



**HAL**  
open science

# **Biosurveillance par S.I.G. de la qualité de l'air d'une cité méditerranéenne (Alger), diversité lichénique, indice de pureté atmosphérique (I.P.A) et indice d'impact humain (I.I.H.)**

Kamel Ghennam, Fatiha Abdoun

## ► To cite this version:

Kamel Ghennam, Fatiha Abdoun. Biosurveillance par S.I.G. de la qualité de l'air d'une cité méditerranéenne (Alger), diversité lichénique, indice de pureté atmosphérique (I.P.A) et indice d'impact humain (I.I.H.). Revue d'Écologie (La Terre et La Vie) , 2017, 72 (2), pp.134-146. <hal-03532716>

**HAL Id: hal-03532716**

**<https://hal.science/hal-03532716v1>**

Submitted on 18 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

BIOSURVEILLANCE PAR S.I.G. DE LA QUALITÉ DE L'AIR D'UNE CITÉ  
MÉDITERRANÉENNE (ALGER), DIVERSITÉ LICHÉNIQUE, INDICE DE PURETÉ  
ATMOSPHÉRIQUE (I.P.A) ET INDICE D'IMPACT HUMAIN (I.I.H.)

Kamel GHENAM<sup>1\*</sup> & Fatiha ABDOUN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Écologie Végétale & Environnement. Faculté des Sciences Biologiques. Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (LEVE/FSB/ U.S.T.H.B). BP 32 El-Alia. 16111 Alger. Algérie. Tél/Fax: 00 213 21 24 72 17, Mobile: (00 213) 7 76 16 11 76, E-mail: fatabdoun@yahoo.fr

\* Auteur correspondant. Tél/Fax: 00 213 (0)21 24 72 17, Tél. : 00 213 (0)5 51 15 39 57, E-mail: ilmekamel@yahoo.fr

**SUMMARY.**— *G.I.S. biomonitoring of air quality of a Mediterranean city (Algiers), lichen diversity, index of atmospheric purity (I.A.P.) and index of human impact (I.H.I.).*— In the last few years, the biomonitoring of air quality knows interest on the southern shores of the Mediterranean. The socio-economic development of the Maghreb countries, in particular of Algeria, induced a concurrent increase in their pollution which threatens both ecosystems and human health. The first mapping of the atmospheric pollution of a part of Algiers Bay was established in 2002. We undertook its actualization in 2011 and subsequently its extension to the whole of the Bay using the Geographic Information System (G.I.S.). The database developed in this G.I.S. contains all data of index of atmospheric purity (I.A.P.) for the period until 2016. It also includes the information regarding land occupation and index of human impact (I.H.I.). The I.A.P. method of Leblanc & De Sloover (1970) was used for 1110 plots checked on the 111 stations. All I.A.P. values or the environmental variables were precisely located and represented on the geo-referenced map. The measured environmental factors were compared to the value of I.A.P. and to the physico-chemical measurements of the four existing pollution gauges in the city. The results showed a significant decrease in air quality in 14 years. We realized the first iso-pollution map elaborated on a G.I.S. with all the recent data on air quality covering all the bay of Algiers. The identified pollution classes show that, except for one less polluted station, the whole Algiers city is characterized by elevated pollution classes. It was also shown a negative correlation between I.A.P. and I.H.I. among sampled stations, which corroborates the importance of the evolution of pollution and its threats for human health in a city that continues to grow into a great city.

**RÉSUMÉ.**— La biosurveillance de la qualité de l'air connaît un gain d'intérêt ces dernières années sur la rive sud de la méditerranée. Le développement socio-économique des pays du Maghreb et notamment de l'Algérie induit une augmentation de la pollution atmosphérique, laquelle menace à la fois ses écosystèmes et la santé humaine. La première cartographie de la pollution atmosphérique d'une partie de la baie d'Alger a été établie en 2002. Nous avons entrepris son actualisation en 2011 et par la suite son extension sur toute la baie en utilisant le Système d'Information Géographique (S.I.G.). La base de données élaborée dans ce S.I.G. comporte toutes les données de l'indice de pureté atmosphérique (I.P.A.) jusqu'en 2016. Elle comporte également les informations concernant l'occupation du sol et l'indice d'impact humain (I.I.H.). La méthode utilisée s'appuie sur l'I.P.A. de Leblanc & De Sloover (1970) dans les 1110 relevés réalisés sur 111 stations. Toutes les valeurs de l'I.P.A. ou des variables du milieu sont précisément localisées et représentées sur une carte géo-référencée. Les facteurs environnementaux mesurés ont été comparés aux valeurs de l'I.P.A. et aux mesures physicochimiques des quatre jauges existantes sur la ville. Les résultats ont montré une importante baisse de la qualité de l'air en 14 ans. Nous avons réalisé la première carte d'iso-pollution élaborée sur un S.I.G. avec toutes les données récentes sur la qualité de l'air couvrant toute la baie d'Alger. Les classes de pollution identifiées montrent que, à l'exception d'une station peu polluée, toute la ville d'Alger se caractérise par des classes de pollution élevée. Il a également été montré une corrélation négative entre l'I.P.A. et l'I.I.H. des stations échantillonnées, ce qui corrobore l'importance de l'évolution de la pollution et le danger qu'elle représente sur la santé humaine dans une ville qui continue d'évoluer vers une grande métropole.

---

Les écosystèmes méditerranéens, considérés comme « hot spot » de la biodiversité (Vela & Benhouhou, 2007), subissent une incidence très importante de la pollution atmosphérique qui ne cesse d'augmenter avec le développement socioéconomique des pays circumméditerranéens. Pour

cela, un dispositif de surveillance physico-chimique (Sama Safia) représenté par un réseau composé de quatre capteurs de la pollution atmosphérique, a été mis en place en 2002.

Si la flore phanérogame méditerranéenne est assez bien connue, les lichens le sont moins. Ces derniers présentent une grande sensibilité à la pollution, ce qui en fait de bons indicateurs biologiques pour détecter les effets précoces de la pollution atmosphérique (Deruelle, 1978; Szczepaniak & Biziuk, 2003). Ayant connu un développement économique important, les pays industrialisés ont subi les méfaits de la pollution atmosphérique bien avant les pays du sud.

Pour cela, des chercheurs ont élaboré plusieurs méthodes de suivi de la qualité de l'air par les lichens. Parmi celles-ci, citons des méthodes quantitatives telles que l'Indice de Pureté Atmosphérique (I.P.A.) (Leblanc & De Sloover, 1970) au Canada ou l'Indice de Poléo-tolérance (I.P.) (Trass, 1973). Une autre méthode basée sur la biodiversité des lichens (L.B.) a été appliquée en Italie (Nimis *et al.*, 1990 ; Giordani *et al.*, 2002). Des normes allemandes ont été largement appliquées en Europe telle la Méthode Standard Européenne (Vdi, 1995, 2004). D'autres méthodes qualitatives (Hawksworth & Rose, 1970) existent dont l'application est difficile dans nos régions sud-méditerranéennes, compte tenu de la différence des milieux et donc de la flore épiphyte. L'application de ces méthodes dans le monde a généré plusieurs études de cartographie sur la base de ces indices (Leblanc & De Sloover, 1970 ; Deruelle, 1983 ; Lerond, 1984 ; Belandria & Asta, 1986 ; Ammann *et al.*, 1987 ; Loppi, 1996 ; Khalil & Asta, 1998 ; Gombert, 1999 ; Jeran *et al.*, 2002 ; Gombert *et al.*, 2003).

