

Relations entre métaux traces dans le tabac et la nature du sol au Liban

Zeinab Saad^{1,2}
Véronique Kazpard^{1,2}
Antoine El Samrani^{2,3}
Kamal Slim^{1,2}
Philippe Nabhan¹

¹ Université libanaise,
Faculté des sciences,
Hadath,
Choueifat,
Beyrouth
Liban

² Commission libanaise de l'énergie
atomique,
Conseil national de la recherche scientifique
(CNRS),
Route de l'aéroport,
P.O. Box 11-8281,
Liban
<zsaad@cnrs.edu.lb>
<vkazpard@cnrs.edu.lb>

³ USEK,
Faculté des sciences et de génie
informatique,
Jounieh
BP 446
Liban
<antoineelsamrani@usek.edu.lb>

Résumé

La présente étude a pour but de déterminer les concentrations de macroéléments et de microéléments dans plusieurs échantillons de sols et de plants de tabac pris dans différentes régions agricoles pour étudier l'influence de la nature du sol sur la qualité du tabac, le transfert des métaux par le sol, leur accumulation dans les feuilles du tabac et leur source d'émission. Dans la région de Nabatiyeh, les résultats obtenus montrent que les deux champs agricoles ont des impacts anthropiques différents. Le facteur de transfert sol-tabac dans ces champs est calculé pour tous les éléments afin de déterminer leur source. Les macronutriments sont biodisponibles dans le sol pour les plantes de tabac, alors que certains micronutriments sont faiblement absorbés dans un sol alcalin. Une analyse en composantes principales réalisée pour les micronutriments du sol et des feuilles de tabac de la région Nabatiyeh, a permis de déterminer les différents facteurs qui contribuent à la distribution des métaux dans différents compartiments. Une autre analyse chimique du tabac et du sol correspondant est réalisée sur quatre régions agricoles ayant des caractéristiques géologiques et pédologiques différentes. L'ordre de variation des macroéléments est $Ca > Mg > Na > K$ dans toutes les régions étudiées. L'étude du transfert des nutriments du sol au tabac dans ces régions montre que plus la couche est d'âge géologique jeune, plus le transfert sol-plante est élevé. Dans la région d'Akkar, le développement des minéraux argileux provoque une complexation des micronutriments et la diminution de leur biodisponibilité au niveau des plantes de tabac.

Mots clés : tabac (plante) ; sol ; microélément ; macronutriment.

Thèmes : productions végétales ; méthodes et outils.

Abstract

Relation between tobacco trace metals and soil type in Lebanon

The aim of this study was to determine the concentrations of nutrients in soil and tobacco samples from different agricultural regions. We studied the influence of soil type on tobacco quality and the transfer and accumulation of trace metals in tobacco leaves. The results showed that human activities in the Nabatiyeh region had a more pronounced effect on one agricultural plot than on its neighbor. The transfer factors of elements between soil and tobacco plants showed that major constituents are leached and absorbed from the soil, whereas some trace elements are finely absorbed from the alkaline soil. Statistical analysis of the micronutrients in soil and plants confirmed the existence of two principal factors that control the distribution of elements in different compartments. Four tobacco plots in different regions were also studied as a function of their pedologic and geologic characteristics. The major elements varied in all regions, but were always ordered $Ca > Mg > Na > K$. The highest transfer factor for nutrients was found in young soil layers. In the Akkar region, clay minerals form complexes with micronutrients, thereby reducing their absorption by tobacco plants.

Key words: tobacco (plant); soil; microelements; macronutrients.

Subjects: vegetal productions; tools and methods.

Les nutriments essentiels présents dans le sol et absorbés par les plantes sont divisés en macro et micronutriments, avec des fonctions et des concentrations différentes. Les macronutriments présents dans le sol sont l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre, absorbés pour la plupart sous une forme ionique. Le déficit en ces macronutriments affecte la croissance des plantes, leur métabolisme et leur tolérance aux maladies. Dans la plupart des sols libanais, le manque d'azote, de soufre, de phosphore et de potassium est compensé par l'utilisation de fertilisants. En revanche, les éléments alcalins de calcium et de magnésium sont présents en grande concentration puisque la plupart des sols au Liban sont calcaires et se forment à partir de roches mères calcaires et dolomitiques [1].

Les micronutriments essentiels pour le développement de toute plante sont le sodium, le fer, le chlore, le bore, le manganèse, le zinc, le cuivre, le molybdène et le nickel. Ces micronutriments sont adsorbés sur la fraction minérale ou organique du sol selon un ordre dépendant principalement du pH du sol et de l'état d'hydrolyse du métal [2, 3]. Les feuilles des plantes accumulent surtout le fer, le cuivre, le cobalt et le cadmium [4]. Certains micronutriments sont disponibles sous forme ionique dans le sol, d'autres forment des complexes organométalliques ou des complexes argileux. La disponibilité des micronutriments pour les plantes est largement déterminée par l'abondance du minéral dans la roche mère, le pH et la composition du sol [5]. D'autres éléments métalliques traces comme le plomb, présent dans la croûte terrestre et dans tous les compartiments du sol, se trouvent également absorbés par les plantes. Les facteurs affectant la mobilité et la biodisponibilité du plomb dans les sols sont donc le pH, la texture du sol - qui dépend surtout de la teneur en argile - et la teneur en matière organique [6].

Le pH des sols au Liban varie entre 7,5 et 8, une marge pour laquelle la disponibilité du fer, du manganèse et du zinc diminue. En effet, l'étude du mouvement des métaux dans le sol montre que, pour la plupart d'entre eux, les métaux apportés aux sols calcaires ont tendance à rester à la surface [7-10].

À côté des sols rouges méditerranéens formés sur roches dures carbonatées, habituellement observés au Liban, se for-

ment des sols de couleur brune ou partiellement brunifiés. Les sols bruns et rouges du Liban diffèrent par l'absence de quantités notables de fer amorphe et par de fréquentes accumulations de carbonates de calcium en profondeur. La couleur brune du sol est liée à un milieu très pluvieux et dont le drainage est ralenti pour diverses raisons, topographiques et lithologiques [11].

Le tabac constitue l'une des productions les plus répandues du point de vue économique et industriel au Liban. Cette culture représente plus de 10 % de l'ensemble des revenus agricoles du pays et concerne plus de 300 000 familles. La culture du tabac est localisée au sud du pays (2/3 de la production) ainsi qu'au nord et dans la plaine de la Bekaa. Actuellement, on estime la production annuelle du tabac à 10 000 tonnes. Une augmentation de cette production est attendue dans les prochaines années, ce qui explique l'intérêt porté à l'amélioration de la production de la qualité du tabac au Liban.

