



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université des Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة الإخوة منتوري قسنطينة 1
كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département : Biologie et Ecologie Végétale

قسم : بيولوجيا و علم البيئة النباتية

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Ecologie Fondamentale et Appliquée

Diagnostic de la contamination des sols en bordures de routes par le cadmium et le plomb : cas de la RN05 (W. Constantine)

Présenté et soutenu par :

DJAAFAROU Manel

SAOUD Wafa

Le : 22/06/2023.

Jury d'évaluation :

Président du jury :	TOUATI Laid	Pr.	UFM-Constantine 1
Rapporteur :	SAHLI Leila	Pr.	UFM-Constantine 1
Examineur :	KERBOUA Fayçal	MAA	ENS-Constantine

Année universitaire : 2022- 2023

Remerciement

Je tiens par la présente à vous exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour votre précieuse contribution et votre soutien tout au long de notre parcours universitaire, notamment lors de l'élaboration de notre mémoire.

Votre expertise, votre encadrement et vos conseils éclairés ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, on tient à exprimer notre gratitude envers notre encadrant *SAHLI LEILA*. Votre dévouement, votre patience et votre disponibilité ont été d'une importance capitale pour mener à bien notre projet de mémoire. Vos connaissances approfondies dans le domaine de recherche ont guidé nos réflexions et nous ont permis d'approfondir notre compréhension du sujet. Vos commentaires constructifs et vos suggestions avisées ont contribué à l'amélioration de notre travail, et nous vous en sommes sincèrement reconnaissants.

Nous aimerions également adresser mes remerciements à notre examinateur, *KARBOUA FAYCAL* pour son temps, son intérêt et ses remarques pertinentes lors de l'évaluation de notre mémoire. Votre expertise et votre regard critique ont été précieux pour identifier les points forts et les points faibles de notre travail. Vos commentaires détaillés ont nourri notre réflexion et nous ont permis de prendre du recul pour améliorer notre recherche. Nous vous remercions sincèrement pour votre contribution à notre cheminement académique.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le président de notre jury, *LAID TOUATI*. Votre rôle en tant que garant de l'équité et de la rigueur de l'évaluation a été crucial pour assurer le bon déroulement de notre examen de mémoire. Votre présence et votre expertise ont ajouté une valeur inestimable à cette étape importante de notre parcours universitaire. Nous vous sommes reconnaissants pour votre investissement et votre engagement envers notre réussite académique.

MERCI

Je dédie ce travail

En mémoire de mon père, Qu'Allah t'accueille dans son vaste paradis,

A ma très chère maman

Quoique je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour faire face aux difficultés et obstacles. Je t'aime maman

A mes très chers frères et belles sœurs,

Aux très chères sœurs et beaux-frères.

A mes chères tantes et mes chers oncles,

À mes chères nièces et chers neveux,

À tous mes amis et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail et mon chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours,

Qu'Allah vous donne santé, bonheur et surtout réussite.

SAOUD WAFÀ

Dédicaces

*A celle qui Dieu a mis le Paradis sous ses pieds (chère mère
SALIMA).*

*A celui qui m'a toujours soutenu par ses conseils et ses
Encouragements, qui a lutté et sacrifié pour m'offrir les
Conditions propices à ma réussite (cher père ABDELHALIM):*

*Je vous remercie du fond du cœur de m'avoir toujours soutenu et
Épaulé pendant toute la durée de mes études. Merci d'avoir été
Présents à chaque moment de ma vie. Vous m'avait permis de
Devenir ce que je suis aujourd'hui, un grand merci pour toi Maman
Et Papa. Que Dieu vous apporte santé, bonheur et longue vie.*

*A celui qui a supporté ma mauvaise humeur (Mon mari
MOSTEFA): Je te remercie pour ton soutien inconditionnel et ta
Patience durant toutes ces longues années d'études.*

*À mes chères sœurs DOUAA et DAHIL ainsi qu'à mes précieux frères
WAIL et MOUAD,*

*Je tiens aujourd'hui à vous dédier ces mots empreints de tendresse et de
gratitude. Vous êtes mes piliers, mes compagnons de vie, et je suis
profondément reconnaissant(e) d'avoir la chance de vous avoir à mes
côtés.*

DJAAFAROU MANEL

Résumé :

