

Jumelage des bio-indicateurs et d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air pour la détection de la pollution par le SO₂ dans la région de Annaba (Algérie)

Naila Maizi, Amel Alioua, Ali Tahar

Université de Annaba. Faculté des Sciences. Département de Biologie. Laboratoire de Biologie végétale et Environnement. BP 12. 23000 Annaba (Algérie). E-mail : maizi_naila@hotmail.com

Reçu le 2 aout 2010, accepté le 22 aout 2011.

La ville de Annaba est considérée comme étant l'une des villes les plus polluées en Algérie. D'une part, il y a l'existence d'un complexe sidérurgique, ISPAT, et d'un parc automobile très important par rapport aux distances parcourues, d'autre part certaines caractéristiques topographiques et climatiques créent un climat propice à la pollution. C'est dans ce contexte que nous avons orienté notre travail sur l'étude de la pollution par le SO₂ en utilisant d'une part les résultats enregistrés par les capteurs physico-chimiques au niveau des stations du réseau de surveillance et de contrôle de la qualité de l'air dans la région de Annaba baptisé « Sama Safia » et d'autre part, les résultats obtenus par les bio-indicateurs *Xanthoria parietina* et *Funaria hygrometrica*. Une stratégie d'échantillonnage pertinente, un suivi spatio-temporel et la mesure de certains paramètres physiologiques (chlorophylle, proline, respiration) combinés par le dosage de SO₂ ont été effectués. Le jumelage des deux résultats, c'est-à-dire des capteurs physico-chimiques et de bio-accumulateurs, a montré des corrélations qui varient de significatives à très hautement significatives non seulement entre les paramètres mesurés et le dosage de SO₂, mais également entre les bio-indicateurs et les capteurs physico-chimiques, par ailleurs la sensibilité et le pouvoir accumulateur de ces deux bio-indicateurs nous ont permis une meilleure caractérisation de la pollution de l'air dans cette région.

Mots-clés. Pollution atmosphérique, SO₂, lichen, mousse, indicateur biologique, bio-accumulateur, capteurs physico-chimiques, Algérie.

Twinning of bio-indicators and a monitoring network of air quality for the detection of SO₂ pollution in the area of Annaba (Algeria). The city of Annaba is regarded as one of the most polluted cities in Algeria. On one hand, there is the existence of an iron and steel complex, ISPAT, and a very important fleet in relation to distance travelled, on the other hand, this region shares certain topographical features and creates a climate conducive to the development of pollution. In this context, we focused our work on the study of SO₂ pollution by using the results recorded by physico-chemical sensors at the level of network monitoring and control of air quality stations in the region of Annaba, baptized "Sama Safia" and the results of bio-indicators *Xanthoria parietina* and *Funaria hygrometrica*. A relevant strategy of sampling, a follow-up space-time and the measurement of certain physiological parameters (chlorophyl, proline, breathing) combined with the proportioning of SO₂ were done. The twinning of the two results (physico-chemical sensors and bio-accumulators) showed correlations ranging from significant to highly significant not only between the parameters measured and determination of SO₂ but also between bio-indicators and physico-chemical sensors, also the sensitivity and battery power of these two bio-indicators have allowed a better characterization of air pollution in this area.

Keywords. Air pollution, SO₂, lichens, mosses, biological indicators, bio-accumulator, physico-chemical sensors, Algeria.

1. INTRODUCTION

La pollution de l'air est un problème sérieux pour les grandes populations et les régions industrialisées dans le monde. En Algérie, les problèmes de pollution accumulés au fil des décennies passées sont à l'image de ces grandes villes dont le développement industriel, la circulation automobile et les déchets ménagers

asphyxient leur environnement. Parmi les villes les plus polluées, on peut citer Annaba, Ghazaouet, Chlef, Mostaganem, etc. et la liste des victimes de l'industrialisation reste bien longue (Semadi, 1989).

Parallèlement à cela, des réseaux de surveillance de la qualité de l'air ont été implantés dans plusieurs villes industrialisées notamment Alger, Oran, Annaba et Skikda.

Dans la région de Annaba, cette surveillance est assurée depuis 2002 par le réseau de surveillance Sama Safia qui mesure les concentrations des principaux polluants atmosphériques. Ces méthodes d'analyse physico-chimique très précises permettent de mesurer l'étendue et l'importance d'une contamination de l'environnement. Cependant, elles sont très onéreuses et ne permettent pas de quantifier simultanément tous les contaminants présents dans un échantillon, ni d'évaluer les effets de la présence des polluants sur les organismes vivants ou sur l'état de santé d'un écosystème.

Depuis les années 1970, de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation des végétaux et plus particulièrement les lichens et les mousses dans le domaine de la localisation des pollutions atmosphériques (domaine de la bio-indication) (Gilbert, 1970 ; Hawksworth et al., 1970 ; James, 1973 ; Deruelle, 1983 ; Deruelle, 1984 ; Belandria et al., 1987 ; Semadi, 1989 ; Deruelle, 1992 ; Deruelle et al., 1993 ; Seaward, 1993 ; Alioua, 1995 ; Alioua, 2001) notamment dues au dioxyde de soufre (LeBlanc et al., 1966 ; Gilbert, 1970 ; Johnsen, 1986 ; Hutchinson et al., 1987 ; Heibel et al., 1999 ; Häffner et al., 2001 ; Hauck et al., 2008).

Les différentes composantes de l'environnement réagissent à la pollution différemment, les végétaux inférieurs présentent souvent des altérations physiologiques, morphologiques et structurales, avant même l'apparition des moindres symptômes d'intoxication chez l'homme (Semadi, 1989). En effet, les espèces les plus sensibles à la pollution telles que les lichens et les mousses *in situ* peuvent disparaître ; par contre, les transplants ramenés d'une zone lointaine non polluée peuvent constituer de vrais bio-accumulateurs.

L'objectif de cette étude est de mieux caractériser la pollution par le SO₂ dans la région par l'association des techniques physico-chimiques et biologiques, mais également d'évaluer l'impact de cette dernière sur des organismes vivants.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Il est aisé de constater dans la région de Annaba que nous avons un véritable problème de pollution, ce dernier étant aggravé par sa position géographique (en cuvette), facteur qui favorise l'accumulation des polluants atmosphériques et expose par conséquent les habitants à un grand danger.

Les principales sources émettrices de polluants sont :

- le complexe sidérurgique ISPAT (4 100 t par an d'oxydes de soufre) (DMI, 2004)
- le trafic routier qui évolue à un rythme très accéléré (en 2003, le parc automobile de la wilaya de Annaba était réparti comme suit : 61,73 % des véhicules à Annaba ville, 16,26 % à Sidi Amar et 12 % à El Bouni avec 71,13 % de véhicules anciens, c'est-à-dire âgés de 11 ans et plus, tandis que les véhicules neufs ne représentent que 17,74 % du parc global.