En raison des compositions minéralogiques différentes des sols, la qualité du tabac produit diffère selon les régions. Les impacts anthropiques influencent également la composition en micronutriments du sol et des feuilles de tabac. Par ailleurs, le tabac étant une plante à croissance rapide, l'aptitude à l'accumulation des métaux traces (cadmium, zinc et cuivre) puisés dans le sol est élevée [8]. En effet, les plants de tabac sont considérés comme hyperaccumulateurs du cadmium dans les feuilles [12]. Ce coefficient d'hyperaccumulation est défini comme étant le rapport de la concentration du cadmium dans les feuilles du tabac divisée par la concentration du cadmium dans le sol [13, 14]. En revanche, le tabac accumule très peu de plomb de par les sols, et les traces de plomb que l'on retrouve sur les plantes émanent en général d'une source atmosphérique. La détermination du transfert des métaux lourds vers les plants de tabac est évidemment fondamentale pour l'identification de leur source. L'important est de déterminer la fraction biodisponible, c'est-à-dire l'aptitude d'un élément trace à être transféré à la plante. La fraction non disponible correspond à la sorption des métaux par les minéraux argileux, par la calcite ou par la fraction organique du sol [15].

Pour connaître le degré de contamination d'un sol, il ne suffit pas de confronter ses résultats aux valeurs seuils d'une réglementation internationale ou à des références étrangères. Il est nécessaire d'esti-

mer d'abord le fond pédogéochimique local, c'est-à-dire de déterminer les concentrations naturelles en nutriments présents dans un sol, résultant uniquement de l'évolution géologique et pédologique, en absence de tout apport lié aux activités anthropiques et agricoles. La présente étude cherche à déterminer les concentrations des macroéléments dans différents échantillons de sols et de plantes de tabac. Ces échantillons sont pris dans différentes régions agricoles afin de déterminer l'influence de la nature du sol sur la qualité du tabac. L'étude des microéléments dans les mêmes échantillons a pour but de déterminer le transfert des métaux par le sol, leur accumulation dans les feuilles de tabac et leur source d'émission (dépôt atmosphérique sur les feuilles ou biodisponibilité dans le sol) [16]. Un échantillonnage similaire est fait sur les sols et les feuilles des plantes de ronce (*Rubus fruticosus*) qui se développent en grande quantité à proximité des champs de culture de tabac afin d'avoir des valeurs de référence pour estimer la contribution anthropique ou pédogéochimique sur la teneur en nutriments dans le sol et les plantes.

Matériel et méthode

Les échantillons sont prélevés durant deux années consécutives (2003-2004) dans différentes régions agricoles libanaises où la culture du tabac est très fréquente et traditionnellement connue. L'échantillonnage prend en considération la différenciation géologique, pédologique, urbaine, et climatique entre les différents terrains (*figure 1, tableau 1*). Les régions d'échantillonnage sont, du nord au sud :

- 1a région d'Akkar, datée du Cénozoïque avec des affleurements basaltiques. Les sols qui se forment sont décalcarifiés et de couleur brune. Leur structure est polyédrique, et de texture argileuse ; ils peuvent être considérés comme des sols bruns méditerranéens où l'érosion est intense et où les sols formés sont jeunes, peu profonds, à structure pas très bien développée. Ils contiennent beaucoup de matériaux non altérés [17] ;
- la région de Koura, datée du Miocène avec un terrain calcaire. Les sols qui se forment sont de type rendzine assez fortement calcaires. Parfois la décalcarification est totale à la partie supérieure des profils [17] ;

