

Accumulation du cadmium par quelques espèces végétales cultivées aux environs d'une usine d'engrais phosphatés à Sfax (Tunisie)

Accumulation of cadmium by some cultivated vegetable species around a factory producing phosphate fertilizers in Sfax (Tunisia)

Imed MEZGHANI, Makki BOUKHRIS, Mohamed CHAIEB*

RÉSUMÉ

La pollution des écosystèmes terrestres par du cadmium d'origine industrielle (usine d'engrais phosphatés) se traduit par des taches nécrotiques au niveau des feuilles et par une accumulation importante de cet élément dans ces feuilles et dans les horizons superficiels du sol. À proximité de la source d'émission, les taux de cadmium dans le sol dépassent 10 fois les valeurs normales. Au niveau des feuilles, elles sont 10 à 30 fois plus élevées que chez les témoins et dépendent de la nature de l'espèce, de la distance (corrélation négative) et des conditions topographiques.

ABSTRACT

The immission of industrial cadmium (factory producing phosphate fertilizers) in terrestrial ecosystems leads to chlorosis of leaves and an important accumulation in vegetation and in the upper layer of the soil. In the vicinity of emission source, the cadmium values in soil exceed 10 times normal values. In leaves, there is 10 to 30 times more elevated cadmium than in the check sample, depending on plant species, distance from factory (negative correlation) and topographical conditions.

Introduction

Le cadmium est considéré parmi les plus puissants polluants chimiques libérés dans l'environnement [Hara et Sonoda, 1979 ; Muller et Payer, 1980]. L'activité industrielle ainsi que les techniques agricoles modernes et le trafic automobile constituent les principales sources de pollution du milieu par ce métal lourd. En agriculture, les apports s'effectuent principalement par les fertilisants phosphatés [Mortvedt et al, 1981 ; Carlson et Rolf, 1979]. Présent à l'état naturel avec le fluor dans les gisements des roches phosphatées, le cadmium est rejeté dans l'atmosphère lors de la fabrication des engrais. Pour des raisons économiques, les matières fertilisantes ne sont pas épurées de leurs éléments métalliques, ce qui justifie la présence de ces derniers en proportions extrêmement variables dans les produits de fertilisation.

À Sfax, la SIAPE (Société Industrielle d'Acide Phosphorique et d'Engrais), constitue la source principale de la pollution atmosphérique dans la région. Située à 5 km du centre-ville, cette usine dont l'installation remonte à 1951, assure la production du triple superphosphate à partir du phosphate brut. Cet engrais nécessite pour sa production de l'acide sulfurique et de l'acide phosphorique, préparés sur place.

Quelques années après l'installation de cette unité de production d'engrais, des signes divers de phytotoxicité ont été observés sur les espèces végétales situées à proximité de l'usine. Ces signes qui varient de simples nécroses foliaires jusqu'au dessèchement entier de certains individus, pourraient être dus aux polluants divers (Cd, HF, SO₂).

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier l'impact de la pollution par le cadmium dans la région de Sfax. Toutefois, sachant que notre étude est effectuée en condition naturelle, il n'est pas aisé de distinguer, au niveau des nécroses, la part de chaque polluant.

* Département de Biologie, Faculté des Sciences de Sfax - Tunisie.

Matériel et méthodes

Pour connaître les diverses expressions des dégâts causés aux végétaux par l'excès de cadmium atmosphérique, nous avons fait des observations régulières chaque semaine et ce durant deux années consécutives. Les observations concernent ainsi quatre espèces fruitières : l'olivier, l'amandier, le figuier, l'abricotier et une espèce ornementale : le rosier.

Afin d'observer l'effet de ce métal lourd rejeté dans l'atmosphère sur la composition chimique des espèces en fonction de la distance de localisation des individus par rapport à la source d'émission, nous avons effectué des prélèvements de feuilles à 1, 3, 4, 5, 8, 12, et 16 km par rapport aux cheminées de rejets des gaz. Nos témoins sont retenus dans un site distant de 30 km par rapport à l'usine et en sens inverse du vent dominant (Figure 1).

À l'issue de leur récolte, les différents échantillons sont séchés à l'étuve à une température de 80 °C durant 24 heures, puis broyés. La poudre obtenue subit ensuite la minéralisation par la méthode d'attaque nitroperchlorique. Celle-ci consiste à placer 1 g de poudre végétale dans une fiole de Kjeldhal de 100 ml dans laquelle on ajoute 10 ml d'acide nitrique et 5 ml d'acide perchlorique. Cette fiole est ensuite placée sur une rampe de minéralisation à une température de 60 à 70 °C (attaque à chaud).

Dès l'apparition de vapeurs blanchâtres, on arrête la minéralisation. La solution liquide obtenue après refroidissement est additionnée de quelques millilitres d'eau distillée, puis filtrée dans une fiole de 25 ml.