2.1. Présentation de la zone d'étude

La ville de Annaba est située à l'Est de l'Algérie, entre les latitudes 36 °30' Nord et 37 °30' Nord, et les longitudes 07 °20' Est et 08°40' Est, avec 12 communes d'une superficie totale de 1 411,98 km². Elle est limitée par la mer Méditerranée au Nord, la wilaya de Skikda à l'Ouest, celle de Guelma au Sud et El-Tarf à l'Est (**Figure 1**).

C'est la capitale industrielle de l'Est de l'Algérie, elle est soumise depuis longtemps à divers types de polluants qui n'épargnent ni les hommes, ni les animaux et encore moins les végétaux (Semadi, 1989 ; Alioua, 1995 ; Alioua, 2001 ; Alioua et al., 2008). Parmi les divers polluants rejetés régulièrement dans l'atmosphère, le SO₂ occupe une place prépondérante, sa toxicité s'aggrave de plus en plus à travers la chaîne trophique. Les activités humaines représentent la principale source de cette pollution, les plus

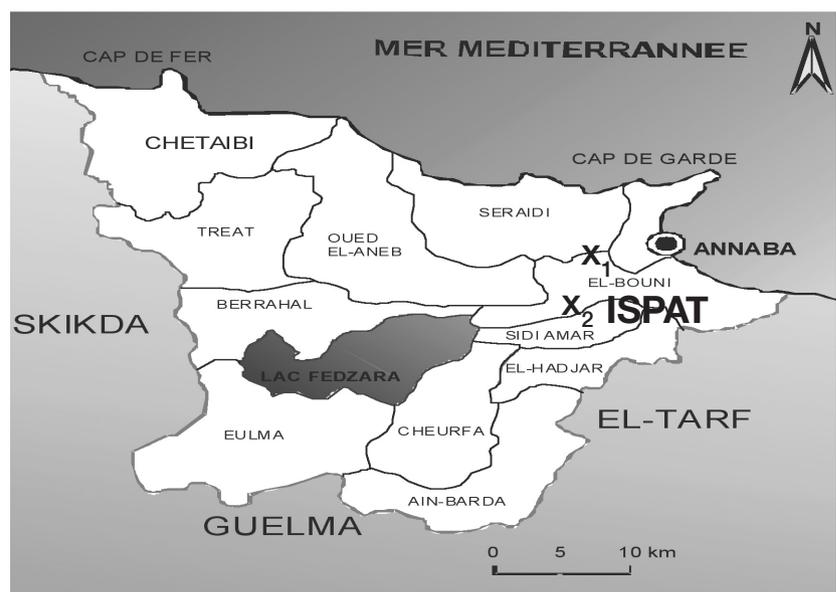


Figure 1. Localisation géographique de la région d'étude (Annaba) — *Geographical location of the study area (Annaba)*. Source : Office National de Météorologie Les Salines, Annaba.

X : Sites de mesure de la pollution — *Sites for the measure of pollution*.

importantes étant la production d'énergie électrique, l'industrie et l'automobile.

La pollution soufrée est surtout préoccupante pendant l'hiver à cause de l'utilisation des chauffages et des situations d'inversion de température. Dans notre étude, la pollution au niveau de l'agglomération de Sidi Amar et celle d'El-Bouni est de type industriel, la source principale est le complexe sidérurgique ISPAT.

2.2. Les paramètres climatiques

Une analyse climatique est effectuée dans notre étude, notamment certains paramètres dont le rôle est particulièrement important dans la diffusion et la dilution des impuretés.

La ville de Annaba présente dans son ensemble les traits d'un climat de type méditerranéen avec des étages bioclimatiques sub-humide et humide, caractérisé par des températures douces en hiver, chaudes en été et des précipitations abondantes. La rose des vents nous a permis de mettre en évidence une direction dominante du vent du nord-est vers le sud-ouest (**Figure 2**).

2.3. Approches de bio-indication

Deux approches de bio-indication ont été utilisées, notre étude a concerné une espèce lichénique et une espèce muscicole.

Pour les lichens, notre choix s'est porté sur une espèce foliacée, nitrophile à couleur luxuriante, se développant sur différents phorophytes, notamment sur *Ceratonia siliqua*, il s'agit de *Xanthoria parietina*. Pour l'espèce muscicole, nous avons choisi une espèce terricole, la funaie *Funaria hygrometrica*.

On a choisi ces deux espèces d'une part, à cause de leurs grandes sensibilités aux polluants atmosphériques (la présence de certaines espèces lichéniques particulièrement toxitolérantes nous permet d'évaluer

le taux de pollution dans la zone considérée ; de même, l'étude du dynamisme de ces espèces permet d'estimer la progression ou au contraire la régression de la pollution dans certains secteurs) (Semadi, 1989) et d'autre part, à cause de l'importance de leur biomasse.

2.4. Choix des sites d'échantillonnage et de transplantation

Nous avons transplanté les lichens et les mousses au niveau des deux sites où sont implantées les stations de mesure du réseau de contrôle Sama Safia les plus proches du complexe sidérurgique, à savoir :

- station de type forte pollution (El-Bouni) (Site 1),
- station de type forte pollution (Sidi Amar) (Site 2).

2.5. Transplantation et prélèvement des échantillons

Nous avons prélevé des branches recouvertes de thalles de *Xanthoria parietina* dans leur milieu d'origine, El Kala, situé à l'Est de Annaba (Parc national), ce site est situé en dehors des zones polluées, et nous les avons transférées au niveau des deux sites de transplantations choisis (Semadi et al., 1993). Pour les mousses, nous avons prélevé des thalles avec leur substrat (le sol) et les avons transférés vers un autre endroit au niveau du sol, dans les mêmes sites de transplantation des lichens. La transplantation a eu lieu le même jour, le 15 janvier, au niveau des deux sites pour les deux bio-indicateurs.

À chaque prélèvement pour les dosages, on a détaché une partie des thalles des lichens de leur support végétal, tandis que pour les mousses, nous avons arraché les thalles du sol à l'aide d'une pince. L'étude a duré six mois, à raison d'un prélèvement par mois, et le traitement des échantillons est effectué le même jour ou le lendemain de leur prélèvement.

Les témoins sont les mêmes espèces de lichens et de mousse laissées dans le milieu d'origine.