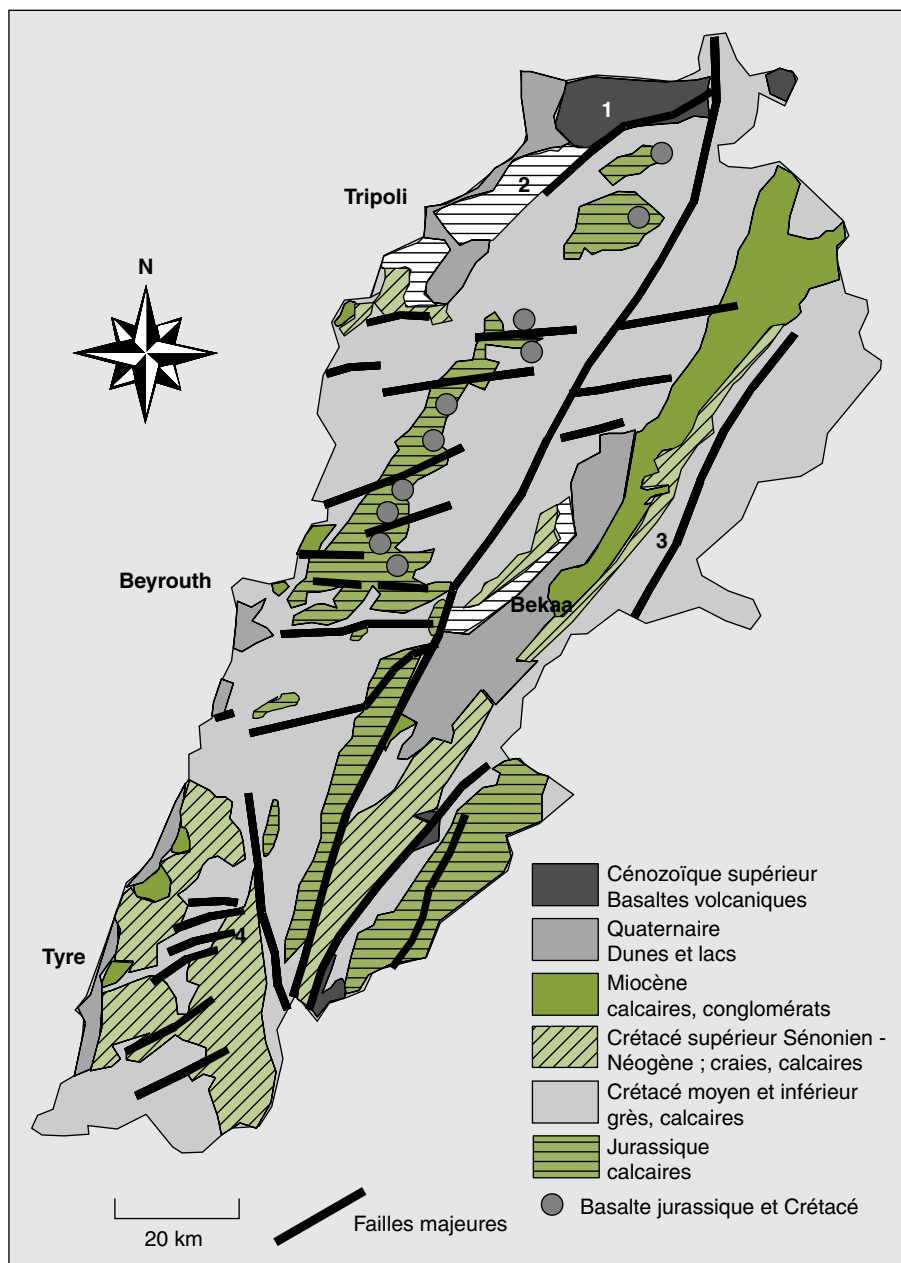


Figure 1. Carte géologique des sites étudiés.

Figure 1. Localization of the agricultural lands studied.

Régions correspondantes : 1 : Akkar ; 2 : Koura ; 3 : Baalbeck ; 4 : Nabatiyeh.

– la région de Nabatiyeh, datée du Sénonien–Néogène avec des affleurements de craie et de calcaire. Les sols sont bruns, argileux et calcaires ;

– la région de Baalbeck, datée du Crétacé inférieur et moyen avec un terrain calcaire et gréseux [1]. Au-dessus des grès, le calcaire est oolithique et intercalé d'argiles et de marnes. Sur ces calcaires s'observent des sols bruns décarbonatés, mais le plus souvent, l'altération rapide des calcaires oolithiques et les remaniements

fréquents favorisent la recarbonatation et la formation de sols bruns calcaires [11].

Les caractéristiques générales des sols étudiés telles que le pH, la fraction argileuse et le pourcentage en matières organiques sont présentées dans le *tableau 1*. Une autre campagne d'échantillonnage est effectuée dans deux champs agricoles de tabac cultivés dans une même région située au sud (la région de Nabatiyeh). Ces deux champs sont caractérisés par un impact anthropique différent.

L'échantillonnage des feuilles de tabac et de leur sol relatif est pris dans 14 points afin de couvrir la totalité de la surface du champ étudié. D'autres échantillons de végétaux (ronce) et de leur sol sont également pris dans la région de Nabatiyeh afin de calculer le facteur de transfert sol-plante. En effet, les plants de ronce sont les plus disponibles dans la région d'échantillonnage durant la période d'étude.

L'extraction de la totalité des métaux est faite par digestion acide selon la méthode suivante :

– des quantités de feuilles de tabac (ou de végétaux) sont broyées et tamisées (16 mm) pour avoir des granulés homogènes. À partir de chaque échantillon, une quantité de 0,5 g de tabac ou de végétaux (poudre fine) est introduite dans un tube à essai. Ensuite, un mélange de 5 mL de HNO₃ 10 % (v/v) et mL de HClO₄ 10 % (v/v) est ajouté à chaque tube ;

Après dissolution dans les solutions acides, les poudres sont séchées à une température de 150 °C pendant une nuit, puis dissoutes dans 50 mL d'eau distillée. Le contenu de chaque tube est filtré sur un filtre *Millipore* (0,45 µm) et les filtrats sont conservés à une température de 4 °C.

Le même procédé de préparation est adopté pour les échantillons de sol, sauf que l'on ajoute au début 2 mL d'acide fluorhydrique (HF 40 %) afin de dissoudre toute la fraction minérale [18].

L'analyse a été effectuée par absorption atomique, en utilisant pour les métaux

Tableau 1. Caractéristiques générales des différents sols étudiés.

Table 1. General characteristics of the different soils studied.

Sols des régions étudiées	pH	Matières organiques (%)	Fraction argileuse (g/kg)
Akkar	7,5	15,8	529,6
Koura	7,5	6,0	281,4
Nabatiyeh	8,0	6,6	335,4
Baalbeck	7,8	8,0	346,0

Tableau 2. Comparaison des teneurs des micronutriments du sol de référence avec les sols des champs 1 et 2 de la région de Nabatiyeh.

Table 2. Comparison of concentrations of micronutrients between a reference soil and two agricultural lands in the region of Nabatiyeh.

Échantillons	Fe µg/g	Zn µg/g	Mn µg/g	Ni µg/g	Pb µg/g	Cu µg/g	Cd µg/g	Cr µg/g
Sol référence	967,77	1 087,02	73,42	104,45	37,21	60,98	3,81	136,64
Champ 1	3 639,88	236,95	86,5	107,55	17,54	60,09	2,42	124,24
Champ 2	4 258,07	2 162,95	577,33	153,91	67,06	87,73	4,8	81,85

majeurs Ca, Na, K, Mg une flamme air-acétylène, alors que les métaux traces sont analysés en utilisant le four en graphite.

Résultats et discussion

Analyse d'un sol de référence

Un sol de référence est choisi par rapport aux sols de tabac étudiés dans différentes régions. Ce sol de référence est loin de toute source de pollution agricole ou d'activité humaine. Des échantillons du sol de référence sont analysés pour chaque campagne d'échantillonnage, et de la même manière que ceux du sol de tabac. L'analyse des macronutriments montre des concentrations similaires à celles des sols de tabac pour les éléments de calcium, magnésium, potassium et sodium. En revanche, les micronutriments (Fe, Zn, Mn, Ni, Pb, Cu, Cd, Cr) du sol de référence montrent en général des concentrations moindres que celles des sols des champs 1 et 2 de tabac (tableau 2).

Le tableau 2 montre que dans le champ 2 les concentrations des micronutriments sont plus élevées que celles du sol de référence et du champ 1. Cela montre l'impact anthropique plus prononcé au niveau du champ 2.

Le sol de référence est également comparé aux valeurs standard mondiales, appelées valeurs seuils pour tous les types de sols non contaminés [19]. La figure 2 montre que notre sol est caractérisé par des concentrations en micronutriments inférieures à celles proposées pour les valeurs standard mondiales, à l'exception du nickel dont la concentration est le double dans le sol de référence. Cette valeur élevée du nickel peut être attri-

buée à une pollution ponctuelle provenant d'un environnement proche des champs agricoles [20].