Le jaugeage à 25 ml est réalisé par l'addition d'eau déminéralisée. Le dosage du cadmium se fait par la spectrophotométrie d'émission atomique, avec une source d'excitation à plasma d'argon induit par haute fréquence ICP (Plasma à couplage inductif).

En ce qui concerne le dosage du cadmium dans le sol, les échantillons prélevés dans les horizons (0-20 et 20-40 cm), sont homogénéisés par broyage dans un mortier en porcelaine, puis tamisés à 2 mm pour éliminer les débris végétaux et les grosses particules. Ces échantillons sont par la suite séchés à l'étuve à 105 °C pendant 48 heures. Le dosage du cadmium est effectué en ajoutant pour 1 g de sol, 20 ml d'acide nitrique concentré. Le mélange obtenu est chauffé à 120 °C pendant 30 minutes. La solution obtenue est ensuite filtrée, puis amenée à 100 ml par l'eau distillée. Enfin un passage au spectrophotomètre d'émission atomique permet d'obtenir la teneur en cadmium de ces échantillons.

Enfin, le pH du sol est déterminé dans l'eau distillée, selon les proportions sol:eau de 1:5 après 8 heures d'agitation.

Résultats et discussion

Manifestation morphologique de l'effet de la pollution

Les observations faites ont permis de connaître les diverses expressions des dégâts causés aux végétaux par les polluants de l'usine. Mais comme il y a dans cette région, en plus du cadmium, une forte proportion de composés fluorés et soufrés [Ben Abdallah et Boukhris, 1990], il est difficile de

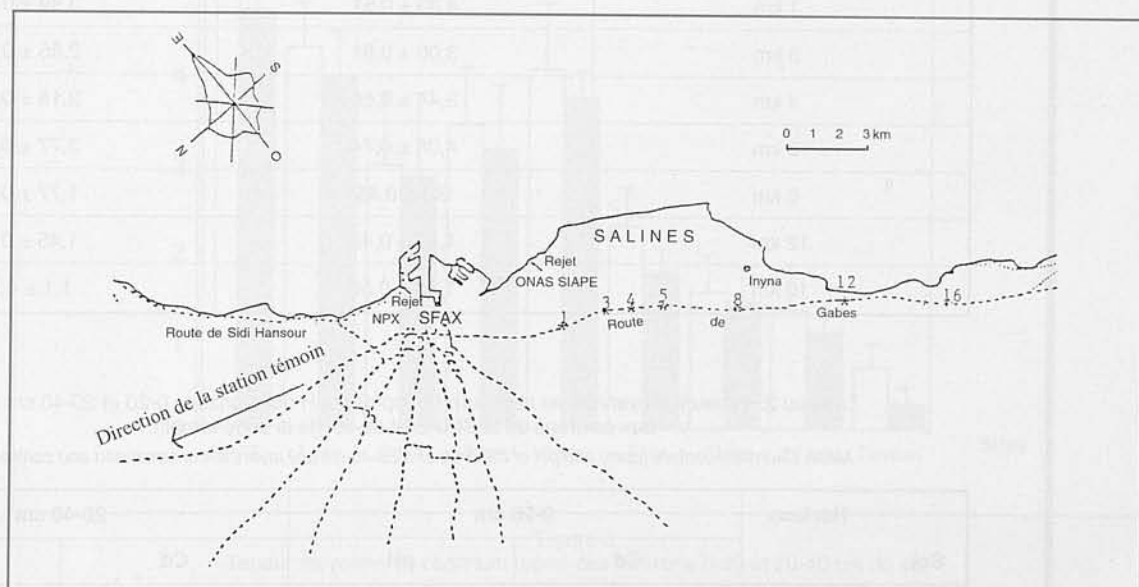


Figure 1.
Emplacement des stations d'étude en km.
Location of the study sites in km.

différencier les nécroses dues au cadmium et celles dues à HF et O₂.

À proximité immédiate de l'usine, la végétation est complètement détruite avec l'apparition de sol profondément érodé. Les plantes les plus proches de la source, apparaissent à environ 400 m de l'usine. Les espèces arborescentes ayant disparu, il ne subsiste encore que quelques espèces tolérantes comme l'olivier, le grenadier et le figuier. Les feuilles de cette dernière espèce présentent en fin de végétation de nombreux symptômes d'intoxication (chloroses et nécroses). La strate basse est essentiellement graminéenne et dominée par des espèces résistantes aux milieux pollués.

L'abricotier (espèce très sensible au fluor) et le mûrier, autrefois présents dans ce secteur, ont totalement disparu dans un rayon de 1 km à partir de la source d'émission. Les individus survivant encore sont fortement endommagés, présentant des attaques très variées sur les feuilles.