Plusieurs chercheurs ont utilisé le Système d'Information Géographique (S.I.G.) pour un meilleur suivi et pour la représentation de la qualité de l'air (Loppi, 2004 ; Ferreira *et al.*, 2012 ; Bustamante *et al.*, 2013).

En Algérie, très peu d'études sporadiques de biosurveillance de la qualité de l'air ont été réalisées. Citons entre autres les études de bioaccumulation du plomb par les lichens pour la région d'Annaba (Semadi, 1989) et pour une partie de la baie d'Alger (Rahali, 2003). Ainsi, parmi les méthodes physico-chimiques, on peut citer l'étude de la pollution atmosphérique d'Alger (Boughedaoui, 1993) et quelques études sur le réseau de surveillance de la ville d'Alger. À cause de son coût élevé et du vandalisme qu'il a subi, le programme Sama Safia a été abandonné en 2009. De ce fait, nous pensons qu'il est pertinent d'utiliser des mesures de bio-surveillance végétale.

Dans cette étude, nous observons l'évolution de la qualité de l'air en fonction du développement socio-économique qui implique l'augmentation de la pollution. Pour cela, nous avons poursuivi les travaux de Rahali (2003) et appliqué la méthode de l'I.P.A. sur un S.I.G. pour la réalisation d'une carte d'iso-pollution d'Alger.

Les objectifs de cette étude sont : (i) d'estimer et cartographier sur S.I.G. la qualité de l'air de la zone d'étude, (ii) de suivre l'évolution de la qualité de l'air et de la diversité lichénique et (iii) de tester l'IHI dans notre région et de faire ressortir les facteurs environnementaux prépondérants contrôlant la distribution de cette diversité.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### ZONE D'ÉTUDE

Alger, capitale de l'Algérie, est située au sud-ouest de la Méditerranée (Fig.1). Elle couvre une superficie de 800 km<sup>2</sup> et est peuplée par au moins 2.809.396 habitants selon l'Office National des Statistique (ONS, 2008).

La topographie de la région connaît un relief accidenté et ce relief joue un rôle dans la distribution de la pollution. Il est principalement divisé en deux parties : le côté Est et Centre qui a une altitude variant de 0 à 200 m représentant la continuité des plaines de la Métija, et le côté Ouest qui est à une altitude plus élevée, comprise entre 0 et 400 m, représenté par le massif de Bouzaréah. Quelques forêts urbaines sont présentes sur le côté Ouest et aux alentours de la zone d'étude.

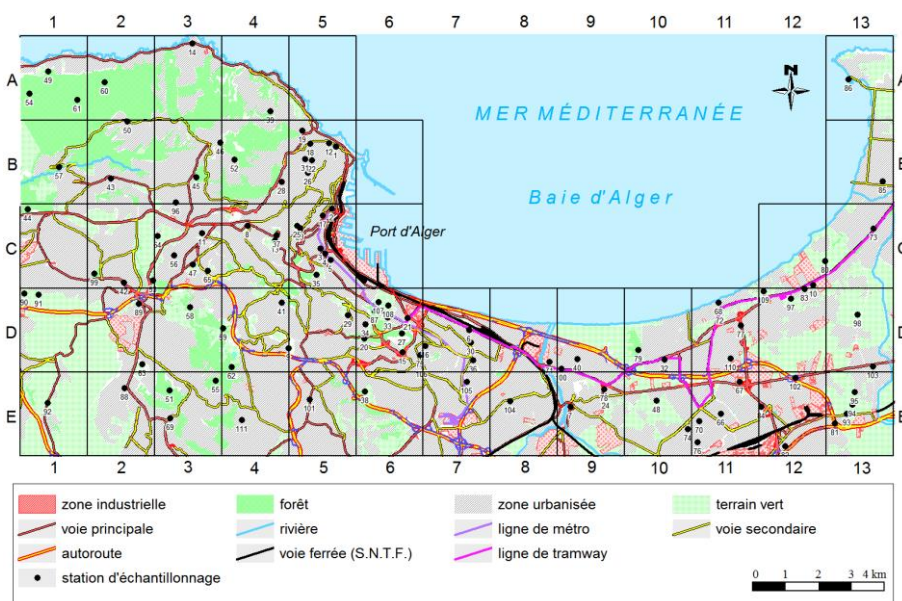


Figure 1.— Localisation des stations d'échantillonnage sur la baie d'Alger.

Notre zone d'étude concerne principalement le centre de la métropole d'Alger. Elle est délimitée entre les longitudes 2°58' et 3°12' Est et les latitudes 36°43' et 36°49' Nord. Son climat est caractérisé par une moyenne annuelle de précipitations de 590 mm, variant entre 700 mm en années humides et 500 mm en années sèches, et une température moyenne annuelle minimale de 10°C et maximale de 30°C. Les vents dominants sont de direction Nord et Nord-Est. Alger se situe dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver chaud.

De nombreuses routes et autoroutes avec un grand trafic automobile longent la ville, supportant un parc automobile qui a évolué presque du double, d'environ 566 000 véhicules en 1997 à 1 103 017 véhicules en 2007 (ONS, 2008). Sur le pourtour de la baie d'Alger, il existe une urbanisation très dense ainsi que de nombreuses zones industrielles situées de part et d'autre de la ville, contribuant à sa pollution.

### ÉCHANTILLONNAGE

Nous avons appliqué un échantillonnage systématique avec un maillage de 50 Unités (2,5 km en latitude = 2 km en longitude) sur une carte au 1/25000. En respectant les exigences de la méthode I.P.A. nous avons choisi 111 stations en choisissant les stations les plus proches du centre d'Unité qui sont élaborées automatiquement dans chaque maille (Asta *et al.*, 2002).

Sur des images satellites, nous avons localisé les phorophytes potentiels. Dans chaque station, 10 à 12 arbres sont examinés, soit environ 1110 phorophytes. Le choix du phorophyte a porté essentiellement sur l'Olivier (*Olea europea* subsp *europaea* var. *sylvatica*) pour son abondance dans toute la région d'étude, ce qui répond à la condition d'homogénéité de l'échantillonnage (Fernández-Salegui *et al.*, 2007). Dans les dix stations où il est absent nous avons utilisé parmi les espèces présentes le Cyprés (*Cupressus sempervirens*). Selon Kirschbaum & Wirth (1997) et Van Haluwyn *et al.*, (2009), les relevés sont exécutés à un minimum de 100 cm au-dessus du sol sur les arbres verticaux ayant un diamètre minimum de 20 cm. Les arbres dépassant les 40 cm de diamètre ont été écartés.