2.6. Dosages effectués

Le soufre minéral et organique de l'échantillon est oxydé en sulfate au cours de la minéralisation par voie sèche en présence de Mg(NO₃)₂. Le dosage du soufre total s'effectue par turbidimétrie après formation de sulfate de baryum sur un colorimètre à flux continu à la longueur d'onde de 420 nm. Le dosage du SO₂ est déterminé par turbidimétrie (Cirad, 2004).

Pour le dosage de la chlorophylle, nous avons utilisé la méthode proposée par LeBlanc et al. (1966), l'appareil utilisé est le spectrophotomètre à deux longueurs d'ondes, 645 nm et 663 nm.

La méthode utilisée pour le dosage de la proline est celle de Troll et Lindsley (1955) simplifiée, mise au

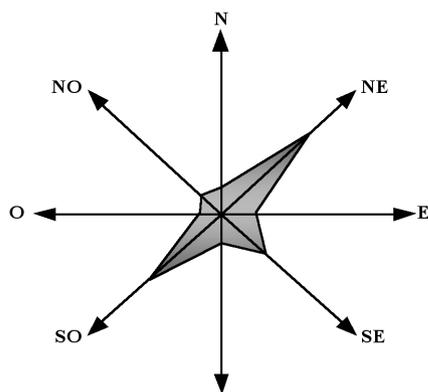


Figure 2. La rose des vents de Annaba établie sur une moyenne de 10 ans (1995-2004) — *The wind rose from Annaba established on an average of 10 years (1995-2004).*

point par Dreier et Göring (1974). L'appareil utilisé est le spectrophotomètre à la longueur d'onde 528 nm.

Enfin, la mesure de l'activité respiratoire est effectuée le lendemain de chaque prélèvement par la polarographie à l'aide d'une électrode de Clark à oxygène (Hansatech).

2.7. Analyse statistique des données

Nous avons utilisé le test d'analyse de la variance à deux critères de classification pour comparer chaque caractéristique entre les deux sites, d'une part et entre les six mois d'expérimentation, d'autre part (Dagnelie, 1999) et des matrices de corrélations pour mettre en évidence quelques relations linéaires entre les caractéristiques mesurées chez le bio-indicateur.

3. RÉSULTATS

3.1. Résultats enregistrés par les capteurs physico-chimiques de Sama Safia

La **figure 3** montre que les teneurs en SO_2 enregistrées au niveau du Site 1 sont plus élevées que celles du Site 2, avec une valeur maximale au niveau du Site 1 pour le mois d'août et une valeur minimale au niveau du Site 2 aux mois de juin et juillet. Ces taux élevés de SO_2 au niveau du Site 2 sont probablement dus aux rejets du complexe sidérurgique ISPAT, tandis que d'autres facteurs interfèrent et sont à l'origine des teneurs élevées au niveau du Site 1. On remarque que pour les deux sites, la valeur la plus élevée se situe au mois d'août. L'analyse de la variance à deux critères de classification montre que l'accumulation de SO_2 dans l'espace est significative ($p = 0,023^*$), mais elle ne l'est pas dans le temps ($p = 0,105$).

3.2. Résultats des dosages effectués chez les bio-indicateurs

Chez *Xanthoria parietina*.

Le SO_2 . L'analyse de la **figure 4** fait apparaître clairement que les mois de juillet et août présentent des valeurs maximales au niveau du Site 2 (Sidi Amar). Il est certain que les rejets de la chaufferie industrielle du complexe sidérurgique d'El-Hadjar et les émissions d'origine automobile sont les principales causes de cette situation.

La comparaison de la concentration moyenne de SO_2 chez *X. parietina* montre que cette corrélation est très hautement significative dans l'espace ($p = 0,000^{***}$) et dans le temps ($p = 0,000^{***}$).

La chlorophylle. La **figure 5** montre que la chlorophylle (a+b) chez *X. parietina* présente aussi des fluctuations en fonction du temps d'exposition.

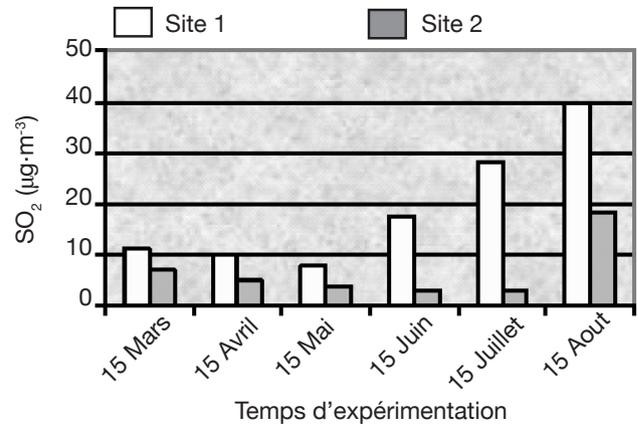


Figure 3. Variation spatio-temporelle de la teneur en SO_2 enregistrée par les deux capteurs des sites de Sama Safia — Spatio-temporal variation of the SO_2 content recorded by the two sensors of the sites in Sama Safia.

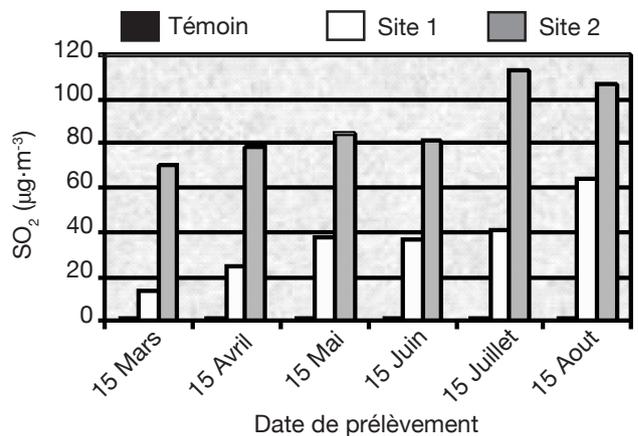


Figure 4. Variation spatio-temporelle de la teneur en SO_2 accumulée par *Xanthoria parietina* — Spatio-temporal variation of the SO_2 content accumulated by *Xanthoria parietina*.