Le cadmium est en général réputé aussi pour sa toxicité pour les plantes. La cause de cette toxicité est semble-t-il liée à la perturbation de l'activité enzymatique. Cunningham et al. (1975) et Baszynski et al. (1980) signalent une inhibition de la formation de l'anthocyanine et de la chlorophylle dans les plantes traitées par le cadmium. Ben Abdallah et al. (1994), signalent que sous

l'effet d'une forte pollution fluorée et soufrée, les espèces végétales spontanées et cultivées présentent des atteintes variées sur les feuilles. Elles réalisent des nécroses apicales, marginales et parfois les deux à la fois, suivant la morphologie et la taille des feuilles concernées.

Teneur du sol en cadmium

La composition chimique de la roche mère constitue le facteur le plus important qui détermine la teneur en cadmium dans le sol. Dans les conditions normales, elle varie entre 0,07 et 1,1 ppm. Cependant, il apparaît que la teneur normale ne doit pas dépasser 0,5 ppm, et toute valeur supérieure reflète une action anthropogénique sur la concentration du cadmium dans le sol [Kabata et Pendias, 1984]. Cette action peut être démontrée par l'apport d'engrais, de fumier et par la pollution atmosphérique ou hydrique.

Dans les tableaux 1 et 2, sont consignés les résultats de l'analyse du cadmium dans le sol des différents sites de prélèvements, ainsi que pour le site témoin. Cette analyse concerne les horizons 0-20 cm et 20-40 cm.

Ces tableaux montrent que les concentrations de cadmium décroissent légèrement avec la profondeur puisque les teneurs de l'horizon 0-20 cm sont légèrement plus élevées que celles de l'horizon 20-40. Pour le témoin, ces teneurs

Tableau 1. Teneurs moyennes en cadmium (en ppm) des horizons 0-20 et 20-40 cm des sols des différents sites de prélèvements.

Mean Cadmium content (ppm) of the 0-20 and 20-40 cm soil layers of different sites.

| Site | Horizon | 0-20 cm | 20-40 cm |
|-------|---------|-------------|-------------|
| 1 km | | 4,33 ± 0,51 | 3,99 ± 0,54 |
| 3 km | | 3,00 ± 0,81 | 2,85 ± 0,96 |
| 4 km | | 3,44 ± 0,66 | 3,18 ± 0,72 |
| 5 km | | 4,08 ± 0,74 | 3,77 ± 0,28 |
| 8 km | | 2,3 ± 0,45 | 1,77 ± 0,28 |
| 12 km | | 1,55 ± 0,42 | 1,45 ± 0,39 |
| 16 km | | 1,36 ± 0,50 | 1,1 ± 0,36 |

Tableau 2. Teneurs moyennes en cadmium (en ppm) et pH des horizons 0-20 et 20-40 cm du sol aux environs de la SIAPE et du sol de la zone témoin.

Mean Cadmium content (ppm) and pH of the 0-20 and 20-40 cm soil layers of contaminated and control sites.

| Sol | Horizon | 0-20 cm | | 20-40 cm | |
|--------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Cd | pH | Cd | pH |
| Témoin | | 0,70 ± 0,26 | 7,70 ± 0,26 | 0,30 ± 0,17 | 7,76 ± 0,38 |
| SIAPE | | 5,74 ± 1,10 | 5,66 ± 0,47 | 4,76 ± 0,31 | 5,56 ± 0,50 |

sont largement plus faibles, avec 0,7 ppm pour l'horizon 0-20 cm et 0,3 ppm pour l'horizon 20-40 cm.

La mobilité du cadmium dans la zone polluée est due à la solubilité de l'oxyde de cadmium dans l'eau à un pH acide et à la faible fixation de ce métal dans les sols pauvres en matière organique [Buchauer, 1973], comme c'est le cas des sols du sud tunisien.

Le pH est un facteur important qui contrôle la solubilité et la mobilité du cadmium dans le sol. Ce métal est très mobile à un pH acide variant de 4,5 à 5,5. Selon Kabata et Pendias (1984) cette mobilité diminue avec l'accroissement proportionnel du pH (Figure 2).

Le tableau 2 montre que le pH de la zone polluée est de l'ordre de 5,5 alors que celui de la zone témoin est de 7,7. Ces valeurs pourraient en partie expliquer les différences observées pour la mobilité du cadmium dans les horizons 0-20 et 20-40 cm.

La figure 3 révèle que les teneurs en cadmium du sol décroissent en fonction de la distance par rapport à la source de pollution. Cependant, on remarque une légère élévation de ces teneurs dans les sites situés à 4 et 5 km par rapport au site 3 km. Ces teneurs demeurent élevées (de 3 à 4,33 ppm) jusqu'à une distance de 5 km par

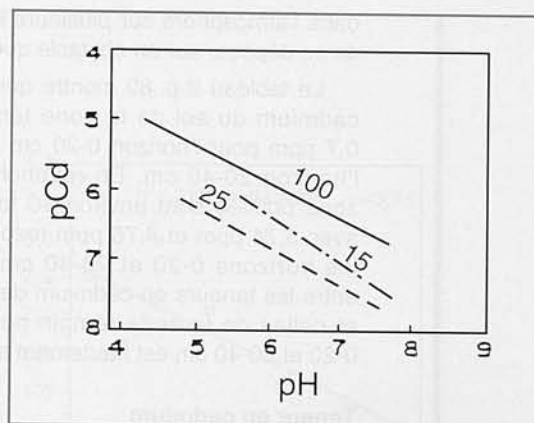


Figure 2.