L'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination des sols en bordures de route par les éléments traces métalliques (cadmium et plomb). Pour cela des échantillons de sols ont été prélevés le long de la route nationale (RN5), reliant la cité Boussouf à la commune d'Ain Smara. Treize points d'échantillonnage ont été retenus. L'extraction du cadmium et du plomb a été effectuée par digestion humide à l'eau régale, et les teneurs ont été dosées par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la présence généralisée du Cd et du Pb dans tous les échantillons de sol. Les concentrations moyennes sont respectivement d'environ 0,83 µg/g et 89,77 µg/g. Ces valeurs dépassent les normes géochimiques, ce qui indique des situations d'enrichissements considérables selon les points d'échantillonnage. Ces constatations sont confirmées par les résultats de calcul des indices de contamination et de risque écologique.

Globalement, cette étude apporte une contribution significative aux données déjà existantes relatives à la contamination métallique des sols dans la région de Constantine. De plus, elle met en évidence la contribution du trafic routier en tant que source principale de contamination et souligne les risques écologiques qui en découlent.

Mots clés : Trafic routier, sol, contamination, cadmium, plomb.

Abstract:

The aim of this study is to assess the level of soil contamination by trace metals (cadmium and lead) along road edges. Soil samples were collected along the national road (RN5), connecting Boussouf neighborhood to Ain Smara municipality. Thirteen sampling locations were selected. Cadmium and lead extraction was performed through wet digestion with aqua regia, and the concentrations were determined using Atomic absorption spectrometry.

The results of this study reveal the widespread presence of Cd and Pb in all soil samples. The average concentrations recorded are 0.83 $\mu\text{g/g}$ and 89.77 $\mu\text{g/g}$, for Cd and Pb respectively. These values exceed the geochemical background, indicating significant soil enrichment by these two elements.

Overall, this study makes a significant contribution to the already existing data on metal contamination of soils in Constantine city. It highlights the predominant role of traffic road as the main source of contamination and emphasizes the resulting ecological risks.

Keywords: Traffic road, soil, contamination, cadmium, lead

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مستوى التلوث بالعناصر المعدنية الثقيلة (الكاديوم و الرصاص) في التربة على حافة الطريق , تم جمع عينات التربة على طول الطريق الوطني الخامس , الذي يربط حي بوصوف ببلدية عين السمارة .

لقد تم اختيار ثلاثة عشرة نقطة للمعاينة , و إستخراج الكاديوم و الرصاص من التربة عن طريق عملية التآكل الرطب باستعمال مزيج من حمض الهيدروكلوريك و النترريك . حدد تركيز العنصرين الملوثين عن طريق آلية الامتصاص الطيفي للذرة. أظهرت نتائج هذه الدراسة وجود الكاديوم و الرصاص في جميع عينات التربة .بلغ التركيز المتوسط لكل من الكاديوم والرصاص على التوالي 0,83 ميكروغرام \ الغرام و 89,77 ميكروغرام \ الغرام .تتجاوز هذه القيم المعايير الجيوكيميائية , مما يشير إلى تلوث ملحوظ للتربة بالعنصرين .

بشكل عام تقدم هذه الدراسة مساهمة مهمة في فهم التلوث بالكاديوم و الرصاص في المنطقة المدروسة و تسلط الضوء على الدور السائد لحركة المرور كمصدر رئيسي للتلوث وتؤكد المخاطر البيئية الناتجة عن ذلك.

الكلمات المفتاحية : حركة مرور, التربة, تلوث, الكاديوم, الرصاص .

