

Sébastien LEBLOND<sup>(1)</sup>, Xavier LAFFRAY<sup>(2)</sup>,  
Laurence GALSOMIÈS<sup>(3)</sup>, Sandrine GOMBERT-COURVOISIER<sup>(4)</sup>

## Résumé

Le dispositif BRAMM (Biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses) est un dispositif français de surveillance de la qualité de l'air à partir des mousses terrestres. Il permet de cartographier, à l'échelle nationale (France métropolitaine), les niveaux de concentrations en contaminants (éléments métalliques et azote) accumulés dans des mousses prélevées en milieu rural et forestier. Il suit aussi les évolutions temporelles des dépôts grâce à des données d'observation longue durée (sur quinze ans). Quatre campagnes françaises ont été réalisées à ce jour (1996, 2000, 2006 et 2011 en cours), portant sur environ 500 sites de collecte répartis sur l'ensemble du territoire.

Le dispositif BRAMM est également la participation française à un programme européen de suivi des métaux dans les mousses (UNECE-LRTAP).

## Mots-clés

BRAMM. Biosurveillance. Mousses. Éléments métalliques. Azote.

## Abstract

The BRAMM network (*Biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses*) was established in France to monitor the air quality with terrestrial mosses. This network provides maps, on a national scale, of contaminant concentration levels (heavy metals and nitrogen) accumulated in mosses collected in rural and forest areas. It also follows the temporal trends of deposition with long-term monitoring data (over fifteen years). Four surveys in France were carried out (1996, 2000, 2006 and 2011 in progress), covering approximately 500 sampling sites located throughout the country.

The BRAMM network is also the French participation to a European moss biomonitoring network (UNECE-LRTAP). This European network was originally established in 1990 to estimate atmospheric heavy metal deposition at the European scale.

## Keywords

BRAMM. Biomonitoring. Mosses. Heavy metal. Nitrogen.

## Introduction

La surveillance de la qualité de l'air s'étend progressivement aux zones éloignées des villes et des centres urbanisés. Dans ces zones, plus rurales et forestières, la pollution de l'air, fréquemment qualifiée de pollution de fond, est généralement liée à la dispersion de polluants sur de plus larges échelles de temps et d'espace.

Parmi les polluants concernés, les éléments métalliques font l'objet d'une attention particulière en raison des risques qu'ils peuvent présenter pour la santé humaine et des dangers liés à leur rémanence dans les écosystèmes. Une fois émis dans l'air, ils peuvent être transportés sur de longues distances et se déposer loin des sources d'émissions.

Ces préoccupations ont conduit les pays signataires de la convention de Genève (1979) à s'engager, dans le cadre du protocole d'Aarhus (signé en 1998) à une réduction des émissions de certains métaux (cadmium, plomb et mercure) et à encourager la surveillance de leurs dépôts et des niveaux de contamination dans les différents compartiments de l'environnement.

La surveillance de la pollution de fond en éléments métalliques obéit à des contraintes spécifiques liées aux faibles niveaux de dépôts : les techniques physico-chimiques de mesure des dépôts sont parfois limitées par des seuils de détection analytique. L'utilisation d'organismes bio-accumulateurs servant de matrice pour le dosage des éléments métalliques permet de doser des concentrations plus importantes

1. Muséum national d'histoire naturelle, service du patrimoine naturel, département systématique et évolution, UMR 7205 (OSEB), 12 rue Buffon, 75005 Paris, [sleblond@mnhn.fr](mailto:sleblond@mnhn.fr)

2. Muséum national d'histoire naturelle, département systématique et évolution, UMR 7205 (OSEB), 12 rue Buffon, 75005 Paris, [laffray@mnhn.fr](mailto:laffray@mnhn.fr)

3. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, service évaluation de la qualité de l'air, 27 rue Louis Vicat, 75015 Paris, [laurence.galsomies@ademe.fr](mailto:laurence.galsomies@ademe.fr)

4. Institut EGID-Université Bordeaux 3, UMR ADES 5185, 1 allée Daguin, 33607 Pessac, [sandrine.gombert@egid.u-bordeaux3.fr](mailto:sandrine.gombert@egid.u-bordeaux3.fr)

et de s'affranchir de ces contraintes analytiques. Les mousses, comme d'autres végétaux tels les lichens, peuvent être utilisées en biosurveillance de l'air.