Solubilité du Cd^{2+} dans le sol en fonction du pH. Courbes obtenues avec 15, 25 et 100 μg de Cd par 2 g de sol [Kabata et Pendias, 1984].
Solubility of Cd^{2+} in soils as a function of soil pH. Equilibration with 15, 25 and 100 μg Cd per 2 g soil [Kabata et Pendias, 1984].

rapport à la source. À partir de 8 km, les teneurs diminuent significativement. Selon Buchauer (1973), les particules d'oxyde de cadmium dans la fumée ont un diamètre inférieur à 1 μm . Ces particules étant très petites, seront transportées

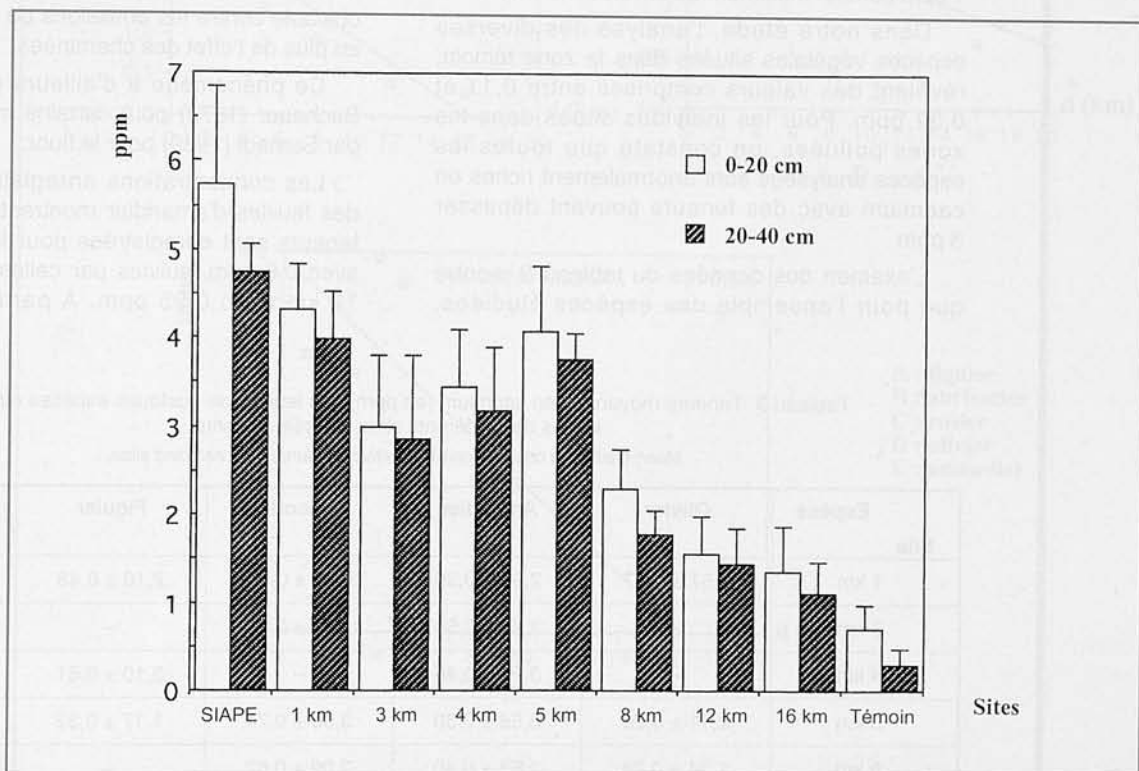


Figure 3.

Teneur moyenne en cadmium (ppm) des horizons 0-20 et 20-40 cm du sol, pour des échantillons issus de différents sites de prélèvements.

I : intervalle de confiance (95 %).

Mean Cadmium content (ppm) of the horizon 0-20 and 20-40 cm of soil from selected sites.
I : Confidence interval (95 %).

dans l'atmosphère sur plusieurs kilomètres avant de se déposer sur un obstacle quelconque.

Le tableau 2 p. 82 montre que les teneurs en cadmium du sol de la zone témoin varient de 0,7 ppm pour l'horizon 0-20 cm à 0,3 ppm pour l'horizon 20-40 cm. En revanche, celles de la zone polluée sont environ 10 fois plus élevées avec 5,74 ppm et 4,76 ppm respectivement pour les horizons 0-20 et 20-40 cm. La différence entre les teneurs en cadmium de la zone polluée et celles de la zone témoin pour les horizons 0-20 et 20-40 cm est hautement significative.