Liste des abréviations

CCME : Le Conseil Canadien du Ministère de L'environnement

Cd : Cadmium

CO : Monoxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

CONV : Composés organiques non volatils

COV : Composés organiques volatils

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

DC: Degré de contamination

ETM : Eléments de trace métallique

Er: l'indice de risque écologique

FC : Facteur de contamination

HAP: Hydrocarbures aromatiques

Polycycliques

HCL : Acide chlorhydrique

HNO₃: Acide nitrique

Igeo: L'indice de géo-accumulation

INATAA:L'Alimentation, la Nutrition et des Technologie Agro-alimentaires

GPS: Global positioning system

MS: Métier sèche

NO : Monoxyde d'azote

NO₂ : Dioxyde d'azote

NOX : Oxydes d'azote

O₃ : Ozone

ONS : Office national des statistiques

P : Précipitation

PERI: Indice de Risque Ecologique

Potentiel

Pb : Plomb

PM : Polluants Particulaires

Rn : Radon

RN : La Route Nationale

SO₂ : Oxydes De Soufre

T° MAX : Température maximale

T° MIN : Température minimale

T° MOY : Température moyenne

T° : Température

Zn : Zinc

Liste des tableaux

Tableau 01 : Les principaux polluants automobiles et leurs origines (Synthèse d'après : André and Brutti-Mairesse, 2018 ; Konate and Barry, 2018, cité par Tammin et Bouza, 2020).	05
Tableau 02 Données climatiques mensuelles (T° min, max et moy en °C, précipitations en mm, et vitesse du vent en Km/h) dans la région de Constantine (Mai 2020-Avril 2021, Mai 2021-Avril 2022, Mai 2022-Avril 2023, Historique météo, 2023).	15
Tableau 03 : Répartition du parc automobile l'Algérie par wilaya (ONS, 2020).	17
Tableau 04 : Données statistiques des teneurs en cadmium et en plomb dans le sol (µg/g)	23
Tableau 05 : Classes de contamination des sols en fonction de l'indice de géo-accumulation-Igeo (Müller, 1981).	27
Tableau 06. Classes de qualité selon le facteur de contamination-FC (Hakanson, 1980).	28
Tableau 07 : Classes de qualité selon l'indice de risque écologique-Er (Hakanson, 1980).	30
Tableau 08. Classes de contamination des sols en fonction du degré de contamination-DC (Hakanson, 1980).	32
Tableau 09. Classes de contamination des sols en fonction de l'indice du risque écologiques potentiel-PERI (Hakanson, 1980).	33

Liste des figures

Figure 01 : Cycle biogéochimique des éléments (Lamand et al. 1991).	06
Figure 02 : Origine des éléments traces métalliques dans le sol.	11
Figure 03 : Localisation géographique de la wilaya de Constantine (Googlemaps, 2023).	13
Figure 04 : Carte climatique de l'Algérie selon la classification de Köppen (Maps Alegria, 2021).	14
Figure 05 : Carte de réseau du trafic routier à Constantine (Chouabbia et al. 2021).	16
Figure 06 : Répartition du parc automobile à Constantine par genre de véhicules.	18
Figure 07 : Localisation de la zone d'échantillonnage (openstreetMap, 2023).	19
Figure 08 : Localisation des stations de prélèvements (Bing MAP 2023).	19
Figure 09 : prélèvement et préparation des échantillons de sol.	20
Figure 10 : Processus d'extraction des ETM dans le sol.	21
Figure 11 : Répartition des teneurs en cadmium ($\mu\text{g/g}$) dans le sol en fonction des stations.	24
Figure 12 : Répartition des teneurs en plomb ($\mu\text{g/g}$) dans le sol en fonction des stations.	25
Figure 13 : Variation des indices de géo-accumulation du cadmium en fonction des stations.	27
Figure 14 : Variation des indices de géo-accumulation du plomb en fonction des stations.	27
Figure 15 : Variation des facteurs de contamination du cadmium en fonction des stations.	29
Figure 16 : Variation des facteurs de contamination du plomb en fonction des stations.	29
Figure 17 : Variation de l'indice du risque écologique du cadmium en fonction des stations.	31
Figure 18 : Variation de l'indice du risque écologique du plomb en fonction des stations.	31
Figure 19 : Variation du degré de contamination en fonction des stations.	33
Figure 20 : Variation du l'indice de risque écologique potentiel en fonction des stations.	34

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction..... 1

Chapitre 01 : Synthèse bibliographique

1- Pollution atmosphérique liée au trafic routier.....	03
1-1- Origine de la pollution atmosphérique.....	03
1-2- Principaux polluants atmosphériques.....	04
1-2-1- Les polluants primaires.....	04
1-2-2- Les polluants secondaires.....	04
1-3- Les polluants atmosphériques provenant du trafic routier.....	04
1-4- Facteurs influençant l'émission des polluants par les véhicules.....	06
1-4-1- Facteurs liés aux véhicules.....	06
1-4-2- Facteurs liés au milieu.....	06
1-5- Pollution de l'air par les éléments trace métalliques-ETM : cas du Cd, Pb.....	06
1-5-1- Propriétés et origine du Cd et Pb.....	06
1-5-2- Facteurs influençant la dispersion et transfert des ETM dans l'air.....	08