Quant aux paramètres environnementaux locaux, nous avons pris en compte tous ceux qui influencent la flore de lichens épiphytes tels que l'urbanisation, le trafic routier et le couvert végétal (Khalil & Asta, 1998 ; Gombert *et al.*, 2003 ; Ghennam, 2011). Toutes les données sur le milieu ont été récoltées. Nous avons utilisé deux GPS, l'un est du type ETREX 30 équipé d'un baromètre pour nous renseigner sur l'altitude ainsi qu'un appareil photo équipé d'un GPS intégré nous permettant de bien localiser nos espèces sur la carte.

### INDICE DE PURETÉ ATMOSPHÉRIQUE

L'étude de la fréquence des espèces lichéniques par l'application de l'Indice de Pureté Atmosphérique (I.P.A.) de Leblanc & De Sloover (1970) a été adoptée dans cette étude. Nous nous sommes intéressés à la fréquence des espèces lichéniques par la technique des relevés sur les troncs. La démarche est la suivante : une grille (de 10 carreaux de 10 cm de

côté chacune) a été appliquée sur les troncs du côté le plus riche en lichens ; dans la zone d'étude la majorité des lichens sont observés sur le côté nord des arbres. L'identification des lichens est faite en deux temps, sur place et en laboratoire pour les espèces crustacées difficiles à identifier.

L'indice de pureté atmosphérique (I.P.A. ou I.A.P. en Anglais) est développé comme suit:

$$IPA = (1/10) \sum_1^{ni} Q_i * F_i$$

$F_i$  = abondance de chaque espèce ;  $n_i$  = nombre d'espèces ;  $Q_i$  est l'indice écologique de chaque espèce. Pour une espèce donnée il est déterminé en additionnant le nombre des espèces l'accompagnant présentes dans tous les sites étudiés, puis en divisant ce total par le nombre de sites. Le produit  $Q_i.F_i$  est divisé par 10 pour réduire la valeur de l'I.P.A. et faciliter l'établissement de la carte. Le coefficient ( $f_i$ ) proposé par Deruelle (1978) représente à la fois le recouvrement et la fréquence, allant de 1 à 5 :

- 1- espèce observée sur un arbre et à recouvrement inférieur à 5% ;
- 2- espèce observée sur un arbre ou à recouvrement inférieur à 5% ;
- 3- espèce observée sur moins de la moitié des arbres ;
- 4- espèce observée sur plus de la moitié des arbres ou à recouvrement supérieur à 50 % sur quelques arbres ;
- 5- espèce observée sur plus de la moitié des arbres et à recouvrement supérieur à 50 % sur la plupart des arbres.

Nous avons calculé l'I.P.A. pour chaque station et les I.P.A. moyens des stations incluses dans la même maille afin de réaliser la carte d'iso-pollution selon les classes proposées par Conti & Cecchetti (2001) (Tab. I).

Nous avons rajouté une classe d'I.P.A. de 0 à 5 qui représente le désert lichénique (Rahali, 2003), les seules espèces qui s'y trouvent sont des espèces très résistantes à la pollution atmosphérique qu'on rencontre dans des îlots protégés (jardins publics) représentant un microclimat particulier (Dalip Kumar *et al.*, 2015).

TABLEAU I

Niveau de la qualité de l'air selon les I.P.A. (Conti & Cecchetti, 2001)

Niveau A	$0 \leq IPA \leq 12,5$	Très haut niveau de pollution
Niveau B	$12,5 < IPA \leq 25$	Haut niveau de pollution
Niveau C	$25 < IPA \leq 37,5$	Niveau de pollution modéré
Niveau D	$37,5 < IPA \leq 50$	Bas niveau de pollution
Niveau E	$IPA > 50$	Très bas niveau de pollution

## VARIABLES ENVIRONNEMENTALES

Les données sur les variables environnementales sont issues du plan d'occupation et d'aménagement urbain de la ville d'Alger (P.D.A.U., 2015) établi par les services de la Wilaya d'Alger d'une part et des observations récoltées sur le terrain d'autre part.

Afin de caractériser ces variables environnementales, nous avons utilisé l'indice d'impact humain (I.I.H.) proposé par Gombert *et al.* (2004) et appliqué à la région de Grenoble. Nous avons utilisé les variables environnementales décrites par Rahali (2003) et leurs avons ajouté des valeurs issues du terrain pour leur quantification. Cependant des modifications ont été apportées, six classes (au lieu de quatre de Rahali) ont été définies pour les variables « couvert végétal » et « Urbanisation » (Ghennam, 2011).

Les données environnementales ont été caractérisées par les paramètres quantitatifs suivants : le nombre de routes 'Nb.Rt', Autoroute 'Aut', le couvert végétal 'C.Vgt', l'urbanisation 'Urb', l'altitude 'Alt', la distance de la route 'D.Rt' (Tab. II).

Nous avons utilisé l'indice d'impact humain (I.I.H.) défini par Gombert *et al.* (2004) et qui est aussi appelé indice de cotation, lequel traduit l'artificialité du milieu. Ce dernier auteur (Gombert, 1999) s'est inspiré de la méthode de cotation et de hiérarchisation de Tombal & Mériaux (1981, in Blandin, 1986). Cet indice est défini comme suit :

$$\text{Indice de cotation} = I (E + M + O)$$

I : Critère d'influence ; E : Critère d'exposition ; M : Critère de milieu ; O : Critère d'ouverture.

Pour calculer cet indice à partir de nos données, nous avons fait une correspondance entre nos modalités (Tab. II) et les modalités de Gombert (1999) (Tab. III) comme suit :

Pour la modalité I (critère d'influence, Tab. III), nous avons fait correspondre les valeurs (D) à 1 (habitation isolée, Tab. II) et 2 (groupe de maisons, Tab. II), de l'urbanisation (Tab. II) à la valeur 1 (rural) de I (Tab. III), et pour (D) égal à 3 (petit quartier, Tab. II) et 4 (grand quartier, Tab. II) à la valeur 4 (suburbain).

Pour la modalité O (critère d'ouverture, Tab. III), nous avons fait correspondre la valeur (C) à 1 (arbres isolés, Tab. II), du couvert végétal (Tab. II) à la valeur 1 (arbres isolés) de O (Tab. III) et la valeur 2 (arbres alignés, Tab. II) à la valeur

1 (arbres alignés, Tab. III) et pour (C) égal aux valeurs 3, 4, 5 et 6 (jardin public, bosquet, forêt claire, forêt dense respectivement, Tab. II) à la valeur 2 (arbres en bosquet, Tab. III).

Pour la modalité E (critère d'exposition, Tab. III), nous avons fait correspondre la valeur du critère (F) distance de la route à 1 (0-50m, Tab. II) et 2 (50-100m, Tab. II) de critère d'exposition (Tab. III) à la valeur 1 (proximité d'une voie de circulation) de E (Tab. III), et pour (F) égal à 3, 4, 5 et 6 (distance > 100m, Tab. II) à la valeur 0 (éloignement d'une voie de circulation, Tab. III).