### Utilisation des mousses en biosurveillance

En l'absence de système racinaire, les mousses captent essentiellement leurs nutriments à partir des dépôts atmosphériques secs et humides, mais également, dans une moindre mesure, du substrat (cela peut représenter une source non négligeable pour certains composés). L'absorption des nutriments se fait par toute la surface de la plante. Cette capacité est favorisée par un ratio surface/volume important et par une faible résistance de surface qui est due au développement limité de la cuticule. De plus, les feuilles ne comportent souvent qu'une seule couche de cellules, ainsi les cellules des feuilles sont directement exposées aux éléments nutritifs. Les mousses vont efficacement capter les macro et oligo-éléments indispensables à leur croissance et simultanément capturer et retenir un grand nombre d'éléments et composés non essentiels.

En raison de cette efficacité de capture et de rétention des composés atmosphériques, les mousses sont couramment utilisées en biosurveillance de la qualité de l'air, notamment en tant que bio-accumulateurs, où les organismes utilisés servent de matrice pour le dosage des différents contaminants. La concentration d'un élément dans une mousse permet d'estimer le niveau d'exposition de la mousse vis-à-vis des contaminants atmosphériques mais ne fournit pas une mesure directe de la dynamique du dépôt atmosphérique. De nombreuses études ont montré la parfaite adéquation des mousses pour la cartographie des dépôts élémentaires aux échelles régionale, nationale et internationale, et la localisation des sources de métaux [1, 2]. Depuis le début des années 1980, de nombreux pays ont mis en place un réseau de surveillance des retombées atmosphériques métalliques par dosage de mousses terrestres.

La méthode de biosurveillance de la qualité de l'air par les mousses a été normalisée au niveau français [3] et est en cours de normalisation au niveau européen (CEN/TC 264/WG 31).

### BRAMM – objectifs et mises en œuvre

Le dispositif BRAMM (Biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses) permet de cartographier les niveaux de concentrations en contaminants (éléments métalliques et azote) accumulés dans des mousses prélevées en milieu rural et forestier sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Les deux principaux objectifs du dispositif BRAMM sont :

- d'obtenir une représentation des retombées atmosphériques en France, en milieu rural et forestier, à une échelle que les réseaux de mesures de la qualité de l'air existants au niveau national ou régional ne permettent pas d'assurer actuellement ;
- de suivre, sur le long terme, l'évolution des retombées atmosphériques, par comparaison avec les mesures réalisées lors des campagnes françaises antérieures.

Le dispositif BRAMM est mis en œuvre depuis la campagne 2000 par le Muséum national d'histoire naturelle. L'ADEME, qui a été à l'initiative de sa création en 1996, soutient jusqu'à présent son fonctionnement et son développement.

Quatre campagnes ont été réalisées à ce jour (1996, 2000, 2006 et 2011 en cours), portant sur environ 500 sites de collectes répartis sur l'ensemble du territoire dont 290 sites sont communs aux quatre campagnes [4, 5]. Le nombre et la répartition des sites ont évolué au cours des quatre campagnes successives afin d'optimiser leur distribution spatiale et de mieux renseigner l'ensemble des mailles européennes EMEP (50 km x 50 km) couvrant le territoire national. Les sites ont été choisis pour être représentatifs d'une pollution de fond, c'est-à-dire *a priori* non influencés par les sources locales de contamination. Dans une optique d'inter-comparaison des réseaux de surveillance, l'échantillonnage du dispositif BRAMM est autant que possible privilégié à proximité des stations de dispositifs préexistants, telles que les plateformes RENECOFOR (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers) gérées par l'Office national des forêts.



Figure 1.

Les trois principales espèces de mousses collectées (*Pseudoscleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme*, *Thuidium tamariscinum*).  
The three main species of collected mosses.



Figure 2.  
Prélèvement d'un échantillon de mousses.  
Taking of a sample of mosses.

Les échantillons de mousses sont prélevés au sol ou, occasionnellement, sur bois mort, dans une zone plane, en milieu forestier (sous couvert arboré), préférentiellement à plus de 3 mètres des troncs (afin de limiter l'influence du ruissellement des troncs). Un échantillon de mousses est constitué de 5 à 10 fragments de tapis de mousses, collectés sur une surface de 2 500 m<sup>2</sup> environ. Une fiche de relevé de terrain détaillée, sur laquelle sont consignées, entre autres, des données relatives à la localisation et à l'écologie du site de prélèvement, est renseignée pour chaque collecte.