Teneur en cadmium des espèces végétales

Dans le tableau 3, figurent les taux de cadmium accumulé dans les feuilles de différentes espèces liés à la distance par rapport à l'usine de la SIAPE, ainsi que dans la zone témoin.

L'examen de ce tableau montre que la pollution s'est traduite, dans les espèces des sites contaminés, par une teneur en cadmium plus élevée que chez les plantes du site témoin.

Selon Kabata et Pendias (1984), les teneurs normales en cadmium dans les zones prises comme témoins sont de l'ordre 0,05 à 0,2 ppm, alors que pour Godin (1983), on peut admettre 1 ppm comme maximum de la valeur normale.

Dans notre étude, l'analyse des diverses espèces végétales situées dans la zone témoin, révèlent des valeurs comprises entre 0,11 et 0,32 ppm. Pour les individus situés dans les zones polluées, on constate que toutes les espèces analysées sont anormalement riches en cadmium avec des teneurs pouvant dépasser 3 ppm.

L'examen des données du tableau 3 montre que pour l'ensemble des espèces étudiées,

l'accumulation du cadmium décroît avec l'augmentation de la distance. Ces constatations corroborent celles de Denaeys-De Smet (1974) pour l'accumulation du cadmium, de Deruelle (1983, 1996) pour la diffusion du plomb dans l'atmosphère, et de Ben Abdallah et al. (1990, 1994) pour la diffusion du fluor (phénomène de dilution avec la distance).

La méthode de régression linéaire pour toutes les espèces (Figure 4), révèle une corrélation négative significative ($P < 0,05$) entre l'accumulation du cadmium et la distance, avec des coefficients de corrélation r , variables entre 0,75 pour le figuier et l'abricotier, 0,84 pour le rosier, 0,77 pour l'olivier et 0,88 pour l'amandier.

La diminution de l'accumulation de cadmium par rapport à l'augmentation de la distance est nette dans la figure 5 p. 86. Ces résultats s'accordent avec ceux de Buchauer (1973) relatifs à l'accumulation du Cd, Pb, Zn et Cu en fonction de la distance, pour plusieurs espèces forestières.

La figure 5 montre aussi une accumulation plus importante du cadmium au niveau des sites situés à 4 et 5 km de la source par rapport aux sites situés à 1 et 3 km. Cela se justifie par une corrélation moyenne entre l'accumulation du cadmium et la distance ($0,75 < r < 0,88$). A priori, on pourrait expliquer ce résultat par l'existence de barrières artificielles (bâtiments des constructions voisines) et naturelles (tabias) faisant obstacle contre les émissions de la SIAPE, et ce en plus de l'effet des cheminées.

Ce phénomène a d'ailleurs été signalé par Buchauer (1973) pour certains métaux lourds et par Semadi (1989) pour le fluor.

Les concentrations enregistrées au niveau des feuilles d'amandier montrent que les faibles teneurs sont enregistrées pour la station 16 km avec 0,6 ppm, suivies par celles du site situé à 12 km avec 0,95 ppm. À partir de 8 km, les

Tableau 3. Teneurs moyennes en cadmium (en ppm) des feuilles de quelques espèces cultivées issues des différents sites de prélèvements.

Mean Cadmium content (ppm) of cultivated plants from selected sites.

| Site | Espèce | Olivier | Amandier | Abricotier | Figuier | Rosier |
|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 km | | 1,57 ± 0,17 | 2,93 ± 0,25 | 2,50 ± 0,67 | 2,10 ± 0,48 | 2,00 ± 0,31 |
| 3 km | | — | 2,73 ± 0,50 | 1,92 ± 0,44 | — | 3,10 ± 0,81 |
| 4 km | | — | 3,93 ± 0,40 | — | 3,10 ± 0,61 | — |
| 5 km | | 2,11 ± 0,26 | 3,66 ± 0,30 | 3,00 ± 0,74 | 1,17 ± 0,32 | 1,32 ± 0,39 |
| 8 km | | 1,34 ± 0,28 | 1,63 ± 0,40 | 2,09 ± 0,62 | — | 0,95 ± 0,20 |
| 12 km | | 1,36 ± 0,17 | 0,95 ± 0,04 | 1,10 ± 0,29 | 0,85 ± 0,12 | 0,41 ± 0,07 |
| 16 km | | 0,66 ± 0,06 | 0,60 ± 0,28 | 0,87 ± 0,15 | 0,60 ± 0,07 | 0,30 ± 0,08 |
| Témoin | | 0,21 ± 0,03 | 0,32 ± 0,03 | 0,11 ± 0,04 | 0,20 ± 0,08 | 0,25 ± 0,06 |