Le critère M reste le même tel qu'il est dans le Tab. III.

TABLEAU II

Codification des variables environnementales (Ghennam, 2011)

Critères	Variables	Code	Valeurs (1 à 6)					
			1	2	3	4	5	6
A	Nombre de routes	Nb.Rt	0					
B	Autoroute	Aut	1					
C	Couvert végétal	C.Vgt	Arbres isolés 1	Arbres alignés 2	Jardin public 3	Bosquet 4	Forêt claire 5	Forêt dense 6
D	Urbanisation	Urb	Habitation isolée < 5 1	Groupe de Maisons 5-50 2	Petit Quartier 50-150 3	Grand Quartier 150-300 4	Cité 300-500 5	Centre urbain > 500 6
E	Altitude	Alt (m)	0-50 1	50-100 2	100-150 3	150-200 4	200-250 5	250-400 6
F	Distance de la route	D.Rt (m)	0-50 1	50-100 2	100-150 3	150-200 4	200-250 5	250-400 6

TABLEAU III

Transformation des variables qualitatives en variables quantitatives pour la définition de l'indice de cotation (Gombert, 1999) et correspondance avec le tableau II

Critères	Variables	Modalités					
		Rural (D = 1, 2)		Suburbain (D = 3, 4)		Urbain (D = 5, 6)	
I	Critère d'influence	Rural (D = 1, 2) 1		Suburbain (D = 3, 4) 4		Urbain (D = 5, 6) 4	
E	Critère d'exposition	Eloignement d'une voie de circulation (F= 1, 2) 0			Proximité d'une voie de circulation (F= 3, 4, 5, 6) 1		
M	Critère de milieu	Champ – Terrain 1	Grand parc 2	Square – Lotissement 3	Parking – Route 4		
O	Critère d'ouverture	Arbres isolés (C=1) 1		Arbres alignés (C = 2) 1		Arbres en bosquet (C= 3, 4, 5, 6) 2	

*Critère I* : pour Rural : D = 1, 2 (correspond aux cases 1 et 2 du Tab. II), pour Suburbain : D = 3, 4 (correspond aux cases 3 et 4 du Tab. II) et pour Urbain : D = 5, 6 (correspond aux cases 5 et 6 du Tab. II) ; *Critère E* : Pour Éloigné d'une voie de circulation : F = 1, 2 (correspond aux cases 1 et 2 du Tab. II) et pour Proximité d'une voie de circulation : F= 3, 4, 5, 6 (correspond aux cases 3, 4, 5, 6 du Tab. II) ; *Critère O* : Arbres isolés : C = 1 (correspond aux cases 1 du Tab. II), Arbres alignés : C = 2 (correspond aux cases 2 du Tab. II) et Arbres en bosquet : C= 3, 4, 5, 6 (correspond aux cases 3, 4, 5, 6 du Tab. II) ; *Critère M* : reste le même.

### CARTOGRAPHIE S.I.G.

Pour la réalisation de la carte d'iso-pollution nous avons procédé comme suit :

1 : Téléchargement et calage des images satellites Google Earth de la ville d'Alger selon la projection Universal Transverse Mercator Nord Sahara 1959.

2 : Codification et introduction des informations concernant les variables environnementales.

3 : Ajout des données d'occupation du sol tirées du P.D.A.U. d'ALGER dans la base.

4 : Détermination de l'I.P.A en fonction du calcul de sa formule intégrée au S.I.G.

5 : Conception d'une cartographie numérique sur S.I.G. de la pollution de la ville d'Alger avec le logiciel Geoconcept.

6 : Nous avons utilisé la charte graphique qui a été élaborée pour la représentation des cartes de qualité de l'air obtenues par la biosurveillance lichénique (Léger & Lerond, 1999 in Garrec & Van Haluwyn, 2002).

7 : Afin de faciliter la lecture des cartes de petit format, le nombre de classes de qualité de l'air est limité à 5.

#### DONNÉES DES MESURES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA POLLUTION (SAMA SAFIA).

Nous avons utilisé les données des mesures physico-chimiques de la pollution disponibles issues du réseau Sama Safia. Ce dernier est composé de quatre jauges équipées d'appareils de mesure des SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et NO ainsi que CO. Ces mesures se sont étalées sur 8 ans de 2002 à 2009. Depuis 2009, le programme a été abandonné et le suivi s'est arrêté.

#### ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Nous avons utilisé différents tests statistiques dans cette étude : le test de Kolmogorov-Smirnov qui nous permet de vérifier la normalité des distributions étudiées, des tests de comparaisons de deux (test t) ou plusieurs moyennes (test de Kruskal-Wallis) et des tests de corrélation (test de Spearman, test de Pearson) (De Micheaux *et al.*, 2011).

L'analyse canonique des correspondances (*canonical correspondence analysis*, CCA) est utilisée dans le but de la recherche des gradients séparant les profils d'espèces (Borcard *et al.*, 2011). Elle est réalisée sur un tableau de 111 stations, 34 espèces de lichens et 8 variables environnementales qui caractérisent la pureté de l'air, l'urbanisation et la pollution, échantillonnées en 2016. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du langage R (Cran R, 2016).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### DIVERSITÉ LICHÉNIQUE

Trente-quatre espèces de lichens épiphytes ont été enregistrées. Ces espèces font partie de la liste de Rahali (2003) qui comptait 62 espèces enregistrées au début des années 2000. La différence dans le nombre d'espèces retrouvées est due au choix strict du phorophyte. Nous avons utilisé la présence totale des espèces (Pt) correspondant au nombre de stations où elles sont présentes. Trois classes d'espèces ont été définies selon leur résistance à la pollution en se référant à leur taux de présence comme suit : classe 1 : Pt >50%, classe 2 : 5%-50% et classe 3 : <5%. L'indice écologique est indiqué pour chaque espèce (Tab. IV).

#### CARTE DE LA RICHESSE SPÉCIFIQUE

La répartition de chaque espèce, c'est-à-dire sa distribution à l'intérieur de chaque zone d'isopollution est reportée dans la figure 2. Nous constatons que la plus grande partie de la richesse spécifique des lichens épiphytes trouvés sur les oliviers est présente dans la partie Ouest de la ville d'Alger. Cette partie de la zone d'étude se caractérise par une altitude moyenne et un couvert végétal plus important que la partie Est. La plus grande fréquence est au niveau de la forêt du parc zoologique de Benaknoun et de la forêt de Bainem.

#### ÉVOLUTION DES I.P.A.

L'I.P.A. dans la zone d'étude a enregistré une diminution considérable entre 2002 et 2016 (Fig. 3). Cette détérioration de la qualité de l'air est due à une grande pression anthropique issue du développement de la ville.

#### CARTE DES I.P.A. PAR STATION

Les valeurs de l'I.P.A. varient de 0 à 40 par unité et celles de l'indice écologique (Qi) de 5,1 (*Dirina ceratoniae*) à 20 (*Physconia grisea*).