En France, la diversité des milieux rend nécessaire l'échantillonnage de cinq espèces de mousses (par ordre de préférence du prélèvement) : *Pseudo-scleropodium purum* > *Hypnum cupressiforme* > *Thuidium tamariscinum* > *Pleurozium schreberi* > *Hylocomium splendens*. Les trois premières espèces listées représentent à elles seules 95 % des sites échantillonnés en 2011.

Les éléments métalliques sont dosés à l'état de traces. Toutes les précautions sont donc prises pour ne pas contaminer les échantillons de mousses, et ceci dès leur récolte (usage de gants), pendant leur transport, leur stockage (sachet plastique étanche) et durant toutes les manipulations ultérieures (salle blanche). Les échantillons de mousses collectés sur le terrain sont régulièrement envoyés par La Poste au laboratoire, où ils sont préparés, parallèlement à la phase de prélèvement. La préparation des échantillons consiste à les trier (élimination des débris de litière et des autres espèces de mousses présentes dans le prélèvement), les déshydrater et les broyer. Depuis 2006, l'analyse des échantillons de mousses est confiée à un ou plusieurs prestataires privés. Onze éléments métalliques sont suivis en routine depuis 1996 (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, V, Zn) auxquels ont été ajoutés l'azote (N) et l'antimoine (Sb) depuis 2006. Un programme d'assurance qualité accompagne chaque campagne de mesure (validité analytique, incertitude globale, comparaison inter-espèces...).

### BRAMM – Une information française sur les retombées atmosphériques métalliques et azotées

Pour s'assurer d'une interprétation fiable et pertinente des résultats mis à disposition par le dispositif BRAMM, il est utile de rappeler les éléments suivants.

D'une part, il n'existe pas de valeurs réglementaires auxquelles se référer pour juger si une valeur de concentration en un élément dans les mousses est excessive ou non. L'exploitation des données du dispositif BRAMM repose donc sur une méthode relative de comparaison des résultats entre eux : comparaison spatiale intersites ou temporelle sur un même site.

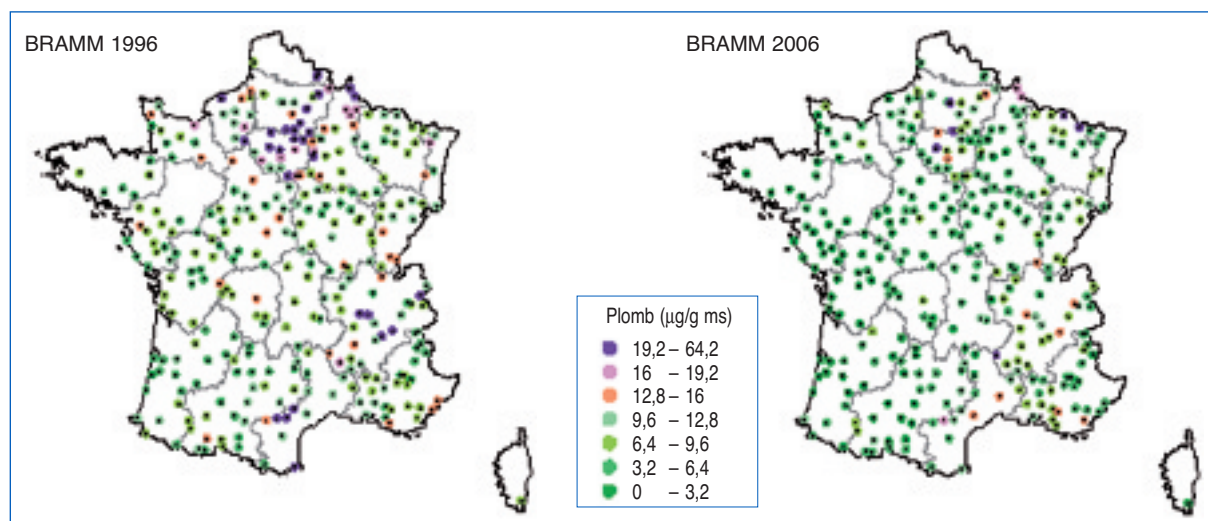


Figure 3.  
Cartes des teneurs en plomb dans les mousses collectées en 1996 et 2006 dans les 316 sites communs aux deux campagnes.  
Maps of lead contents in the collected mosses in 1996 and 2006 in the 316 sites common to both campaigns.