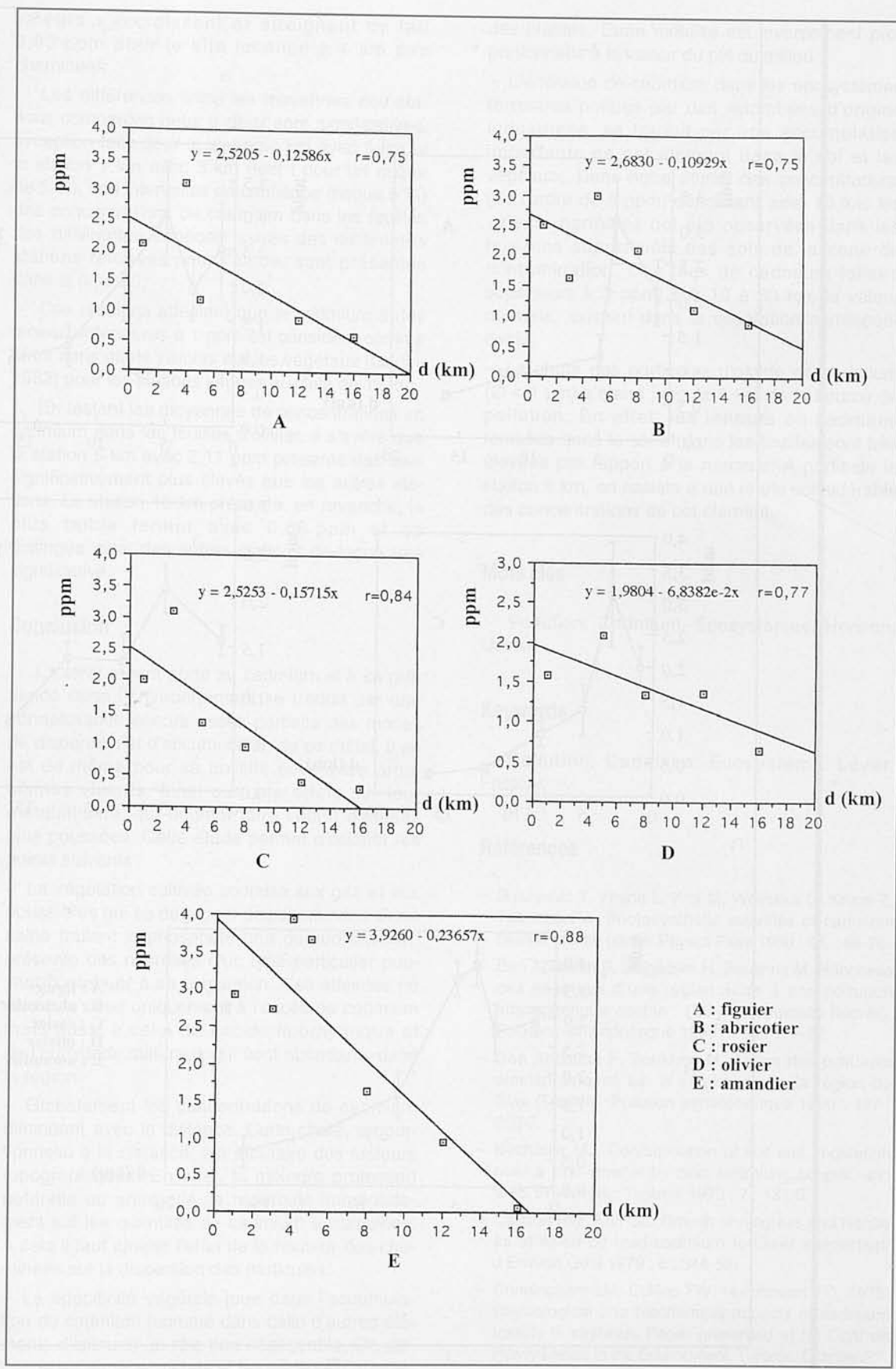


Figure 4.
 Courbes de corrélation entre l'accumulation du cadmium (ppm) dans les feuilles et la distance par rapport à la source de pollution (SIAPE).
 Correlation between cadmium concentration (ppm) in leaves and distance from the source of pollution (SIAPE).