Le désert lichénique à faible I.P.A. (0-5) observé dans les études précédentes (Rahali, 2003 ; Ghennam, 2011) continue de s'étendre. Les stations qui le représentent (colorées en rouge sur la carte) sont localisées dans les centres urbains proches des zones industrielles. En s'éloignant de ces zones, nous retrouvons des I.P.A. (5-12,5) dans les zones urbaines avec les voies à grande circulation. Une troisième catégorie d'I.P.A. (12,5-25) regroupe les zones à voies de circulation

secondaires avec un trafic moins intense. Deux autres catégories d'I.P.A. (25-37,5 et 37,5-50) sont localisées dans les massifs forestiers situés sur les hauteurs Ouest de la ville (Fig. 4).

TABLEAU IV  
L'indice écologique et la présence totale des espèces, Alger 2016

	Code	Espèces	T P (111 stations)	P (%)	Classes
		Indice Ecologique	Présence Totale		
<i>Dirina ceratoniae</i> (Ach.) Fr.	DIR_C	5,1	100	90,1	1
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.	XAN_P	5,4	96	86,5	
<i>Bactrospora patellarioides</i> (Nyl.) Almq.	LCNCTS_P	5,9	88	79,3	
<i>Lecanora sienae</i> (B. de Lesd.)	LCNR_S	7,3	57	51,4	
<i>Opegrapha lichenoides</i> Pers.	OPG_L	16,1	37	33,3	
<i>Diplocia canescens</i> (Dicks.) Massal.	DIP_C	9,9	27	24,3	2
<i>Hyperphyscia adglutinata</i> (Flörke) Mayrh. & Poelt	HYPRPHYS_A	10,8	21	18,9	
<i>Lecanora dispersa</i> (Pers.) Sommerf.	LEC_D	18,3	21	18,9	
<i>Waynea stoehadiana</i> (Abbassi Maaf & Cl.Roux) P. Clerc & Cl. Roux	HYPC_ST	10,1	14	12,6	
<i>Schismatomma piconianum</i> (Bagl.) Steiner	SCHIS_P	8,9	13	11,7	
<i>Caloplaca holocarpa</i> (Hoffm.) Wade	CAL_H	12,4	13	11,7	
<i>Arthonia tumidula</i> (Ach.) Ach.	ART_T	9,8	12	10,8	
<i>Lecanora chlorotera</i> Nyl. subsp <i>meridionalis</i>	LEC_Cm	10,2	12	10,8	
<i>Caloplaca cerina</i> (Ehrt. ex. Hedw.) Th. Fr.	CAL_C	14,4	11	9,9	
<i>Physcia adscendens</i> (Fr.) Oliv.	PHYS_A	15,6	10	9,0	
<i>Collema furfuraceum</i> (Arnold) Durietz	CLM_F	5,8	9	8,1	
<i>Candellariella reflexa</i> (Nyl.) Lett.	CND_R	9	9	8,1	
<i>Lecidella euphoria</i> (Flörke) Hertel	LCD_E	15,6	8	7,2	
<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.	LPR_I	9,6	7	6,3	
<i>Lecidella elaeochroma</i> (Ach.) Choisy	LEC_E	15,3	7	6,3	
<i>Lecanora chlorotera</i> Nyl subsp <i>chlorotera</i>	LEC-Cs	12,8	6	5,4	
<i>Physcia tenella</i> (Scop.) D.C.	PHY_T	15,8	6	5,4	
<i>Phlyctis agelaea</i> (Ach.) Flot.	PHLYC_A	16,2	6	5,4	
<i>Ramalina duriaei</i> (De Not.) Bagl.	RAM_D	16,2	6	5,4	
<i>Pertusaria heterochroa</i> (Müll. Arg.) Erichs.	PERT_H	13,2	5	4,5	
<i>Pertusaria hymenea</i> (Ach.) Schaer.	PRT_H	13,4	5	4,5	
<i>Graphis scripta</i> (L.) Ach.	GRP_S	13,4	5	4,5	
<i>Bacidia rubella</i> (Hoffm.) Massal.	BC_R	16	5	4,5	
<i>Phaeophyscia hirtusa</i> (Merschk.) Moberg.	PHAE_H	17	4	3,6	
<i>Bacidia naegelli</i> (Hepp.) Zahlbr.	BAC_N	12,5	2	1,8	
<i>Rinodina roboris</i> (Duf.) Arnold.	RND_R	16,5	2	1,8	
<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.	LEC_P	14	1	0,9	
<i>Rinodina exigua</i> (Ach.) Gray	RIN_E	14	1	0,9	
<i>Physconia grisea</i> (Lamb.) Poelt	PHYSC_G	20	1	0,9	
Total 34 espèces					3

#### CARTE DES I.P.A. PAR MAILLE

La figure 5 présente la distribution des I.P.A. par maille. Selon cette distribution, nous constatons que l'urbanisation et les installations industrielles de la zone d'étude peuvent influencer sur la qualité de l'air. Dans les zones de catégories 3 et 4 il n'y a pas d'installations industrielles et l'urbanisation est aussi faible. Par contre, les zones de mauvaise qualité de l'air (catégories 1 et 2) sont situées à proximité des grands boulevards près de la côte où la concentration de l'urbain est

maximale. Ces dernières sont représentées par les mailles de mauvaise qualité de l'air (A3, A4, B5, C4, C5, C12, D7, D8, D9, D10, D12, D13, E5, E7, E8, E9, E12 et E13) (Fig. 5).

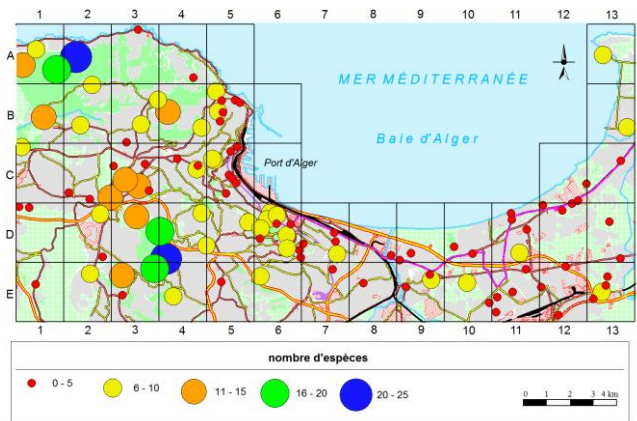


Figure 2.— Carte de la richesse spécifique lichénique de chaque station.

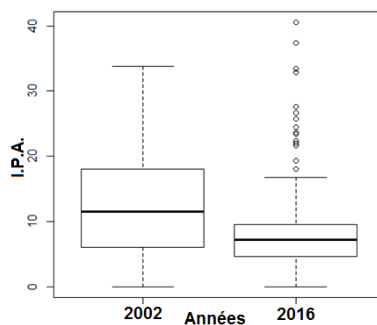


Figure 3.— Évolution de l'I.P.A. entre 2002 et 2016 dans la baie d'Alger.