Le dispositif BRAMM permet d'estimer des niveaux de dépôts en éléments métalliques mais ne permet pas de quantifier le dépôt réel. Il ne se substitue donc pas aux autres réseaux qui utilisent des méthodes physico-chimiques pour mesurer les dépôts (MERA et RENECOFOR) mais apporte des informations complémentaires et spécifiques, notamment sur la biodisponibilité des contaminants.

D'autre part, les données du dispositif BRAMM ne préjugent en rien d'un niveau de toxicité pour la mousse ou pour un écosystème et encore moins pour l'homme. Toutefois, ces données peuvent servir à élaborer des cartes de dépôts et de charges critiques (métaux et azote), ce qui permet d'identifier les zones du territoire soumises à des excès de dépôts et les écosystèmes sensibles à ces excès. Elles peuvent aussi participer à l'évaluation des risques sanitaires et à l'aide à la décision dans les politiques relatives à la santé humaine, ne serait-ce qu'en permettant de déterminer des zones où la qualité de l'air est dégradée.

Le suivi temporel réalisé par le dispositif BRAMM permet de dresser des tendances d'évolution sur dix ans pour les dépôts métalliques en pollution de fond. Il contribue ainsi à guider les politiques mises en œuvre en matière de réduction des émissions dans le cadre de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance et d'en évaluer les efforts de réduction.

Parmi l'ensemble des éléments suivis, le plomb est l'élément montrant la diminution la plus significative entre 1996 et 2006 (test de Wilcoxon,  $p < 0,001$ ), sur l'ensemble du territoire (Figure 3). Cette diminution de la charge environnementale en plomb s'explique par la diminution des émissions en provenance des sources diffuses (suite à l'interdiction de l'essence plombée en France) et des sources fixes (incinérateurs et industries métallurgiques). Néanmoins, localement, la tendance d'évolution des concentrations en plomb dans les mousses peut être ponctuellement à la hausse.

## BRAMM

### Une implication dans un programme européen

C'est en Europe du Nord que les mousses ont été, pour la première fois, utilisées pour caractériser les dépôts atmosphériques. Dans les années 1980, les premières cartes nationales d'estimation des dépôts atmosphériques métalliques par l'analyse de mousses ont été établies par le Danemark et la Suède [6]. Le dosage des métaux dans les mousses a été par la suite étendu à d'autres pays d'Europe du Nord.

À l'initiative du *Nordic Council of Ministers*, un programme européen "Atmospheric heavy metal deposition in Europe – estimation based on moss analysis" est lancé en 1990. Ce programme réunit une vingtaine de pays environ à chacune des campagnes de biosurveillance organisées tous les cinq ans (1990/91, 1995/96, 2000/1) [7, 8, 9]. À partir de 2001, ce programme a été intégré aux activités de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique

transfrontière à longue distance de la commission économique pour l'Europe des Nations unies (UNECE-LRTAP), en particulier à son Programme international concerté sur les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes naturels et grandes cultures (PIC-Végétation) au sein du groupe de travail sur les effets. La campagne européenne de 2005/2006 a permis de collecter des échantillons de mousses sur 6 000 sites environ, répartis dans 28 pays européens [10]. La campagne 2010/2011 est actuellement en cours. Dix éléments métalliques, arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), fer (Fe), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), vanadium (V), zinc (Zn) sont suivis en routine depuis la campagne de 1990/1991, éléments auxquels se sont ajoutés ensuite l'aluminium (Al), l'antimoine (Sb) et l'azote (N). La France a participé aux quatre dernières campagnes européennes, en 1996, 2000, 2006 et 2011.

Le programme européen permet d'identifier les principales tendances spatiales et temporelles des dépôts métalliques à travers l'Europe [11] et de comparer les concentrations obtenues dans les mousses avec les dépôts atmosphériques modélisés par l'EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme/UNECE-LRTAP*) pour trois éléments : le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb) [12].

- **Répartition spatiale des concentrations dans les mousses.** Bien que variables en fonction des éléments, les plus faibles niveaux de fond sont généralement observés au nord de l'Europe (Scandinavie, pays Baltes et les régions septentrionales du Royaume-Uni) et les concentrations les plus élevées en Belgique et dans les pays du Sud-Est européen.

- **Évolutions temporelles des concentrations dans les mousses.** Depuis 1990, la concentration en métaux dans les mousses diminue de manière significative en Europe pour de nombreux éléments (As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, V et Zn), avec des exceptions tels que le chrome et le mercure. Cette diminution générale en Europe est donc une bonne indication de la réussite des stratégies de réduction en matière de pollution de l'air. En dépit de ces tendances générales, des variations divergentes (stagnations et augmentations des concentrations) sont observées régionalement.