1-5-2-1- Facteurs de dispersions indirects liés aux polluants.....	08
1-5-2-2- Facteurs de dispersion directs liés aux conditions externes.....	10
2- Contamination des sols en bordures de routes par les ETM.....	12
2-1-Origine naturelle.....	12
2-2- Origine anthropique.....	13

Chapitre 02 : Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude.....	14
1.1. Situation géographique.....	14
1.2. Climatologie.....	14
1.3. Statistiques sur le trafic routier à Constantine.....	19
2. Choix et localisation des stations d'échantillonnage.....	19
3. Prélèvement, traitement et préparation des sols.....	21
4. Extraction et dosage des ETM	21
4.1. Extraction des ETM dans le sol.....	21
4.2. Dosage des ETM	22
5. Traitement statistique des résultats.....	22

Chapitre 03 : Résultats et discussion

1. Teneurs en cadmium et en plomb dans les sols.....	24
1.1. Teneurs en cadmium dans le sol.....	24
1.2. Teneurs en plomb dans le sol.....	25
2. Diagnostic du niveau de contamination métallique des sols et évaluation du risque écologique : approche des indices.....	26
2.1. Les indices monométalliques.....	26

2.1.1. Indice de géo-accumulation (Igeo)	26
2.1.2. Facteur de contamination (FC).....	29
2.1.3. Indice de risque écologique (Er).....	31
2.2. Les indices polymétalliques.....	33
2.2.1. Degré de contamination (DC).....	33
2.2.2. Indice de risque écologique potentiel (PERI).....	34
3. Discussion.....	35
Conclusion.....	40
Références bibliographiques.....	42

Introduction

« La pollution du sol, c'est la vie qui s'envole »

Le sol occupe une position essentielle en tant qu'interface entre l'eau, l'atmosphère et les végétaux ; il remplit diverses fonctions économiques, écologiques et biologiques. En tant que support de nombreuses activités humaines telles que l'industrialisation, l'urbanisation et l'agriculture, son utilité pour la stabilité environnementale est reconnue. En effet, le sol joue un rôle de réacteur, de récepteur, d'accumulateur et de filtre pour les polluants (Robert et Juste, 1999). La pollution des sols est un problème environnemental important et répandu, et est devenue une préoccupation sérieuse dans de nombreux pays développés et en voie de développement (Yu et al. 2017). Les polluants du sol sont en grande partie les éléments traces métalliques (ETM), mais aussi les composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les hydrocarbures chlorés, et les dérivés du benzène (Bisht et al. 2015).

Les ETM sont naturellement présents dans les sols à des concentrations faibles. Cependant, avec le développement de l'activité urbaine, notamment le trafic routier, les industries métallurgiques et chimiques, la production de carburant, les engrais et les pesticides, et l'épandage de boues d'épuration, une quantité importante de ces éléments a été introduite dans les sols, engendrant des pollutions et des perturbations considérables (El-Hadef El-Okki et al. 2016 ; Dhaliwal et al. 2020). La pollution des sols provenant du trafic routier et infrastructures routières résulte des émissions du moteur, de l'abrasion des pneus et des plaquettes de frein, de l'usure des véhicules, des chaussées et des équipements routiers. L'accumulation des ETM dans les sols constituent un problème présent et futur en raison de leur rémanence, leur bioaccumulation, leur caractère non biodégradable, leur stabilité ainsi que leur toxicité pour les organismes vivants, même à faibles concentrations (Ayangbenro et Babalola 2017 ; Gholizadeh et al. 2019). En effet, ces polluants affectent négativement la qualité des écosystèmes, mais peuvent aussi menacer la santé et le bien-être de toutes les formes de vie (Yu et al. 2017). C'est pourquoi il est essentiel de surveiller périodiquement de manière appropriée la contamination des sols par ces éléments afin de préserver la santé publique et environnementale.