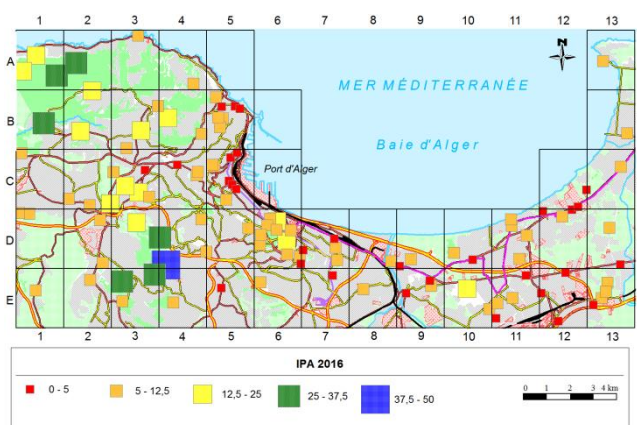


Figure 4.— Carte de la qualité de l'air calculée avec la méthode I.P.A. par station.

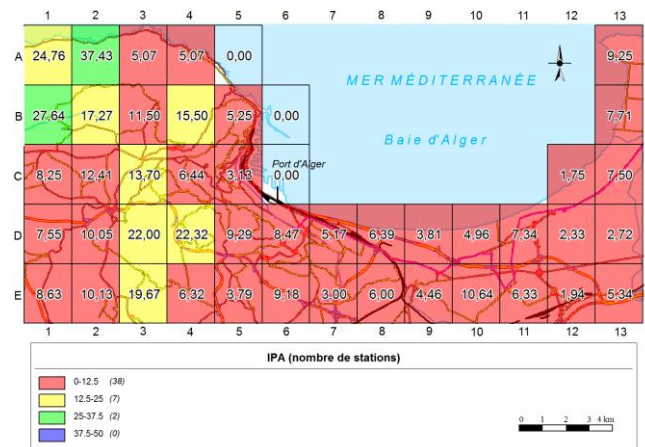


Figure 5.— Carte de la qualité de l'air calculée avec la méthode I.P.A. par maille.

À partir de la figure 5, nous avons remarqué que les I.P.A. par maille peuvent être classés par rapport à l'occupation du sol comme suit :

- 0-6,5 : zone à dominance industrielle et urbaine dense.
- 6,5-12,5 : zone à dominance urbaine avec trafic routier intense.
- 12,5-19,5 : zone à dominance urbaine avec trafic routier faible.
- 19,5-25 : zone à dominance urbaine avec couvert végétal important.
- 25-30 : zone à dominance couvert végétal.

#### RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE ACC

Les deux premiers axes de l'analyse expliquent respectivement 65,8 % et 10,54 % de la variance totale. Par rapport à l'axe 1, la richesse en espèces est importante dans les sites des forêts urbaines de Ben Aknoun et de Bainem situés dans la zone Nord-Ouest d'Alger.

Sur l'axe 1, les sites 51, 55, 57, 59, 60, 61 et 62 sont fortement corrélés à l'I.P.A. par leur caractère moins artificialisé, à faible concentration urbaine et à réseau routier à faible densité. D'autre part, ces stations sont situées sur les hauteurs d'Alger (Fig. 6 A-B-E). On déduit que l'axe 1 explique la pureté de l'air et la présence des espèces de la classe 3 moyennement sensibles à la pollution atmosphérique.

Au niveau de l'axe 2, en positif la richesse en lichens est représentée uniquement par *Collema furfuraceum*, *Schismatomma piconianum* et *Lepraria incana*, avec le nombre de routes (Nb-Rt), l'altitude (Alt) et l'urbanisation (Urb) et en négatif figure l'impact humain (I.I.H.). Les sites 24, 26, 28 et 34 (Fig. 1) sont représentés par les bosquets et jardins publics d'altitude situés dans les zones urbaines avec un niveau de pollution moyen et qui correspondent respectivement aux mailles E9, B5, B4 et D6. Nous observons une deuxième catégorie de sites sur cet axe, caractérisés par l'absence totale d'espèces. Ce sont les stations de basse altitude situées dans les centres urbains et proches des zones industrielles (Fig. 6 A-B-E). Cet axe explique la grande influence qu'exercent les variables environnementales représentées par l'I.I.H. qui donne un gradient d'anthropisation élevé qui réduit significativement la présence des espèces moyennement résistantes.

#### RELATION ENTRE LES PARAMÈTRES PHYSICOCHIMIQUES DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET L'I.P.A.

On observe une tendance négative entre l'I.P.A. et CO, N<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>, ce qui se traduit par une diminution de la richesse spécifique (Fig. 7 a-b-c) et de le l'I.P.A., à cause de la sensibilité de la

majorité des espèces lichéniques à la pollution atmosphérique (Giordani *et al.*, 2002). Par contre, cette relation est positive pour NO et NO<sub>2</sub> où la richesse spécifique augmente (Fig. 7 d-e). Ceci est dû à la présence d'espèces nitrophiles résistantes à la pollution et favorisées par la présence de source d'azote supplémentaire dans l'air (Dalip Kumar *et al.*, 2015).

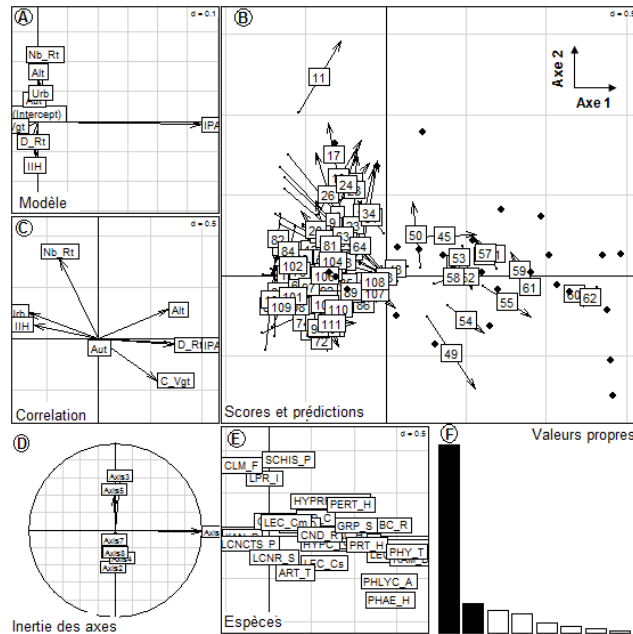


Figure 6.— Analyse canonique de correspondance (ACC) entre paramètres environnementaux et espèces de lichens selon les stations (inertie totale des axes 1 et 2: 76,35 %). A: projection des paramètres environnementaux (Nb\_Rt : nombre de routes ; Aut : autoroute ; C\_Vgt : couvert végétal ; Urb : urbanisation ; Alt : altitude ; D\_Rt : distance de la route ; I.P.A : indice de pureté atmosphérique ; I.I.H. : indice d'impact humain) ; B : observations (111 stations) ; C : matrice de corrélation entre les paramètres environnementaux ; D : inertie des axes (axe 1 = 65,8 %, axe 2 = 10,54 %) ; E : espèces de lichens (Tab. IV) ; F : Valeurs propres (axe 1= 0.25935, axe2 = 0.04156).