Nature du sol et tabac cultivé dans deux champs différents

La figure 3 montre la variation en macronutriments dans le sol et les feuilles de tabac des deux champs 1 et 2 de la région Nabatiyeh. Les concentrations en Ca, Na, K et Mg dans le sol sont similaires dans les deux champs. La concentration en calcium atteint environ 115 mg/g, montrant un sol caractéristique de la région étudiée à Nabatiyeh. Des études préliminaires ont classé le sol de la région

comme un sol brun formé sur roches calcaires sénoniennes ayant une concentration en CaCO₃ de 98,7 % [17].

Cette teneur en Ca dans le sol se reflète au niveau des feuilles de tabac, avec une valeur de 7 mg/g qui est la plus élevée par rapport aux autres macronutriments. La figure 3 montre que la variation globale des macronutriments dans le sol et les feuilles de tabac est presque équivalente, à l'exception de la teneur du potassium qui est plus élevée que celle du magnésium et le sodium dans les feuilles de tabac. Cette concentration en potassium est d'origine anthropique et provient spécifiquement du dépôt direct des insecticides appliqués sur les feuilles de tabac [21], alors que les éléments Ca, Na et Mg proviennent du fond géochimique du sol. Ce fait est vérifié par la forte

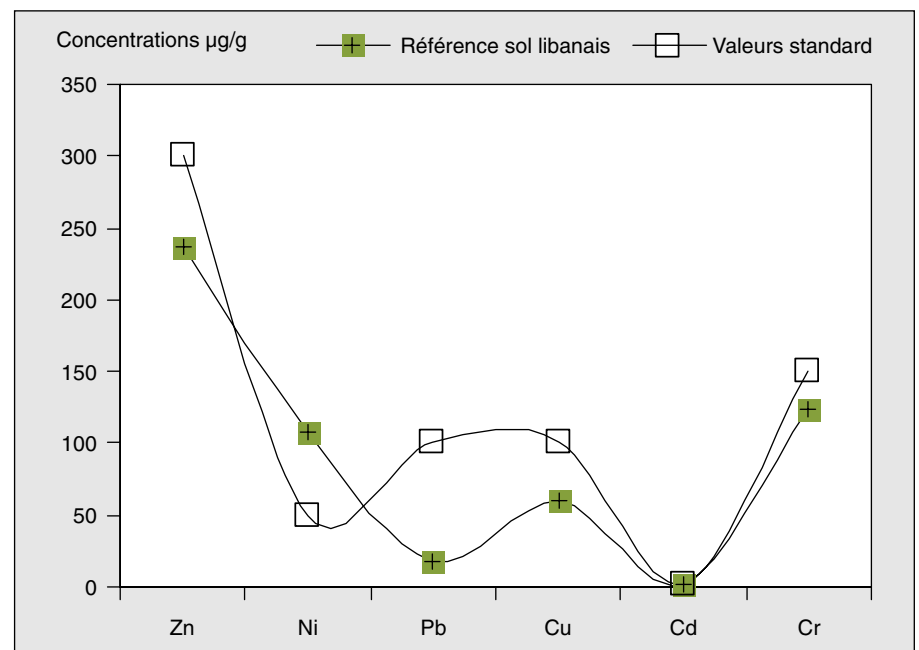


Figure 2. Comparaison des variations des teneurs en micronutriments dans un sol référence libanais et les valeurs seuils mondiales.

Figure 2. Comparison of levels of nutrients in a reference Lebanese soil and international standard values.

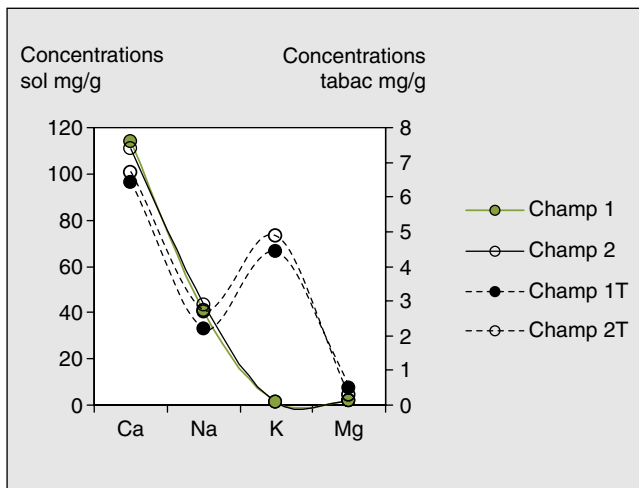


Figure 3. Variation en macronutriments dans le sol et les feuilles de tabac des deux champs 1 et 2 de la région de Nabatiyeh.

Figure 3. Variation of macronutrients in tobacco leaves and corresponding soil in two agricultural lands of the region of Nabatiyeh.

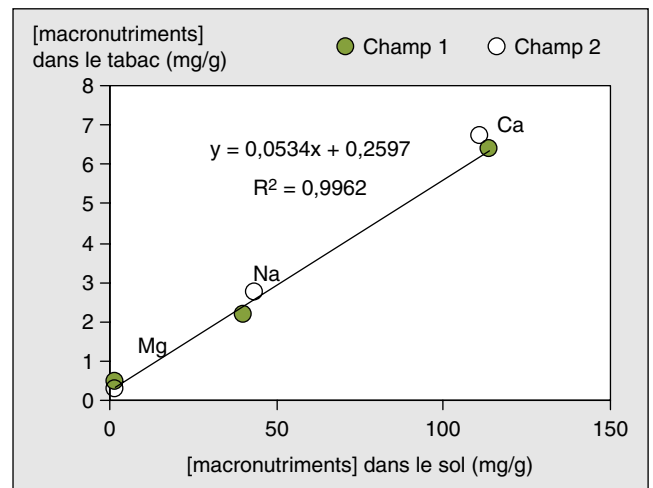


Figure 4. Courbe de corrélation des macronutriments dans le sol et les feuilles de tabac de la région de Nabatiyeh.

Figure 4. Correlation curve of macronutrients in tobacco leaves and corresponding soil in the region of Nabatiyeh.

corrélation ($r^2 = 0,99$) qui lie la variation de ces éléments, à l'exception de K, dans le sol et le tabac (figure 4).