Au cours de la dernière décennie, une grande attention a été accordée à l'évaluation du niveau de contamination des écosystèmes terrestres et aquatiques par les ETM dans le nord-est Algérien. Ainsi, plusieurs études réalisées ont révélés des perturbations considérables, citons à titre d'exemple celles de Maas et al. (2010) ; El Hadeef El Okki et al. (2016) ; Zekri et al. (2019) ; Sahli et al. (2011, 2012, 2014, 2021).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude relative à l'évaluation du niveau de contamination par les ETM des sols en bordures de routes dans la région de Constantine.

Pour évaluer la pollution de cette matrice liée au trafic routier, des échantillons de sol ont été prélevés en bordures d'un axe routier à trafic intense ; il s'agit de la route nationale (RN5) reliant la cité Boussouf à la commune d'Ain Smara. Ces sols ont été analysés pour leurs teneurs pseudo-totales en cadmium et plomb. Aussi, plusieurs indices permettant d'évaluer le niveau de contamination métallique et le risque écologique lié à la présence de ces éléments dans le sol, ont été calculés.

Les objectifs visés par cette étude sont les suivants :

- Évaluer le niveau de contamination métallique des sols le long de l'axe routier en question ;
- Confronter les concentrations en ETM mesurés aux backgrounds géochimiques établis par différents auteurs dans le monde, afin de détecter des situations d'enrichissement voir de pollution par ces éléments ;
- Compléter les données qui existent déjà pour la région, pour éventuellement orienter au mieux les mesures de prévention et de gestion de la pollution métallique dans la région.

Ce travail est structuré comme ce suit :

Le premier chapitre de ce mémoire repose sur **une synthèse bibliographique** qui présente de manière générale les connaissances de base sur la pollution des écosystèmes à proximité des axes routiers. Il détaille certains éléments liés à ce sujet et fournit une compréhension approfondie des enjeux associés.

Le deuxième chapitre, intitulé "**matériels et méthodes**", fournit des informations sur la localisation géographique de la zone d'étude et présente le plan d'échantillonnage qui a été suivi, les stations sélectionnées et les techniques utilisées pour le prélèvement du sol, ainsi que pour l'extraction et le dosage des ETM.

Le troisième chapitre, intitulé "**Résultats et discussion**", se concentre sur l'analyse des résultats obtenus au cours de cette étude. Il comprend également une discussion approfondie de ces résultats, en les comparant éventuellement à ceux d'autres études similaires.

Enfin, le mémoire se **conclut** par une synthèse sous forme de conclusions. Cette partie résume le travail réalisé et présente les perspectives envisagées pour poursuivre cette étude dans le futur.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1- Pollution atmosphérique liée au trafic routier

1-1- Origine de la pollution atmosphérique

La pollution de l'air est une préoccupation majeure qui a évolué au fil des âges avec le développement technologique et l'essor industriel. Dès le XIII^e siècle, un édit royal interdisait l'utilisation du charbon à des fins domestiques, ce qui témoigne de la préoccupation concernant la pollution atmosphérique à cette époque (Aichi, 2015). Au fil des années, la notion de pollution de l'air a été étendue et a connu différentes définitions. Par exemple, la loi algérienne n°03-10 du 19 Jomada El Oula 1424, correspondant au 19 juillet 2003, relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, définit la pollution de l'atmosphère comme suit : "L'introduction de toute substance dans l'air ou l'atmosphère, provoquée par l'émanation de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides, susceptible de porter préjudice ou de créer des risques pour le cadre de vie" (Journal Officiel de la République Algérienne N° 43, article 04, 2003).

Il convient de souligner que les différents polluants présents dans l'air n'ont pas tous la même durée de séjour, ce qui engendre des problèmes de pollution à différentes échelles spatio-temporelles. Les échelles principales utilisées pour décrire la pollution de l'air sont les suivantes (Philippe, 2004) :

- ❖ **Échelle locale** : elle concerne des situations de pollution ponctuelle élevée caractérisées par la présence de polluants ayant une durée de vie relativement courte, et des effets à court terme. Cette forme de pollution peut également affecter le patrimoine et les structures bâties.
- ❖ **Échelle régionale** : elle s'étend sur quelques kilomètres autour des sources d'émission de polluants. Ces polluants réagissent entre eux ou avec les particules présentes dans l'air. Ce type de pollution est souvent associé à des phénomènes spécifiques tels que les pluies acides et la pollution photochimique.
- ❖ **Échelle planétaire** : cette échelle a une ampleur plus importante et engendre des effets à long terme qui concernent l'ensemble de la planète. Tous les composés émis s'accumulent et persistent pendant plusieurs années dans l'atmosphère, ce qui peut entraîner l'épaississement de la couche d'ozone stratosphérique, l'effet de serre, la fonte des calottes glaciaires, et autres phénomènes.