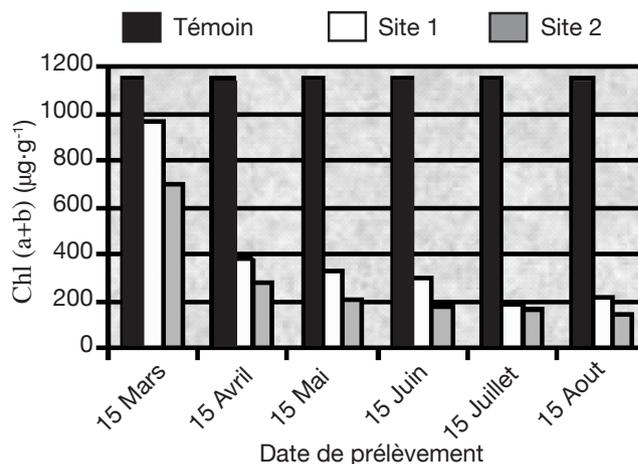


Figure 5. Variation spatio-temporelle de la chlorophylle (a+b) chez *Xanthoria parietina* — Spatio-temporal variation of the chlorophyll (a+b) by *Xanthoria parietina*.

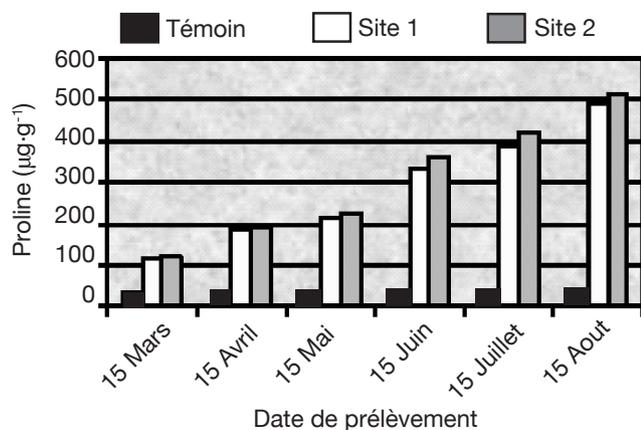


Figure 6. Variation spatio-temporelle de la teneur en proline chez *Xanthoria parietina* — Spatio-temporal variation of the proline content by *Xanthoria parietina*.

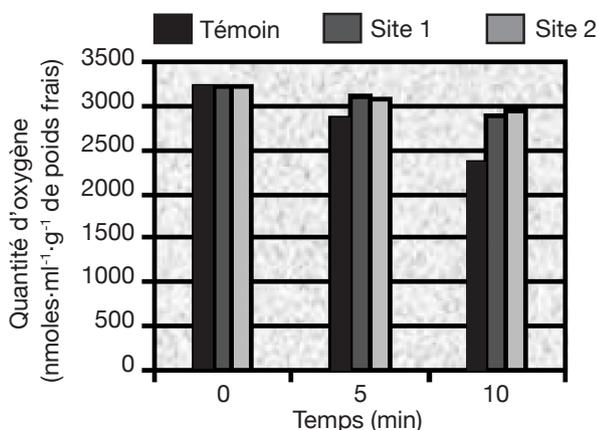


Figure 7. Variation spatio-temporelle de la respiration chez *Xanthoria parietina* — Spatio-temporal variation of the respiration by *Xanthoria parietina*.

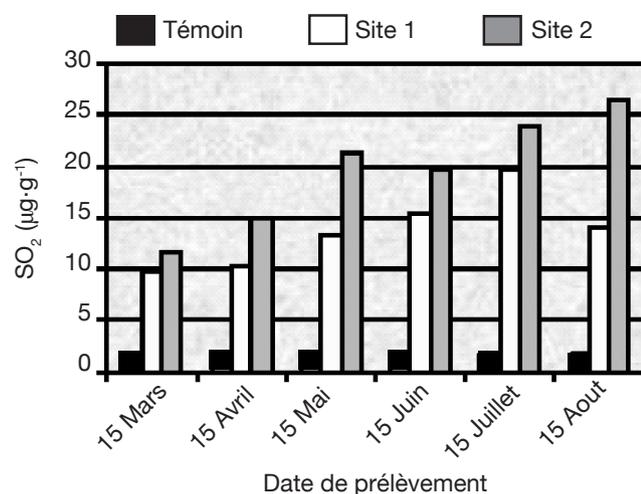


Figure 8. Variation spatio-temporelle de la teneur en SO₂ accumulée par *Funaria hygrometrica* — Spatio-temporal variation of the SO₂ content accumulated by *Funaria hygrometrica*.

La comparaison de la teneur moyenne de la chlorophylle (a+b) chez les transplants de *X. parietina* montre que la variation de la chlorophylle (a+b) est très hautement significative aussi bien dans le temps (0,000***) que dans l'espace (0,000***), cela veut dire que les teneurs en chlorophylle (a+b) varient en fonction du temps d'exposition des transplants à la pollution.

La proline. D'après les résultats illustrés dans la **figure 6**, nous observons que le taux de la proline augmente dès le premier prélèvement par rapport au témoin, cette augmentation persiste jusqu'au sixième prélèvement, ceci est probablement dû au stress des bio-indicateurs provoqué par l'accumulation des polluants.

Quant à la comparaison de la variation de la teneur moyenne en proline chez *X. parietina*, elle montre que cette dernière est très hautement significative dans le temps (0,001***), mais qu'elle est seulement significative dans l'espace (0,017*).

La respiration. D'après la **figure 7**, on constate que la respiration se fait normalement pour le témoin de *X. parietina*, d'où une diminution de la quantité d'O₂ dans le milieu.

Par contre, en ce qui concerne la respiration des transplants au niveau des deux sites, on remarque qu'elle est presque inhibée, c'est-à-dire qu'il y a une légère consommation d'O₂.

La comparaison de la variation moyenne de la quantité d'oxygène consommée par *X. parietina* montre que cette variation est très hautement significative dans l'espace (0,001***) et qu'elle est hautement significative dans le temps (0,007**).

Chez *Funaria hygrometrica*.

Le SO₂. Durant la période estivale (mai à aout), nous relevons que les concentrations importantes de SO₂ se localisent au niveau des deux sites avec une concentration maximale au mois d'aout au site 2, mais qui reste toujours moins importante que celle accumulée par les lichens (**Figure 8**).

La comparaison de la teneur moyenne de SO₂ chez *F. hygrometrica* montre que la variation spatio-temporelle de cette accumulation est très hautement significative (p = 0,000***).

La chlorophylle. Les données de la **figure 9** montrent que les valeurs de la chlorophylle (a+b) chez *F. hygrometrica* présentent des fluctuations. Nous constatons une diminution considérable à partir du mois de mars au niveau des deux sites étudiés, par rapport au témoin.