La variation des micronutriments Ni, Pb, Cu et Cd est similaire dans le sol et le tabac des deux champs (figure 5). En effet, la disponibilité des micronutriments provenant de l'évolution géochimique du sol, dépend du pH du sol, de leur abondance dans la roche mère et de leur complexation avec la matière organique du sol [22]. Le cuivre, qui se trouve en concentration la plus élevée dans le tabac, est le plus disponible parmi les autres éléments à pH 8 (pH du sol du site étudié). La concentration en Fe, Zn, Mn

et Cr est plus élevée dans le sol du champ 2 que dans celui du champ 1. Parmi tous les micronutriments, le fer possède le taux le plus élevé dans le sol. Ce constat est en accord avec les teneurs élevées (0,2 %) rapportées par Lamouroux [17] pour la même région.

Dans les feuilles de tabac, la concentration en zinc est la plus élevée parmi tous les autres micronutriments. Cette teneur dans les feuilles peut provenir soit de la disponibilité du zinc qui est plus élevée que celle du fer et du manganèse dans le sol à pH 8, soit de la propriété hyperaccumulatrice du plant de tabac pour ce métal [23].

Pour déterminer la source du zinc dans le tabac, on calcule le facteur de transfert entre le plant de tabac et le sol selon l'équation suivante :

$$\text{Facteur de transfert} = \frac{[\text{métal dans le tabac}] - [\text{métal dans le sol}]}{[\text{métal dans la végétation}] - [\text{métal dans le sol de végétation}]}$$

Les végétaux pris pour le calcul du facteur de transfert sont les feuilles de ronce et leur sol respectif.

Pour le métal zinc, le facteur de transfert trouvé est de l'ordre de 9, montrant une hyperaccumulation dans les feuilles de tabac qui se trouve tolérant au métal Zn

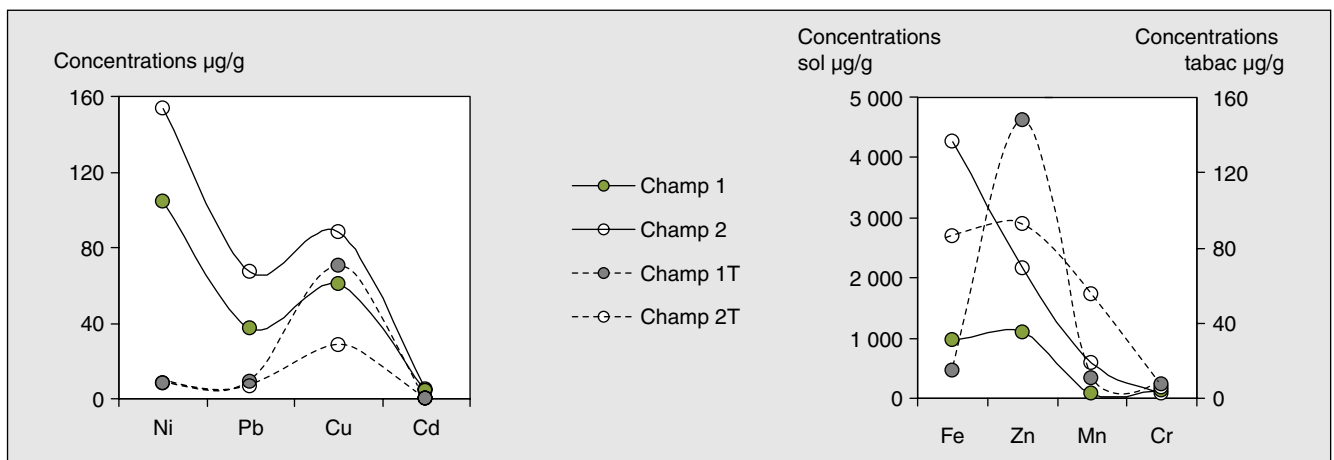


Figure 5. Variation des micronutriments dans le sol et les feuilles de tabac des deux champs 1 et 2 de la région de Nabatiyeh.

Figure 5. Variation of micronutrients in tobacco leaves and corresponding soil in two agricultural lands of the region of Nabatiyeh.

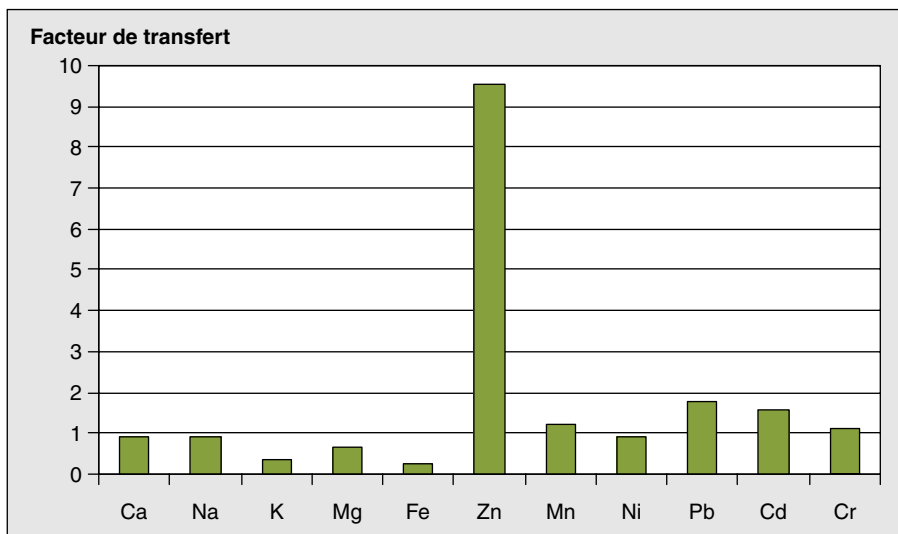


Figure 6. Facteur de transfert entre le sol et le tabac pour les macro- et micronutriments dans le champ 1 de la région de Nabatiyeh.

Figure 6. Transfer factor of nutrients in field 1 in the region of Nabatiyeh.