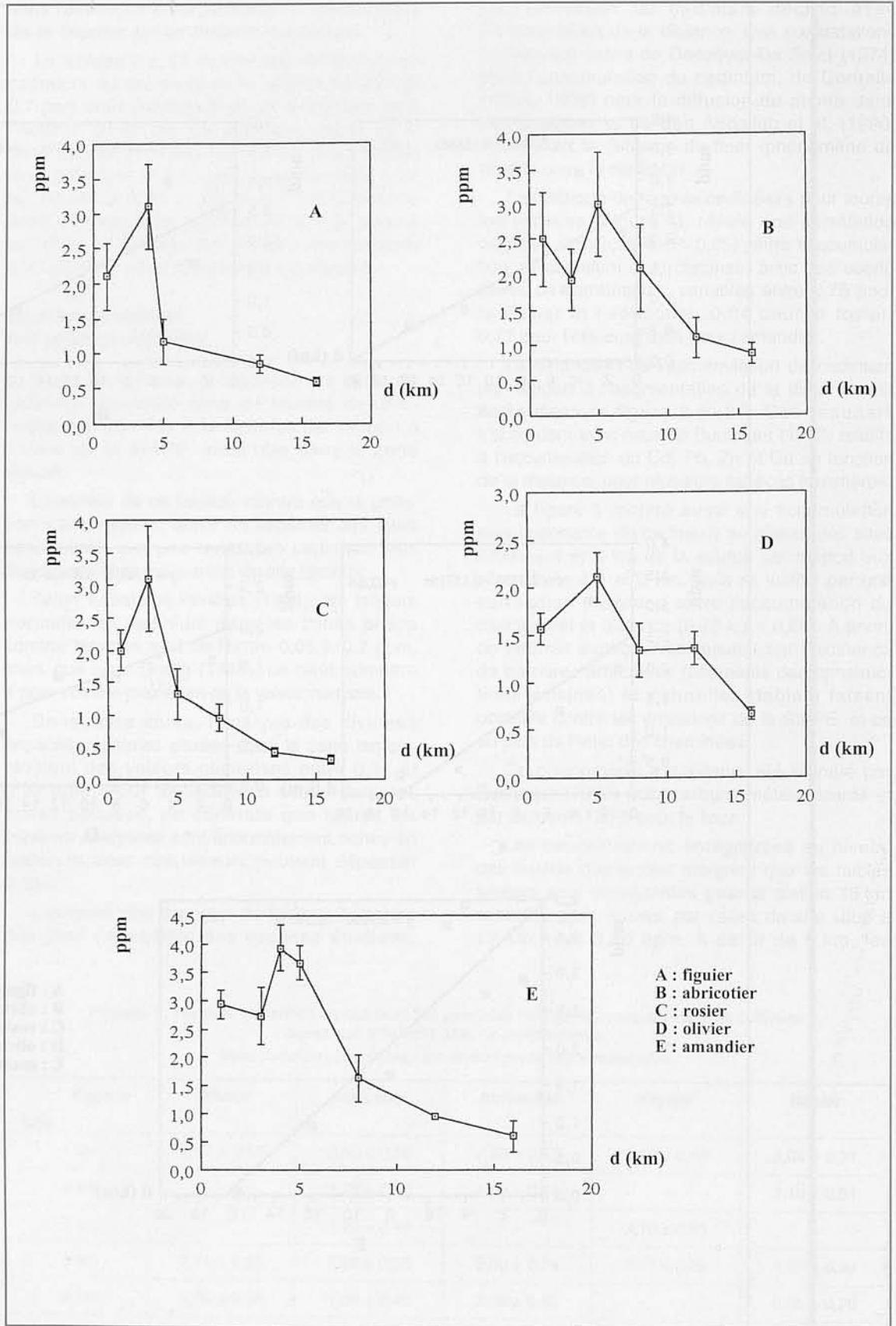


Figure 5.
Teneurs moyennes en cadmium (en ppm) dans les feuilles en fonction de l'éloignement de la source de pollution.
I : intervalle de confiance (95 %).

Mean Cadmium content (ppm) of foliage as a function of distance from the source of pollution.
I : Confidence interval (95 %).

valeurs s'accroissent et atteignent de fait 3,93 ppm pour le site localisé à 4 km des cheminées.

Les différences entre les moyennes des stations comparées deux à deux sont significatives, exception faite pour la station 4 km avec 5 km et la station 1 km avec 3 km (test t pour un risque de 5 %). Les intervalles de confiance (risque 5 %) des concentrations de cadmium dans les feuilles des différentes espèces issues des différentes stations retenues pour l'étude, sont présentés dans la figure 5.

Ces résultats attestent que le cadmium à des teneurs inférieures à 1 ppm est considéré comme étant sans effets visibles sur les végétaux [Godin, 1983] pour les stations situées au-delà de 12 km.

En testant les moyennes de concentrations en cadmium dans les feuilles d'olivier, il s'avère que la station 5 km avec 2,11 ppm présente des taux significativement plus élevés que les autres stations. La station 16 km présente, en revanche, la plus faible teneur avec 0,66 ppm et se distingue ainsi des autres stations de façon très significative.