La comparaison de la teneur moyenne de la chlorophylle (a+b) chez les transplants de

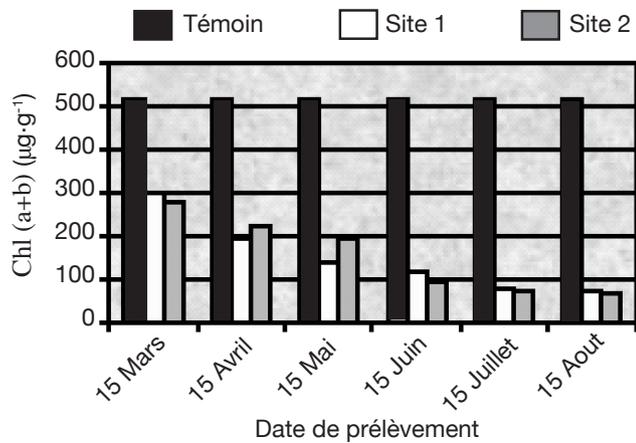


Figure 9. Variation spatio-temporelle de la chlorophylle (a+b) chez *Funaria hygrometrica* — Spatio-temporal variation of the chlorophyll (a+b) by *Funaria hygrometrica*.

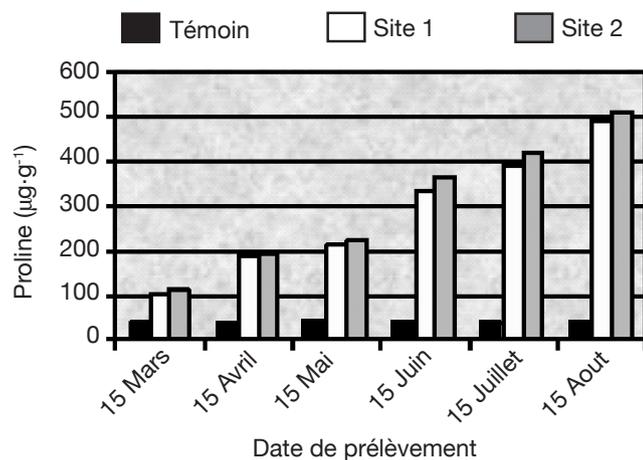


Figure 10. Variation spatio-temporelle de la teneur en proline chez *Funaria hygrometrica* — Spatio-temporal variation of the proline content by *Funaria hygrometrica*.

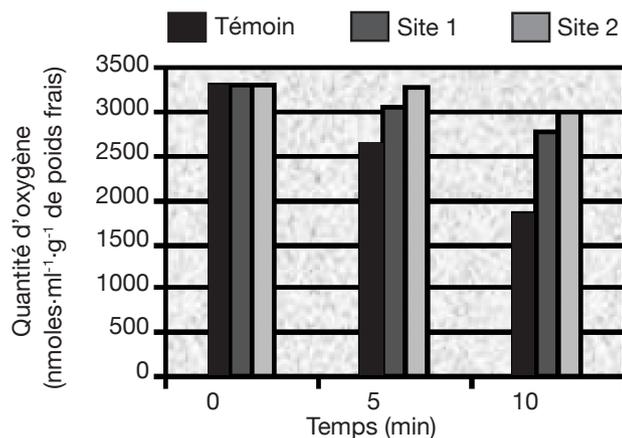


Figure 11. Variation spatio-temporelle de la respiration chez *Funaria hygrometrica* — Spatio-temporal variation of the respiration by *Funaria hygrometrica*.

F. hygrometrica montre que la variation de la chlorophylle (a+b) est très hautement significative, que ce soit pour le temps d'exposition (0,000***) ou pour les sites de prélèvement (0,000***) .

La proline. D'après la **figure 10**, on constate que la teneur en proline chez *F. hygrometrica* suit la même tendance que celle des lichens, puisqu'on remarque une augmentation de cette teneur en fonction du temps d'exposition.

Également, l'analyse de la variance à deux critères de classification relative à la teneur moyenne en proline chez *F. hygrometrica* montre que cette variation est très hautement significative dans l'espace (0,000***) et dans le temps (0,000***) .

La respiration. D'après la **figure 11**, on remarque que la respiration chez *F. hygrometrica* semble plus atteinte que chez les lichens. Pour le témoin des mousses, la respiration se fait normalement, alors qu'elle est inhibée chez les échantillons transplantés dans les autres sites.

L'analyse de la variance à deux critères de classifications relative à la variation moyenne de la respiration montre une corrélation très hautement significative dans le temps (0,001***) , tandis qu'elle est seulement hautement significative dans l'espace (0,007**), c'est-à-dire que plus les mousses sont exposées à la pollution, plus leur processus respiratoire est perturbé.

Matrices de corrélation entre les caractéristiques pour Xanthoria parietina (Tableau 1). Au niveau du Site 1 (El-Bouni), la chlorophylle (a+b) présente des corrélations significatives avec la proline et l'activité respiratoire, de même pour le SO₂ qui présente aussi des corrélations significatives avec la chlorophylle (a+b) et la proline.

Concernant le Site 2 (Sidi Amar), la corrélation de la proline est hautement significative avec la chlorophylle (a+b). Quant à la consommation en oxygène, sa corrélation avec la proline est hautement significative et seulement significative avec la chlorophylle (a+b).

L'accumulation en SO₂ présente des corrélations très hautement significatives avec la respiration, ceci a été prouvé par Eversmann (1978), Nash et al. (1995) et Häffner et al. (2001) qui ont montré une baisse plus ou moins dramatique dans le taux de la respiration des lichens *Parmelia* sp. et *Usnea* sp. exposés à une pollution par le SO₂, tandis qu'avec la chlorophylle (a+b) et la teneur en proline, les corrélations sont hautement significatives.

Matrices de corrélation entre les caractéristiques pour Funaria hygrometrica. D'après le **tableau 2**, on constate qu'il y a une corrélation significative entre

Tableau 1. Matrice de corrélations entre les caractéristiques mesurées chez le bio-indicateur *Xanthoria parietina* pour le Site 1 (El-Bouni) et le Site 2 (Sidi Amar) — *Matrix correlations between the characteristics measured in the bio-indicator Xanthoria parietina for the Site 1 (El-Bouni) and the Site 2 (Sidi Amar).*

Site 1					Site 2				
Variables	Chl(a+b)	Proline	Resp	SO ₂	Variables	Chl(a+b)	Proline	Resp	SO ₂
Chl(a+b)	1				Chl(a+b)	1			
Proline	-0,893 * (0,041)	1			Proline	-0,965 ** (0,008)	1		
Resp	-0,922 * (0,026)	0,757 (0,139)	1		Resp	-0,952 * (0,013)	0,965 ** (0,008)	1	
SO₂	-0,891 * (0,042)	0,919 * (0,027)	0,808 (0,098)	1	SO₂	-0,980 ** (0,003)	0,965 ** (0,008)	0,994*** (0,001)	1

Les valeurs entre parenthèses sont celles de la probabilité *p* — *The values between brackets represent the probability p* ; * : corrélation significative — *significant correlation* ; ** : corrélation hautement significative — *very significant correlation* ; *** : corrélation très hautement significative — *highly significant correlation*.