[23]. La *figure 6* montre les valeurs du facteur de transfert entre le sol et le tabac pour les macro- et micronutriments. Les éléments Ca, Na, K, Mg, Fe et Ni possèdent un facteur de transfert inférieur à 1. Ces éléments sont particulièrement biodisponibles dans le sol pour les plantes de tabac. Leur aptitude à être transférée au plant de tabac est assez élevée. Les

autres micronutriments Mn, Cd, Cr ayant un facteur de transfert supérieur à 1, sont faiblement absorbés dans un sol alcalin. De plus le plomb, qui présente le facteur de transfert le plus élevé, est difficilement absorbé par les plantes. Dans les sols, la présence de plomb est naturelle ou résulte des retombées atmosphériques et, localement, du recyclage des batteries

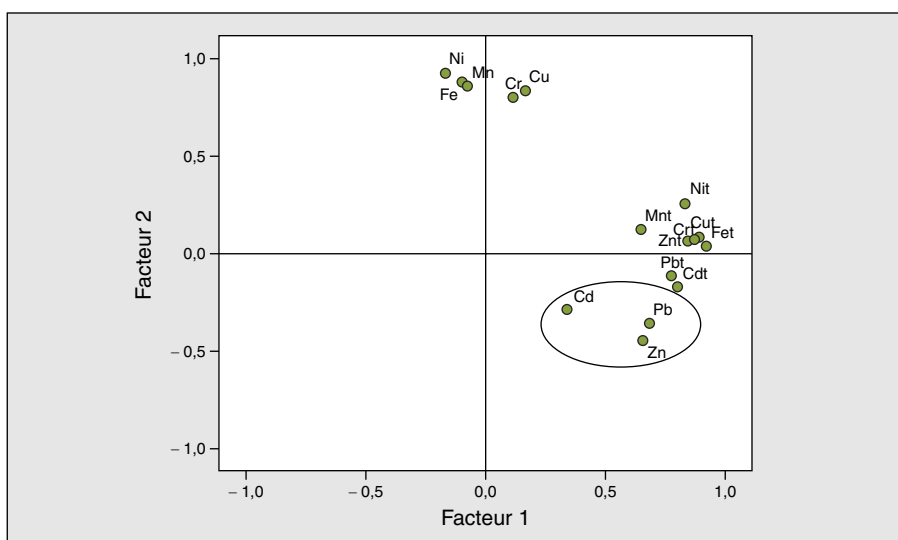


Figure 7. Analyse en composantes principales des micronutriments dans les feuilles et le sol de tabac du champ 1 de la région de Nabatiyeh.

Figure 7. Principal component analysis of different micronutrients in tobacco leaves and soil of field 1 in the region of Nabatiyeh.

Mnt, Crt, Pbt, Fet, Cut, Nit : métaux dans les feuilles de tabac.

électriques. La mobilité du plomb dans le sol est très faible et il a tendance à s'accumuler dans les horizons de surface et plus précisément dans les horizons riches en matière organique. Cela s'explique par la grande affinité de la matière organique et de l'argile pour le plomb. Cette donnée est valable pour le plomb naturel mais également pour le plomb anthropique, et spécialement pour des sols ayant au moins 5 % de matière organique et un pH supérieur à 5 [4].

L'analyse en composantes principales (ACP) des micronutriments présents dans le sol et dans les feuilles de tabac, permet de définir deux facteurs principaux avec des pourcentages de variance de 40 % pour F1 et 30 % pour F2. Les facteurs F1 et F2 déterminent respectivement l'origine des micronutriments dans les feuilles de tabac et dans le sol (*figure 7*). Par rapport à F1, les micronutriments analysés dans les feuilles de tabac sont corrélés entre eux. Cette corrélation se retrouve au niveau des micronutriments dans le sol par rapport au facteur F2, à l'exception du groupe d'éléments Zn, Pb, Cd. Ce dernier est anticorrélé avec les autres micronutriments du facteur F2 (*figure 7*).

L'anticorrélation des éléments Zn, Pb et Cd est liée à une différenciation de leur origine anthropique, leur biodisponibilité et leur complexation dans le compartiment sol. Ce groupe de micronutriments possédant une faible contribution au niveau des facteurs F1 et F2, est caractérisé par un facteur de transfert sol-plante supérieur à 1. Les autres micronutriments ayant une contribution élevée dans le plan F1-F2, sont marqués par un facteur de transfert inférieur à 1.

L'analyse en composantes principales est également réalisée pour les micronutriments analysés au niveau des feuilles de tabac du champ 2 de la région de Nabatiyeh (*figure 8*). La distribution dans le plan F1-F2 montre trois groupes distincts. Le premier, avec une contribution élevée pour le facteur F1, est caractérisé par une concentration normale dans les feuilles montrant une biodisponibilité des nutriments Fe, Mn et Cr pour les plants de tabac. Un deuxième groupe, corrélé au niveau du facteur F2, est défini par une hyperaccumulation des éléments Zn et Cu. Ces éléments sont prédéfinis, dans l'analyse chimique des métaux traces, comme étant hyperaccumulés dans les feuilles de tabac [16]. Un troisième groupe d'éléments Cd et Pb, caractérisé par une contribution moyenne dans le plan F1-F2, correspond à une déposition anthropique

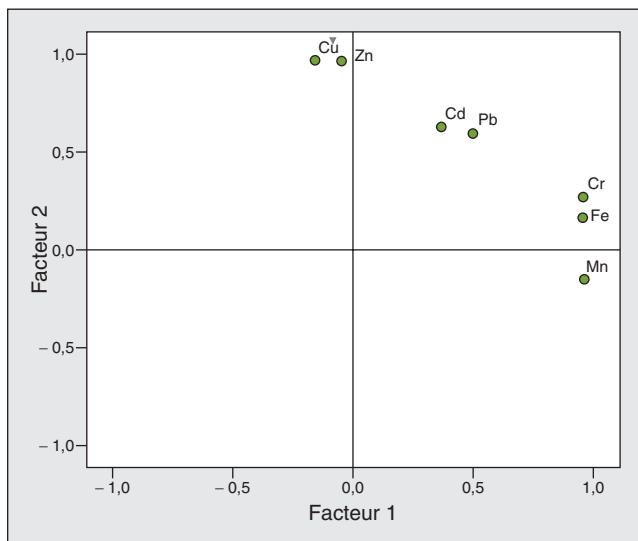


Figure 8. Analyse en composantes principales des micronutriments dans les feuilles de tabac du champ 2 de la région de Nabatiyeh.

Figure 8. Principal component analysis of different micronutrients in tobacco leaves and soil of field 2 in the region of Nabatiyeh.

dans les feuilles de tabac. Cette distribution des micronutriments des feuilles de tabac dans le plan F1-F2 est en concordance avec les résultats décrits auparavant pour le transfert des micronutriments des compartiments sol-plante au niveau du champ 1. En effet, les éléments Pb et Cd ont une origine anthropique dans le tabac des deux champs; les autres micronutriments sont transférés du sol aux plantes de tabac, mais dans ce cas avec différents taux de transfert.