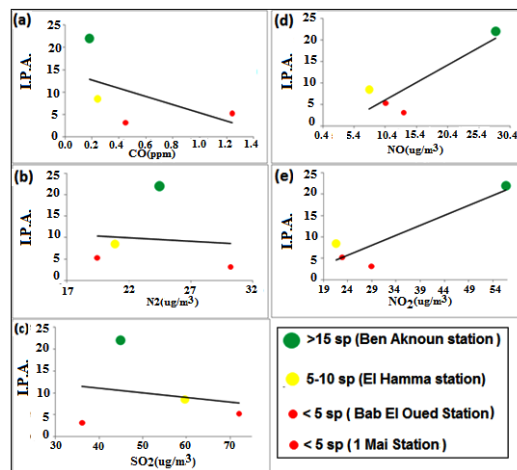


Figure 7.— Relation entre les mesures physico-chimiques et l'I.P.A. (2002-2016).

CORRÉLATION ENTRE LA QUALITÉ DE L'AIR ET L'ANTHROPISATION (I.P.A. ET I.I.H.) ET ÉVOLUTION DE L'I.P.A. ENTRE 2002 ET 2016

Le test de Kolmogorov-Smirnov montre que les deux distributions I.I.H. et I.P.A. répondent à la loi normale (I.I.H. p-value = 0.9166 >5% et I.P.A. p-value = 0.7268 >5%).

La corrélation entre l'I.I.H. et l'I.P.A. est significativement moyenne et négative (r-Pearson = -0.639 et p-value < 0001 < 5%). Donc, il y a une tendance négative entre l'I.P.A. et l'I.I.H. (Fig. 8). Le test a montré une corrélation négative et linéaire entre la diversité des lichens et l'artificialité comme ce qui est trouvé dans l'étude effectuée par Perlmutter (2010). L'I.I.H. semble bien adapté aux zones polluées de nos régions sud-méditerranéennes. Cela reste néanmoins à confirmer par d'autres études.

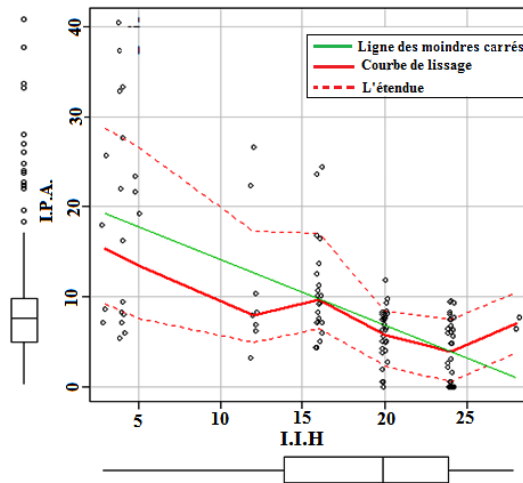


Figure 8.— Relation entre I.P.A. et I.I.H. au niveau des 111 stations étudiées (Alger, 2016).

## CONCLUSION

Cette étude a permis de reconnaître 34 espèces de lichens. Ces espèces, géo-référencées et cartographiées, sont classées en trois groupes selon leur taux de présence qui traduit leur capacité à résister à la pollution atmosphérique. L'espèce *Xanthoria parietina*, qui a été associée simultanément à *Dirina ceratoniae* et *Schismatomma piconianum* en hautes conditions polluées, est à présent abondante avec un taux de 90 %. D'autres espèces telles que *Graphis scripta*, *Bacidia rubella*, *Phaeophyscia hirsuta*, *Bacidia naegelli*, *Rinodina roboris*, *Lecanora pulicaris* et *Rinodina exigua* sont par contre très rares dans la zone d'étude mais sont retrouvées dans les massifs forestiers urbains présentant les valeurs d'I.P.A. les plus élevées. Le reste des espèces présente une résistance moyenne à la pollution.

La comparaison des I.P.A. a montré une nette régression entre 2002 et 2016. À l'échelle de la station, la carte des I.P.A. fait ressortir cinq catégories de qualité de l'air, deux avec la qualité de l'air très mauvaise, deux autres classées mauvaises et une présentant une pureté atmosphérique moyenne. Par contre, la carte des I.P.A. par maille partage la ville en deux parties. Une partie, caractérisée par une grande densité de l'urbanisation à des basses altitudes (0 à 200 m), est située à l'Est et au centre de la ville qui est très polluée. L'autre, localisée à l'Ouest avec des altitudes plus élevées et une végétation plus dense, est quant à elle moins polluée.

L'étude des variables environnementales et le calcul de l'I.I.H permettent, par le test de corrélation avec l'I.P.A., de montrer une forte tendance négative. Cela pourrait justifier l'utilisation des valeurs de l'I.I.H jumelée à l'I.P.A. comme un indicateur général de la pollution atmosphérique pour produire des cartes de qualité de l'air.

Ces cartes peuvent être établies par des zones présentant des conditions homogènes (de même valeur de l'I.I.H.) en y reportant les moyennes des valeurs de l'I.P.A. incluses dans ces zones. Une comparaison de quatre unités par le biais des valeurs I.P.A. et des données de jauges atmosphériques (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et NO) montre que les valeurs de l'I.P.A. peuvent être augmentées par l'abondance des espèces nitrophiles favorisées par la pollution nitrique présente dans l'air.

Nous projetons, dans la suite de nos travaux de recherche, d'établir une méthode d'adaptation des normes AFNOR développées récemment en Europe afin de pouvoir les appliquer dans la région Nord de l'Afrique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs sont particulièrement reconnaissants aux membres de l'AFL pour l'aide dans la réalisation de cette étude. Nous remercions également le responsable du réseau (Sama Safia) pour les données de pollution 2002-2009 ainsi qu'un relecteur anonyme pour ses utiles conseils.