Tableau 2. Matrice de corrélations entre les caractéristiques mesurées chez le bio-indicateur *Funaria hygrometrica* pour le Site 1 (El-Bouni) et le Site 2 (Sidi Amar) — *Matrix correlations between the characteristics measured in the bio-indicator Funaria hygrometrica for the Site 1 (El-Bouni) and the Site 2 (Sidi Amar).*

Site 1					Site 2				
Variables	Chl(a+b)	Proline	Resp	SO ₂	Variables	Chl(a+b)	Proline	Resp	SO ₂
Chl(a+b)	1				Chl(a+b)	1			
Proline	-0,628 *(0,257)	1			Proline	-0,759 (0,137)	1		
Resp	-0,295 (0,630)	0,888 * (0,044)	1		Resp	-0,655 (0,230)	0,894 * (0,041)	1	
SO₂	-0,796 (0,107)	0,522 (0,367)	0,443 (0,445)	1	SO₂	-0,915 * (0,029)	0,931 * (0,022)	0,913 * (0,030)	1

Les valeurs entre parenthèses sont celles de la probabilité *p* — *The values between brackets represent the probability p* ; * : corrélation significative — *significant correlation*.

la proline et la chlorophylle (a+b). Concernant la corrélation entre la respiration et la proline, elle s'avère significative. Enfin, il n'existe aucune corrélation entre le SO₂ et les autres paramètres.

Pour le Site 2 (Sidi Amar), l'activité respiratoire ne présente qu'une corrélation significative avec la proline. Tandis que pour le SO₂, il existe des corrélations significatives avec la chlorophylle (a+b), la proline et la respiration. Pour cette dernière, Häffner et al. (2001) ont démontré une baisse de la respiration d'une mousse sous l'effet d'une pollution par le SO₂.

Matrices de corrélation entre les concentrations de SO₂ des trois capteurs (stations/bio-indicateurs). D'après les **tableaux 3** et **4**, on remarque que la corrélation entre les teneurs en SO₂ chez *X. parietina* et celles accumulées par *F. hygrometrica* est non significative pour les deux sites.

Quant à la corrélation entre les taux de SO₂ enregistrés par les capteurs physico-chimiques et

ceux obtenus par *X. parietina*, on constate qu'elle est significative pour le Site 1 et hautement significative pour le Site 2.

4. DISCUSSION

La pollution par le SO₂ est surtout préoccupante pendant l'hiver à cause de l'utilisation des chauffages et des situations d'inversion de température. Cependant, la part du trafic automobile par l'intermédiaire des véhicules diesel augmente constamment.

Les émissions de SO₂ sont surtout le fait des sources fixes (industrielles ou domestiques), ce qui est très clairement représenté par nos résultats dans lesquels le taux de SO₂ est plus important au niveau du Site 2, c'est-à-dire l'agglomération de Sidi Amar par rapport au Site 1 de El-Bouni.

Les effets du SO₂ sur les plantes dépendent de sa concentration, du temps d'exposition, de l'humidité

Tableau 3. Matrice de corrélations entre les concentrations de SO₂ chez les deux bio-indicateurs (*Xanthoria parietina* et *Funaria hygrometrica*) et les capteurs physico-chimiques pour le Site 1 (El-Bouni) — *Matrix correlations between the concentrations of SO₂ in Xanthoria parietina and Funaria hygrometrica and physico-chemical sensors for the Site 1 (El-Bouni).*

Variables	SO ₂ <i>Xanthoria</i>	SO ₂ <i>Funaria</i>	SO ₂ Site 1
SO ₂ <i>Xanthoria</i>	1		
SO ₂ <i>Funaria</i>	0,551 (0,257)	1	
SO ₂ Site 1	0,819 * (0,046)	0,547 (0,262)	1

* : corrélation significative — *significant correlation.*

Tableau 4. Matrice de corrélations entre les concentrations de SO₂ chez les deux bio-indicateurs (*Xanthoria parietina* et *Funaria hygrometrica*) et les capteurs physico-chimiques pour le Site 2 (Sidi Amar) — *Matrix correlations between the concentrations of SO₂ in Xanthoria parietina and Funaria hygrometrica and physico-chemical sensors for the Site 2 (Sidi Amar).*

Variables	SO ₂ <i>Xanthoria</i>	SO ₂ <i>Funaria</i>	SO ₂ Site 2
SO ₂ <i>Xanthoria</i>	1		
SO ₂ <i>Funaria</i>	0,889 (0,018)	1	
SO ₂ Site 2	-0,800 ** (0,004)	0,399 (0,433)	1

** : corrélation hautement significative — *very significant correlation.*

de l'air et de sa transformation en d'autres composés (Wellbum, 1988).

La qualité et la variation temporelle des émissions règlent aussi l'accumulation des polluants dans la végétation (Reimann et al., 1999 ; Kozlov et al., 2000).

En revanche, des dégâts considérables sur la membrane cellulaire des lichens résultant de l'exposition au SO₂ ont été constatés par Pearson et al. (1982) et Tarhanen et al. (1995).

Aussi, une étude à Harjavalta a montré que les taux élevés de SO₂ ont affecté la distribution des espèces, le niveau critique de SO₂ pour les lichens et les bryophytes sensibles est de 5 à 10 µg·m⁻³ (Kashulina et al., 2003). Donc, le niveau ambiant de SO₂ peut représenter un obstacle à une nouvelle colonisation par les espèces des plantes sensibles.

Une autre étude a confirmé que le soufre dans ses formes variables est le polluant fondamental responsable de la disparition de la flore lichénique autour de Sudbury et les études de laboratoire ont confirmé la sensibilité des lichens à l'anhydride sulfureux et à ses dérivés dans les précipitations acides (Puckett et al., 1980).

Des résultats de fumigation des lichens sous conditions de laboratoire contrôlées ont confirmé que le SO₂ est extrêmement nuisible pour la plupart des espèces lichéniques. Dans quelques régions basses, la concentration de SO₂ était si élevée que les lichens avaient presque disparu (Gilbert, 1970).

Nous constatons que les teneurs en chlorophylle ont tendance à diminuer en fonction du temps d'exposition et fluctuent selon la position du site de transplantation.

Garty et al. (1985), Kardish et al. (1987), Boonpragob et al. (1991), Garty et al. (1993) et Gonzalez et al. (1996) ont montré que l'exposition des lichens aux polluants dans les régions urbaines et industrielles cause la déchéance de la chlorophylle des lichens.