Nature du sol et tabac cultivé dans différentes régions agricoles

L'analyse de la composition chimique du tabac et du sol correspondant est faite sur quatre régions agricoles ayant des caractéristiques géologiques et pédologiques différentes. La *figure 9* montre la variation des éléments Mg, Na et K en fonction des régions étudiées. Dans la région d'Akkar

où le sol se développe sur du basalte, le magnésium est presque deux fois plus élevé que dans les autres régions où les sols sont formés sur des calcaires. En général, le magnésium ne représente que quelques pour cent du calcium (7-8%). Les teneurs en Ca varient entre 96 % et 98 % (de la roche totale) dans tous les sols analysés, montrant un sol riche en calcaire. Les teneurs en potassium et sodium sont souvent faibles dans toutes les régions étudiées. L'ordre de variation des éléments est comparable à celui rapporté dans la littérature ($Ca > Mg > Na > K$) dans toutes les régions étudiées [17].

La *figure 10* montre la variation des macronutriments dans les feuilles de tabac en fonction de leurs concentrations dans le sol des différentes régions. Des variations linéaires sont obtenues pour les différentes régions de Koura, Akkar, Baalbeck et Nabatiyeh, indiquant le transfert des macronutriments à partir du sol dans le tabac. La pente des droites, variant selon les régions, est la plus élevée pour la région de Koura et la plus faible pour la région de Baalbeck. Les régions de Nabatiyeh et d'Akkar varient selon des droites intermédiaires. La diminution progressive des pentes des droites est en liaison étroite avec l'âge de la couche géologique du sol, à l'exception d'Akkar dont la nature du sol (basaltique) est différente de celle des autres régions (dotées d'un sol calcaire). En comparant les régions de même nature pédologique, on remarque que plus la couche est d'âge

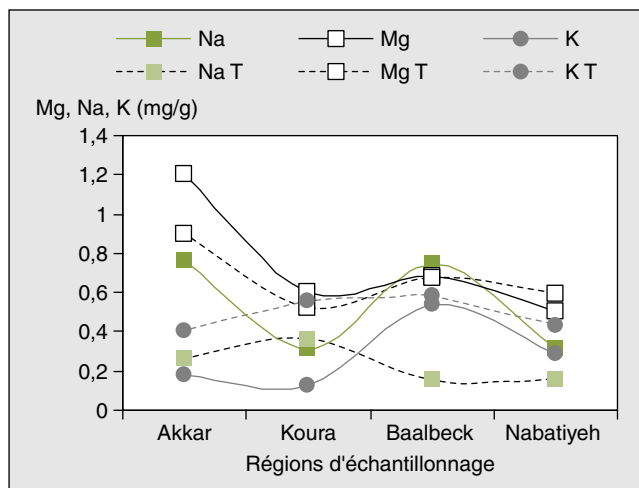


Figure 9. Variation des éléments Mg, Na et K en fonction des différentes régions agricoles.

Figure 9. Variation of Mg, Na and K elements in the different agricultural regions studied.

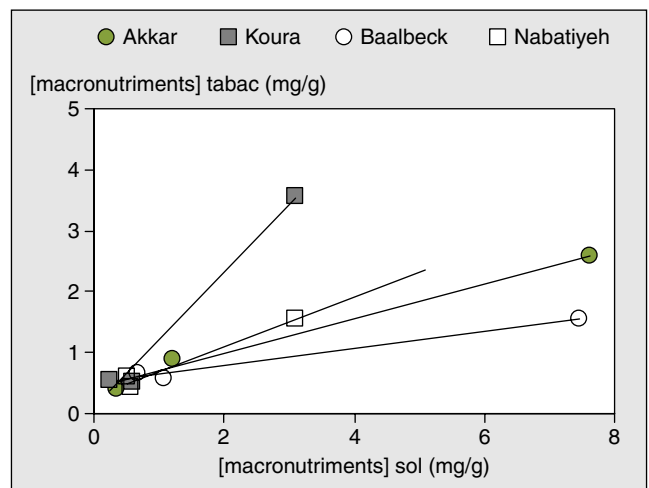


Figure 10. Variation des teneurs des macronutriments dans les feuilles de tabac en fonction de leurs concentrations dans le sol des différentes régions étudiées.

Figure 10. Variation of macronutrients in tobacco leaves as a function of their concentrations in the soil of the different agricultural regions studied.

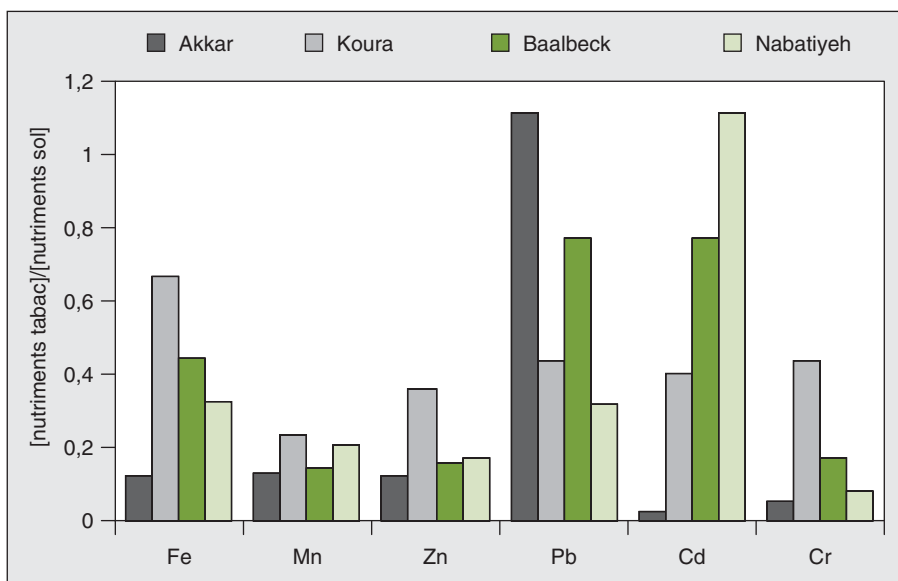


Figure 11. Variation du rapport des concentrations des micronutriments dans les feuilles du tabac et le sol des différentes régions étudiées.

Figure 11. Variation of the ratio of micronutrient concentrations in tobacco leaves and soil of the different agricultural regions studied.

géologique jeune, plus le transfert des macronutriments du sol aux plantes est élevé. Cet ordre se retrouve dans la région de Koura (Miocène) qui marque un transfert des macronutriments plus élevé que les dans les régions de Nabatiyeh (Sénonien–Néogène) et de Baalbeck (Crétacé inférieur et moyen).

La figure 11 montre la variation du rapport des concentrations des micronutriments (Fe, Mn, Zn et Cr) dans les feuilles de tabac et le sol. La région d'Akkar montre les rapports les moins élevés pour tous les éléments.