- **Comparaison aux données modélisées de dépôts.** Pour le cadmium et le plomb, des corrélations modérées à fortes (test de Spearman,  $p < 0,001$ ) sont observées, avec des coefficients de corrélation variant de  $R = 0,65$  (Cd) à  $R = 0,73$  (Pb). Pour ces deux éléments, l'analyse statistique des données basée sur des arbres de régression (CART Tree) montre que les concentrations en cadmium et plomb dans les mousses sont principalement déterminées par les dépôts atmosphériques modélisés et les émissions de ces deux métaux. Pour le mercure, en revanche, les corrélations sont très faibles (test de Spearman,  $p < 0,001$ ,  $R = 0,17$ ). De plus amples investigations pour cet élément seraient nécessaires pour déterminer le meilleur indicateur entre le dépôt modélisé ou le dépôt estimé par les mousses.

## Conclusion

Le dispositif français BRAMM mis en place avec le soutien financier de l'ADEME fournit depuis plus de 15 ans des séries de données quinquennales, estimatives mais pertinentes, sur les niveaux de dépôts atmosphériques en éléments métalliques sur l'ensemble du territoire français. Il apporte des informations complémentaires aux données obtenues par les autres réseaux de suivi des contaminants atmosphériques en milieu rural (MERA, RENECO-

FOR). Le dispositif BRAMM met en lumière les zones les plus exposées en France à la contamination métallique par les dépôts atmosphériques. Il est aussi le seul dispositif à ce jour en France à pouvoir établir pour la première fois des tendances d'évolution pour les dépôts métalliques. Le dispositif BRAMM est ainsi devenu un outil efficace d'information et d'aide à la décision, permettant d'identifier des zones susceptibles d'être contaminées et pouvant présenter un risque potentiel pour la santé humaine ou celle des écosystèmes.

## Références

- [1] Onianwa P.C. Monitoring atmospheric metal pollution: a review of the use of mosses as indicators. *Environmental Monitoring and Assessment* 2001 ; 71(1) : 13-50.
- [2] Zechmeister H.G., Grodzinska K., Szarek-Lukaszewska G. "Bryophytes", dans Markert B.A., Breure A.M., and Zechmeister H.G. (dir.), *Bioindicators/Biomonitoring (Principles, Assessment, Concepts)*, Elsevier, Amsterdam 2003 ; 329-75.
- [3] Norme AFNOR NF X43-902 : Biosurveillance de l'air – Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide de mousses autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons, septembre 2008.
- [4] Galsomiès L., Savanne D., Letrouit M.A. *et al.* Retombées atmosphériques de métaux en France : estimation par dosage dans des mousses – Campagne 1996. ADEME Éditions, Paris 1997 : 187 p.
- [5] Gombert S., Galsomiès L., Rausch de Traubenberg C. *et al.* Pollution atmosphérique par les métaux – Biosurveillance des retombées. EDP Sciences/ADEME 2005 : 108 p.
- [6] Gydesen H., Pilegaard K., Rasmussen L., Rühling Å. Moss analyses used as a means of surveying the atmospheric heavy-metal deposition in Sweden, Denmark and Greenland in 1980. *National Swedish Environmental Protection Board* 1983 ; Bulletin 1670, 44 p.
- [7] Rühling Å. Atmospheric heavy metal deposition in Europe. Estimations based on moss analysis. *Nord* 1994 : 9. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark, 53 p.
- [8] Rühling Å., Steinnes E. Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995-1996. *Nord* 1998 : 15. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark, 66 p.
- [9] Buse A., Norris D., Harmens H. *et al.* Heavy metals in European mosses: 2000/2001 survey. Centre for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, UK 2003 : 45 p.
- [10] Harmens H., Norris D. and the participants of the moss survey. Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990-2005). Centre for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, UK, 2008 : 51 p.
- [11] Harmens H., Norris D.A., Steinnes E. *et al.* Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial and temporal trends in Europe. *Environmental Pollution* 2010 ; 158 : 3144-56.
- [12] Schröder W., Holy M., Pesch R. *et al.* Are cadmium, lead and mercury concentrations in mosses across Europe primarily determined by atmospheric deposition of these metals? *Journal of Soils and Sediments* 2010 ; 10 (8), 1572-84.