Nous pouvons remarquer aussi que la teneur en proline augmente en fonction du temps d'exposition et de la concentration des polluants, ceci peut s'expliquer par un stress lié à l'exposition de ces plantes à la pollution atmosphérique et aux facteurs climatiques, ce qui confirme l'importance de la proline dans la révélation d'un état de stress et de perturbation.

Donc, l'augmentation de la proline traduit le stress de la plante engendré par l'accumulation d'un polluant (Deruelle et al., 1983 ; Lagadic et al., 1997 ; Hellmann et al., 2000).

En ce qui concerne la respiration, on remarque de la même façon une forte perturbation chez les deux bio-indicateurs transplantés au niveau des deux sites. Cela est dû probablement aux rejets du complexe sidérurgique et à l'intensité du trafic routier émettant des polluants qui touchent le métabolisme respiratoire des végétaux.

Tous ces résultats obtenus par les trois capteurs (stations et bio-accumulateurs) montrent que les taux de SO₂ au niveau des deux sites sont dus à la proximité du complexe sidérurgique, à l'indice du trafic routier (le nombre des voitures diesel augmente constamment) et à l'utilisation des chauffages.

Il est à noter que les valeurs enregistrées par les stations restent toujours liées au bon fonctionnement des capteurs physico-chimiques et de certains facteurs météorologiques.

On peut confirmer que *F. hygrometrica* et *X. parietina* accumulent des taux importants de polluants, ce qui les rend d'excellents bio-accumulateurs pour l'estimation de la pollution (Ceburnis et al., 1999 ; Reimann et al., 2001).

Cependant, la variation des concentrations reste fonction de la nature des espèces, du temps d'exposition à la pollution, de la distance par rapport à la source de la pollution et enfin de la variation de certains facteurs climatiques, comme le vent, la pluviométrie et l'humidité relative.

En ce qui concerne la variation des paramètres physiologiques mesurés (teneur en chlorophylle, en proline et activité respiratoire), elle peut témoigner de la qualité de l'air de chaque site. Généralement, la teneur en chlorophylle et la quantité d'oxygène consommée chez les deux bio-indicateurs ont tendance

à diminuer dans les sites fortement pollués à cause de la perturbation du processus photosynthétique et respiratoire, ainsi que la dégradation de la matière fraîche, alors que la teneur en proline a tendance à augmenter avec le temps d'exposition à cause du stress subi.

Toutes ces perturbations se traduisent par des altérations morphologiques telles que la perte de la couleur et de la vitalité des végétaux. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Zambrano et al. (2000) et Fornasiero (2001).

5. CONCLUSION

Nous remarquons que ce polluant (SO₂) exerce des effets très négatifs sur les paramètres physiologiques des deux espèces végétales étudiées.

Compte tenu des teneurs importantes en polluant accumulé par les deux bio-indicateurs utilisés et en s'appuyant sur les résultats des capteurs physico-chimiques, nous pouvons extraire trois conclusions principales :

- les deux espèces se sont avérées de très bonnes bio-accumulatrices de SO₂, néanmoins l'espèce lichénique *Xanthoria parietina* présente un pouvoir accumulateur beaucoup plus élevé que celui de *Funaria hygrometrica*. Des corrélations variant de significatives à hautement significatives entre le SO₂ et les paramètres physiologiques mesurés, ainsi qu'entre les résultats des bio-accumulateurs et ceux des capteurs physico-chimiques, ont été trouvées.
- il existe une forte pollution par le SO₂ dans la région de Annaba, surtout au niveau de l'agglomération de Sidi Amar vu sa proximité au complexe sidérurgique ISPAT, par rapport à celle d'El-Bouni.
- enfin, nous pouvons considérer que ce jumelage de techniques biologiques et physico-chimiques est très intéressant, dans le sens où les résultats obtenus par les deux capteurs sont complémentaires et permettent une meilleure caractérisation de la pollution par le SO₂ dans la région.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Office National de Météorologie Les Salines à Annaba, pour avoir mis à leur disposition les données climatiques, et la Direction de Surveillance et de Contrôle de la Qualité de l'Air, Sama Safia, à Annaba, pour leur avoir fourni les résultats enregistrés par les capteurs physico-chimiques.

Bibliographie

Alioua A., 1995. *Détection de la pollution mercurielle dans la région de Azzaba à l'aide de bio-accumulateurs*

(*Xanthoria parietina*, *Olea europea*, *Cupressus sempervirens*, *Casuarina equisetifolia* et *Triticum durum*). Thèse de Magister : Université de Annaba (Algérie).

Alioua A., 2001. *Détection de la pollution plombique d'origine automobile à l'aide de bio-indicateurs végétaux dans l'agglomération de Skikda (Algérie)*. Thèse de doctorat : Université Joseph Fourier, Grenoble (France).

Alioua A., Maizi N., Maizi L. & Tahar A., 2008. Caractérisation de la pollution par le NO₂ à l'aide d'un couplage de technique biologique et physico-chimique dans la région de Annaba (Algérie). *Pollut. Atmos.*, **50**, 325-332.

Belandria G. & Asta J., 1987. Les lichens bioaccumulateurs : régression de la pollution fluorée dans la vallée de la Romanche (Isère, France). *Bull. Ecol.*, **18**(3), 117-126.

Boonpragob K. & Nash III T.H., 1991. Physiological responses of the lichen *Ramalina menziesii* Tayl to the Los Angeles urban environment. *Environ. Exp. Bot.*, **31**, 229-238.

Ceburnis D. & Valiulis D., 1999. Investigation of absolute metal uptake efficiency from precipitation in moss. *Sci. Total Environ.*, **226**, 247-253.

Cirad, 2004. *Catalogue des analyses courantes*. Montpellier, France : Cirad.

Dagnelie P., 1999. *Statistique théorique et appliquée. Tome 2 : interférence statistique à une et deux dimensions*. Bruxelles : De Boeck Université.

Deruelle S., 1983. *Écologie des lichens du bassin parisien. Impact de la pollution atmosphérique et relation avec les facteurs climatiques*. Thèse de doctorat : Université Pierre et Marie Curie, Paris (France).

Deruelle S., 1984. L'utilisation des lichens pour la détection et l'estimation de la pollution par le plomb. *Bull. Ecol.*, **15**, 1-6.

Deruelle S., 1992. Accumulation du plomb par les lichens. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, **139**(1), 99-109.

Deruelle S. & Lallemand R., 1983. *Les lichens témoins de la pollution*. Paris : Vuibert.

Deruelle S. & Guilloux F., 1993. Évolution de la végétation lichénique en région parisienne entre 1981 et 1991, en relation avec la qualité de l'air. *Bull. Inf. Assoc. Fr. Lichénologie*, Mémoire **2**, 23-43.