La formation basaltique de cette région permet le développement de minéraux argileux néoformés (tableau 1), qui forment des complexes avec les oxydes et hydroxydes métalliques et des complexes organo-argileux [17]. Cette inhibition diminue la biodisponibilité des micronutriments au niveau des plants de tabac [15]. Dans les sols calcaires des autres régions, le taux des minéraux argileux est différent. La région de Koura (d'âge Miocène), ayant la fraction argileuse la plus faible (tableau 1), montre les rapports en micronutriments les plus élevés avec un transfert important entre le sol et le tabac. Cette région montre aussi le transfert le plus élevé pour le cuivre ($[Cu_{\text{tabac}}]/[Cu_{\text{sol}}] = 10$), alors que pour les autres régions le rapport est compris entre 1 et 2. Les éléments Pb et Cd, marqués comme étant d'origine anthropique, proviennent soit d'un dépôt atmosphérique

direct sur les feuilles, soit de leur transfert à partir du sol. Les rapports $[Pb_{\text{tabac}}]/[Pb_{\text{sol}}]$ et $[Cd_{\text{tabac}}]/[Cd_{\text{sol}}]$ sont les plus élevés respectivement dans les régions d'Akkar et de Nabatiyeh, marquant un impact anthropique plus important que dans d'autres régions.

Conclusion

L'étude de la composition chimique des plants de tabac et des sols correspondants de la région de Nabatiyeh montre que les éléments Ca, Mg et Na proviennent essentiellement du fond géochimique du sol. Le facteur de transfert sol-tabac a permis de définir deux groupes d'éléments : les éléments ayant un facteur inférieur à 1 (Ca, Na, K, Mg, Fe et Ni) sont particulièrement biodisponibles dans le sol pour les plants de tabac. Les autres micronutriments Mn, Cd, Cr ayant un facteur de transfert supérieur à 1, sont faiblement absorbés dans un sol alcalin. De plus, les feuilles de tabac montrent une hyperaccumulation pour le métal zinc. Ces résultats sont confirmés par l'analyse en composantes principales (ACP) qui a permis de définir une corrélation entre trois groupes de micronutriments. Ces groupes correspondent respectivement à des éléments biodisponibles au niveau du sol, des éléments

avec une origine anthropique, et des éléments hyperaccumulés au niveau des feuilles. Une autre analyse chimique du tabac et du sol correspondant est faite sur quatre régions agricoles ayant des caractéristiques géologiques et pédologiques différentes. Pour le transfert des macronutriments entre le sol et le tabac, on remarque que plus la couche est d'âge géologique jeune, plus le transfert sol-plante est élevé. Par ailleurs, la région de Koura montre le transfert en micronutriments le plus important entre le sol et le tabac. Dans la région d'Akkar, le développement de minéraux argileux néoformés provoque une diminution de la biodisponibilité des micronutriments pour les plants de tabac. ■

Références

- Dubret L. Aperçu de géographie physique du Liban, l'Anti-Liban et la Damascène. *Notes et mémoires, Beyrouth* 1948 ; 4 : 191-226.
- Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace elements in soils and plants*. 2nd Edition. Boca Raton (Florida) : CRC Press, 1992.
- Sims JT. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper and zinc. *Soil Sci Soc Am J* 1986 ; 50 : 367-73.
- Brooks RR. *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archeology, Mineral Exploration and Phytomining*. Wallingford (Royaume-Uni) : CAB International, 1998.
- Xian X, In Shokohifard G. Effect of pH on chemical forms and plant availability of cadmium, zinc, and lead in polluted soils. *Water Air Soil Pollut* 1989 ; 45 : 265-73.
- Adriano DC. *Trace Elements in the Terrestrial Environments*. New York : Springer-Verlag, 1986.
- Mc Laren RG, Crawford DV. Studies on soil copper. II. The specific adsorption of copper by soils. *J Soil Sci* 1973 ; 24 : 443-52.
- Kuo S, Heiman PE, Baker AS. Distribution and forms of Cu, Zn, Cd, Fe and Mn in soils near a copper smelter. *Soil Sci* 1983 ; 135 : 101-9.
- Miller WP, Mc Fee WW. Distribution of cadmium, zinc, copper and lead in soils of industrial northwestern Indiana. *J Environ Qual* 1983 ; 12 : 29-33.
- Planquart P, Bonin G, Prone A, Massiani C. Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts : application to low metal loadings. *Sci Total Environ* 1999 ; 241 : 161-79.
- Lamouroux M. Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement brunifiés du Liban. *Cah Orstom Ser Pedol* 1968 ; 6 : 63-93.
- Csalari J, Szantai K. Saucing of Tobacco-cut so as to increase microelement content in the cigarette smoke. *Acta Alimentaria* 2002 ; 31 : 83-92.
- Alloway BJ. *Heavy metals in soils*. London : Blackie Academic & Professional, 1995.

14. Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Angle JS, Baker AJM. Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol* 1997 ; 8 : 279-84.
15. Traina SJ, Doner HE. Co, Cu, Ni, and Ca sorption by a mixed suspension of smectite and hydrous manganese dioxide. *Clays Clay Miner* 1985 ; 33 : 118-22.
16. Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metal elements - A review of their distribution, ecology, and phytochemistry. *Biorecovery* 1989 ; 1 : 81-126.
17. Lamouroux M. Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban). *Cah Orstom Ser Pedol* 1965 ; 3 : 21-41.
18. AOAC. Metals and other elements. In : Horwitz W, ed. *Official methods of analysis*. Washington (DC) : Association of Official Analytical Chemists, 2000.
19. Association française de normalisation (Afnor). *Qualité des sols*. Réf. 321 31 41. La Plaine Saint-Denis (France) : Afnor, 2000.
20. Palacios DO. The influence of organic amendment and nickel pollution on tomato fruit yield and quality. *J Environ Sci Health B* 1999 ; 34 : 133-50.
21. Moulton KL, West J, Berner RA. Solute Flux and Mineral Mass Balance Approaches to the Quantification of Plant Effects on Silicate Weathering. *Am J Sci* 2000 ; 300 : 539-70.
22. Baize D. Détection de contaminations modérées en éléments traces dans les sols agricoles. *Analisis Magazine* 1997 ; 25 : 29-35.
23. Kloke A, Sauerbeck D, Vetter H. *Changing metal cycles and human health*. Berlin : Ed. Nriagu, Springer Verlag, 1984.