Conclusion

L'intérêt récent porté au cadmium et à sa présence dans l'environnement se traduit par une connaissance encore assez partielle des modes de dispersion et d'accumulation de ce métal. Il en est de même pour sa toxicité envers les organismes vivants, ainsi que ses effets sur leur métabolisme, qui doivent faire l'objet d'études plus poussées. Cette étude permet d'éclairer les points suivants :

- La végétation cultivée soumise aux gaz et aux poussières qui se dégagent des cheminées d'une usine traitant le phosphate brut du sud tunisien, présente des nécroses d'un type particulier pouvant contribuer à sa disparition. Ces atteintes ne sont pas dues uniquement à l'excès de cadmium mais aussi à celui de l'acide fluorhydrique et de l'anhydride sulfureux qui sont abondants dans la région.
- Globalement les concentrations de cadmium diminuent avec la distance. Cette chute, proportionnelle à la distance, est tributaire des facteurs topographiques. En effet, la moindre protection naturelle ou artificielle se répercute immédiatement sur les quantités de cadmium accumulées. À cela il faut ajouter l'effet de la hauteur des cheminées sur la dispersion des particules.
- La spécificité végétale joue dans l'accumulation du cadmium (comme dans celle d'autres éléments d'ailleurs) un rôle non négligeable. On distingue les espèces riches et les espèces pauvres, aussi bien sur sol contaminé que sur sol normal.
- Le pH conditionne la mobilité du cadmium dans le sol et les possibilités de contamination

des plantes. Cette mobilité est inversement proportionnelle à la valeur du pH du milieu.

- L'émission de cadmium dans les écosystèmes terrestres pollués par des retombées d'origine industrielle, se traduit par une accumulation importante de cet élément dans le sol et les végétaux. Dans notre étude, des concentrations (de l'ordre de 5 ppm) dépassant ainsi 10 fois les valeurs normales ont été observées dans les horizons superficiels des sols de la zone de contamination. Des taux de cadmium foliaire supérieurs à 3 ppm, soit 10 à 30 fois la valeur normale, existent dans la végétation correspondante.

- La chute des particules d'oxyde de cadmium ($\varnothing < 1 \mu\text{m}$) s'étend jusqu'à 5 km de la source de pollution. En effet, les teneurs en cadmium relevées dans le sol et dans les feuilles sont très élevées par rapport à la normale. À partir de la station 8 km, on assiste à une chute considérable des concentrations de cet élément.

Mots clés

Pollution. Cadmium. Écosystèmes. Horizon. Usine.

Keywords

Pollution. Cadmium. Ecosystems. Layer. Factory.

Références

- Baszynski T, Wajda L, Krol M, Wolinska D, Krupa Z, Tukenoorf A. Photosynthetic activities of cadmium treated tomato plants. *Physiol Plant* 1980 ; 48 : 65-70.
- Ben Abdallah F, Belgacem H, Boukhris M. Réponses des végétaux d'une région aride à une pollution atmosphérique double : (SO_2 + composés fluorés). *Pollution atmosphérique* 1994 ; 143 : 117-22.
- Ben Abdallah F, Boukhris M. Action des polluants atmosphériques sur la végétation de la région de Sfax (Tunisie). *Pollution atmosphérique* 1990 ; 127 : 292-7.
- Buchauer MJ. Contamination of soil and vegetation near a zinc smelter by zinc, cadmium, copper, and lead. *Environ Sci Technol* 1973 ; 7 : 131-5.
- Carlson RW, Rolf GL. Growth of ryegrass and fescue as affected by lead-cadmium fertilizer interaction. *J Environ Qual* 1979 ; 8 : 348-52.
- Cunningham LM, Collins FW, Hutchinson TC, 1975. Physiological and biochemical aspects of cadmium toxicity in soybean. Paper presented at Int Conf on Heavy Metals in the Environment, Toronto, October 27.
- Denaeyer-De Smet S. Premier aperçu de la distribution du cadmium dans divers écosystèmes terrestres non pollués et pollués. *Revue Oecol Plant* 1974 ; 9 (2) : 169-82.

- Déruelle S. Écologie des lichens du bassin parisien. Impact de la pollution atmosphérique (engrais, SO₂, Pb) et relation avec les facteurs climatiques. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris 1983 : 300 p.
- Déruelle S. La fiabilité des lichens comme bio-indicateurs de la pollution plombique. *Écologie* 1996 ; 27 (4) : 285-90.
- Godin P. Les sources de pollution des sols : Essai de quantification des risques dus aux éléments traces. *Science du sol* 1983 ; 2 : 73-88.
- Hara T, Sonoda Y. Comparaison of toxicity of heavy metals to cabbage growth. *Plant Soil* 1979 ; 51 : 127-33.
- Kabata A, Pendias H. Trace elements in soil and plants. CRC Press Inc., Boca Raton, FL 1984 : 315 p.
- Mortvedt JJ, Mays DA, Osborn G. Uptake by wheat of cadmium and other metal contaminants in phosphate fertilizers. *J Env Qual* 1981 ; 10 (2) : 193-7.
- Muller KW, Payer HD. The influence of zinc and light conditions on the cadmium repressed growth of the green alga *Coelastrum proboscideum*. *Physiol Plant* 1980 ; 50 : 265-8.
- Semadi A. Effets de la pollution atmosphérique (pollution globale, fluorée et plombique) sur la végétation dans la région d'Annaba (Algérie). Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris 1989 : 339 p.