DMI (Direction des Mines et de l'Industrie), 2004. *Rapport annuel des rejets industriels dans la ville de Annaba*. Annaba, Algérie : Direction des Mines et de l'Industrie.

Dreier W. & Göring M., 1974. Der Einfluss hoher Salzkonzentration auf verschiedene physiologische Parameters von Maiswurzeln. *Wiss. Z. der Humboldt Univ. Berlin, Reihe/Math. Naturwiss.*, **23**, 641-644.

Eversmann S., 1978. Effects of low-level SO₂ on *Usnea hirta* and *Parmelia chlorochroa*. *Bryologist*, **81**, 368-377.

Fornasiero R.B., 2001. Phytotoxic effects of fluorides. *Plant Sci.*, **161**, 979-985.

- Garty J., Ronen R. & Galun M., 1985. Correlation between chlorophyll degradation and the amount of some elements in the lichen *Ramalina duriaei* (De Not.) Jatta. *Environ. Exp. Bot.*, **25**, 67-74.
- Garty J., Karary Y. & Harel J., 1993. The impact of air pollution on the integrity of cell membranes and chlorophyll in the lichen *Ramalina duriaei* (De Not.) Bagl. transplanted to industrial sites in Israel. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **24**, 455-460.
- Gilbert O.L., 1970. Further studies on the effect of sulfur dioxide on lichens and bryophytes. *New Phytol.*, **69**, 605-627.
- Gonzalez C.M., Casanovas S.S. & Pignata M.L., 1996. Biomonitoring of air pollutants from traffic and industries employing *Ramalina ecklonii* (Spreng.) Mey. and Flot. in Cordoba, Argentina. *Environ. Pollut.*, **91**, 269-277.
- Häffner E. et al., 2001. Air pollution and lichen physiology. Physiological responses of different lichens in a transplant experiment following an SO₂ - gradient. *Water Air Soil Pollut.*, **131**, 185-201.
- Hauck M., Jürgens S.R., Brinkmann M. & Herminghaus S., 2008. Surface hydrophobicity causes SO₂ tolerance in lichens. *Ann. Bot.*, **101**, 531-539.
- Hawksworth D.L. & Rose F., 1970. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*, **227**, 145-148.
- Heibel E., Thorsten Lumsch H. & Schmitt I., 1999. Genetic variation of *Usnea filipendula* (Parmeliaceae) populations in Western Germany investigated by RAPDs suggests reinvasion from various sources. *Am. J. Bot.*, **86**, 753-757.
- Hellmann H., Funck D., Rentsch D. & Frommer W.B., 2000. Hypersensitivity of an *Arabidopsis* sugar signaling mutant toward exogenous proline application. *Plant Physiol.*, **122**, 357-367.
- Hutchinson T.C., Scott M., Soto C. & Dixon M., 1987. The effect of simulated acid rain on boreal forest floor feather moss and lichen species. In: Hutchinson T.C. & Meema K.M., eds. *Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands, and agricultural ecosystems*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 411-426.
- James P.V., 1973. The effect of air pollutants other than hydrogen fluoride and sulfur dioxide on lichens. In: *Air pollution and lichen*. London: Athlone press, 143-175.
- Johnsen I., 1986. The biological indication of SO₂. *Experientia*, **42**(5), 503-507.
- Kardish N., Ronen R., Bublick P. & Garty J., 1987. The influence of air pollution on the concentration of ATP and on chlorophyll degradation in the lichen *Ramalina duriaei* (De Not.) Bagl. *New Phytol.*, **106**, 697-706.
- Kashulina G., Reimann C. & Banks D., 2003. Sulphur in the Arctic environment (3) : environmental impact. *Environ. Pollut.*, **124**, 151-171.
- Kozlov M.V. et al., 2000. Root vs canopy uptake of heavy metals by birch in an industrially polluted area: contrasting behaviour of nickel and copper. *Environ. Pollut.*, **107**, 413-420.
- Lagadic L., Caquet T., Amiard J.C. & Ramade F., 1997. *Biomarqueurs en écotoxicologie. Aspects fondamentaux*. Paris : Masson.
- LeBlanc F. & Rao D.N., 1966. Réaction de quelques lichens et mousses épiphytiques à l'anhydride sulfureux dans la région de Sudbury, Ontario. *Bryologist*, **69**, 338-346.
- Nash T.H. III & Gries Th.C., 1995. The response of lichens to atmospheric deposition with an emphasis on the Arctic. *Sci. Total Environ.*, **160/161**, 737-747.
- Pearson L.C. & Rodgers G.A., 1982. Air pollution damage to cell membranes in lichens. III. Field experiments. *Phyton*, **22**, 329-337.
- Puckett K.J. & Finegan E.J., 1980. An analysis of the element content of lichens from the Northwest Territories, Canada. *Can. J. Bot.*, **58**, 2073-2089.
- Reimann C., Halleraker J.H., Kashulina G. & Bogatyrev I., 1999. Comparison of plant and precipitation chemistry in catchments with different levels of pollution on Kola Peninsula, Russia. *Sci. Total Environ.*, **243-244**, 169-191.
- Reimann C. et al., 2001. Critical remarks on the use of terrestrial moss (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) for monitoring airborne pollution. *Environ. Pollut.*, **113**, 41-57.
- Seaward M.R.D., 1993. Lichens and sulphur dioxide pollution: field studies. *Environ. Rev.*, **1**, 73-91.
- Semadi A., 1989. *Effet de la pollution atmosphérique, pollution globale, fluorée, plombique sur la végétation dans la région de Annaba (Algérie)*. Thèse de doctorat d'État en Science Naturelle : Université Pierre et Marie Curie, Paris (France).
- Semadi A. & Deruelle S., 1993. Détection de la pollution plombique à l'aide de transplants lichéniques dans la région de Annaba (Algérie). *Pollut. Atmos.*, **Octobre-Décembre**, 86-102.
- Tarhanen S., Holopainen T., Poikolainen J. & Oksanen J., 1995. Effect of industrial emissions on membrane permeability of epiphytic lichens in northern Finland and the Kola Peninsula industrial areas. *Water Air Soil Pollut.*, **88**, 189-202.
- Troll W. & Lindsley G., 1955. A photometric method for the determination of proline. *J. Biol. Chem.*, **215**, 655-660.
- Wellbum A., 1988. *Air pollution and acid rain. The biological impact*. London: Longman Group, 274.
- Zambrano A. & Nash T.H. III, 2000. Lichen responses to short-term transplantation in Desierto de Los Leones, Mexico City. *Environ. Pollut.*, **107**, 407-412.