## RÉFÉRENCES

- AMMANN, K., HERZIG, R., LIEBENDOERFER, L. & URECH, M. (1987).— Multivariate correlation of deposition data of 8 different air pollutants to lichen data in a small town in Switzerland. Pp 401-406 *In* : G. Boehm & R.M. Leuschner (eds). *Advances in Aerobiology*. Birkhauser Verlag, Basel.
- ASTA, J., ERHARDT, W., FERRETTI, M., FORNASIER, F., KIRSCHBAUM, U., NIMIS, P.L., PURVIS, O.W., PIRINTSOS, S., SCHEIDEGGER, C., VAN HALUWYN, C. & WIRTH, V. (2002).— Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. Pp 273-279 *In*: P.L. Nimis, C. Scheidegger & P.A. Wolseley (eds). *Monitoring with lichens. Monitoring lichens*. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.
- BELANDRIA, G. & ASTA, J. (1986).— Les lichens bioindicateurs. La pollution acide dans la région lyonnaise. *Pollut. Atmos.*, 109: 10-23.
- BLANDIN, P. (1986).— Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bull. Ecol.*, 17: 317.
- BORCARD, D., GILLET, F. & LEGENDRE, P. (2011).— *Numerical ecology with R*. Springer, New York, Dordrecht, London, Heidelberg.
- BOUGHEDAOU, M. (1993).— *Contribution à l'étude de la pollution atmosphérique gazeuse et particulaire dans le grand Alger*, Thèse de Magistère, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Algérie.
- BUSTAMANTE, E.N., MONGE-NAJERA, J. & MENDEZ-ESTRADA, V.H. (2013).— Use of a Geographic Information System and lichens to map air pollution in a tropical city: San Jose. *Costa. Rica. Rev. Biol. Trop.*, 61: 557-563.
- CONTI, M.E. & CECCHETTI, G. (2001).— Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment. *Environ. Pollut.*, 114: 471-492.
- CRAN R. (2016).— *The Comprehensive R Archive Network*. Cran Web page R (<http://www.R-project.org>).
- DALIP KUMAR, U., PRADEEP, K.D., VERTIKA, S. & RAJESH, B. (2015).— *Recent advances in lichenology. Modern methods and approaches*. Springer India. New Delhi.
- DE MICHEAUX, P.L., DROUILHET, R. & LIQUET, B. (2011).— *Le logiciel R. Maîtriser le langage. Effectuer des analyses statistiques*. Springer Science & Business Media.
- DERUELLE, S. (1978).— Étude comparée de la sensibilité de trois méthodes d'estimation de la pollution atmosphérique, en utilisant les lichens comme indicateurs biologiques, dans la région de Nantes (Yvelines). *Rev. Bryol. Lichénol.*, 44:429-441.
- DERUELLE, S. (1983).— *Écologie des lichens du bassin parisien. Impact de la pollution atmosphérique et relation avec les facteurs climatiques*. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie. Paris. France
- FERNANDEZ-SALEGUI, A.B., TERRON, A., BARRENO, E. & NIMIS, P.L. (2007).— Biomonitoring with Cryptogams near the Power Station of La Robla (León, Spain). *The Bryologist.*, 110: 723-737.

- FERREIRA, A.B., SANTOS, J.O., SOUZA, S.O., JÚNIOR, W.N.S. & ALVES, J.P.H. (2012).— Use of passive biomonitoring to evaluate the environmental impact of emissions from cement industries in Sergipe State, northeast Brazil. *Microchem. J.*, 103: 15-20.
- GARREC, J.P. & VAN HALUWYN, C. (2002).— *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air*. Ed Tec et Doc. Lavoisier, Paris.
- GHENNAM, K. (2011).— *Les lichens dans l'Algérois, étude de leur biodiversité et biosurveillance par SIG de la qualité de l'air*. Mémoire de Magistère. USTHB. Alger. Algérie.
- GIORDANI, P., BRUNIALTI, G. & ALLETEO, D. (2002).— Effects of atmospheric pollution on lichen biodiversity (LB) in a Mediterranean region (Liguria, northwest Italy). *Environ. Pollut.*, 118: 53-64.
- GOMBERT, S. (1999).— *Utilisation de la bioindication lichénique dans l'estimation de la qualité de l'air de l'agglomération grenobloise: Étude à différents niveaux d'organisation biologique*. PhD, Université Joseph Fourier. France.
- GOMBERT, S., ASTA, J. & SEAWARD, M.R.D. (2003).— Correlation between the nitrogen concentration of two epiphytic lichens and the traffic density in an urban area. *Environ. Pollut.*, 123: 281-290.
- GOMBERT, S., ASTA, J. & SEAWARD, M.R.D. (2004).— Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Sci. Total. Environ.*, 324: 183-199.
- HAWKSWORTH, D.L. & ROSE, F. (1970).— Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*, 227: 145-148.
- JERAN, Z., JAČIMOVIĆ, R., BATIĆ, F. & MAVSAR, R. (2002).— Lichens as integrating air pollution monitors. *Environ. Pollut.*, 120: 107-113.
- KHALIL, K. & ASTA, J. (1998).— Les lichens, bioindicateurs de pollution atmosphérique dans la Région Lyonnaise. *Ecologie*, 29: 467-472.
- KIRSCHBAUM, U. & WIRTH, V. (1997).— *Les lichens bioindicateurs*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. Paris. France.
- LEBLANC, F. & DE SLOOVER, J. (1970).— Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses. *J. Bot.*, 48: 1485-1496.
- LÉGER, C. & LEROND, M. (1999).— Charte graphique pour des cartes de qualité de l'air obtenues par bio-indication lichénique. *Bull. Ass. Fr. lichénol.*, 24: 41-42.
- LEROND, M. (1984).— Utilisation des lichens pour la cartographie et le suivi de la pollution atmosphérique. *Bull. Ecol.*, 15: 7-11.
- LOPPI, S. (1996).— Lichens as bioindicators of geothermal air pollution in Central Italy. *The Bryologist*, 99: 41-48.
- LOPPI, S. (2004).— Mapping the effects of air pollution, nitrogen deposition, agriculture and dust by the diversity of epiphytic lichens in central Italy. Lichens in a changing pollution environment. *Engl. Nat. Res. Rep.*, 525: 37-41.
- NIMIS, P., CASTELLO, M. & PEROTTI, M. (1990).— Lichens as biomonitors of sulphur dioxide pollution in La Spezia (Northern Italy). *The Lichenologist*, 22: 333-344.
- PERLMUTTER, G.B. (2010).— Bioassessing air pollution effects with epiphytic lichens in Raleigh, North Carolina, U.S.A. *The Bryologist*, 113: 39-50.
- RAHALI, M. (2003).— *Étude de la pollution plombique et globale dans la région d'Alger en utilisant les lichens comme indicateurs biologiques*. Thèse de Doctorat, INA, Alger, Algérie.
- SEMADI, A. (1989).— *Effets de la pollution atmosphérique globale, fluorée, plombique, sur la végétation dans la Région de Annaba (Algérie)*. Thèse de doctorat d'État en Sciences Nat. Université P. et M. Curie (Paris 6), Paris, France.
- SZCZEPANIAK, K. & BIZIUK, M. (2003).— Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environ. Res.*, 93: 221-230.
- TRASS, H. (1973).— Lichen sensitivity to the air pollution and index of poleotolerance (IP). *Fol. Crypt. Estonia.*, 3: 19-22.
- VAN HALUWYN, C., ASTA, J. & GAVERIAUX, J.P. (2009).— *Guide des lichens de France, lichens des arbres*. Editions Belin, Paris.
- VDI, R. (1995).— *Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten*. Dusseldorf Edn. Flechtenkartierung, Beuth. Berlin.
- VDI, R. (2004).— *Measurement procedures for determining and evaluating the effects of ambient air pollutants on lichens (bio-indication)*. Beuth Verlag GmbH, Germany.
- VELA, E. & BENHOUBOU, S. (2007).— Évaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le Bassin méditerranéen (Afrique du Nord) ». *C. R. Biologies.*, 330: 589-605.