1-2- Principaux polluants atmosphériques

1-2-1- Les polluants primaires

La composition de l'atmosphère terrestre est influencée par un transport de matière, comprenant divers éléments, tels que le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils et non volatils (COVN), les particules en suspension (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, PM_{0.1}) et les éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, etc.). Ces éléments proviennent de sources diverses telles que les activités industrielles, le transport, les incendies de forêt, les émissions volcaniques etc. Leur présence dans l'atmosphère peut avoir des effets négatifs sur la santé humaine et l'environnement (Cation, 2010).

1-2-2- Les polluants secondaires

Selon Fontana (2019), les polluants secondaires se forment dans l'atmosphère par le biais de réactions chimiques complexes entre certaines substances, notamment des polluants primaires. L'ozone (O₃) par exemple est un polluant appartenant à la famille des photo-oxydants, formé par des réactions photochimiques entre des polluants primaires précurseurs, en particulier les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV). Ces réactions impliquent des mécanismes de photolyse des molécules sous l'effet du rayonnement solaire, tels que la photolyse du NO₂ en NO, libérant ainsi un atome d'oxygène qui se recombinera avec le dioxygène de l'air pour former de l'ozone. Les particules secondaires, quant à elles, sont générées par des mécanismes d'oxydation, de nucléation, de condensation et de coagulation, qui transforment des composés gazeux en particules liquides ou solides dans l'atmosphère (Charpin et al. 2016).

1-3- Les polluants atmosphériques provenant du trafic routier

Les émissions atmosphériques provenant du trafic routier comprennent un large éventail de polluants. Ces polluants peuvent être émis par le système d'échappement des véhicules, lors de l'évaporation du carburant, à travers l'usure et l'abrasion, ainsi que par la remise en suspension des particules. Les détails sur ces polluants sont répertoriés dans le Tableau 01.

Tableau 01 : Les principaux polluants automobiles et leurs origines
 (Synthèse d'après : André and Brutti-Mairesse, 2018 ; Konate and Barry, 2018, cité par Tammin et Bouza, 2020)

Polluants	Origine
Dioxyde de carbone (CO₂)	Produit par l'oxydation du carbone des carburants: émissions à l'échappement.
Monoxyde de carbone (CO)	Résulte d'une combustion incomplète du carburant : émissions à l'échappement.
Oxydes d'azote (NO_x)	Formés à haute température par oxydation de l'azote de l'air, principalement NO et NO ₂ : émissions à l'échappement.
Polluants particulaires (PM)	Provenant d'une part de la combustion incomplète du carburant-lubrifiant et d'autre part de phénomènes d'usure et de frottement : émissions à l'échappement, par remise en suspension de particule et par usure et abrasion.
Composés organiques volatils (COV) comprenant des hydrocarbures (alcènes, alcènes, aromatiques monocycliques : benzène et toluène, certains HAP légers, etc.) et des composés oxygénés (aldéhydes, acides, cétones, éthers, etc.)	L'évaporation du carburant lors du remplissage du réservoir et au niveau de l'alimentation des véhicules est également une source d'émission, notamment pour l'essence, plus volatile que le gazole : les émissions à l'échappement.
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : benzo pyrène, benzo fluoranthène, benzo pérylène et benzo(a) anthracène	Ces composés lourds se retrouvent à la surface des particules, alors que les plus volatils, émis en moins grande quantité, sont présents dans la phase gazeuse : émissions à l'échappement et par usure et abrasion.
Dioxyde de soufre (SO₂)	Formé à partir du soufre contenu dans le gazole : émissions à l'échappement.
Eléments traces métalliques (ETM) : plomb, zinc, cuivre, cadmium, chrome, etc.	Présents initialement dans les huiles et les carburants. Également liés aux équipements automobiles et à la voirie, par l'usure des pneus, la gomme de pneumatique contient principalement du plomb et du zinc, des plaquettes de freins qui contribuent à une émission significative du cuivre et du zinc : émissions par usure et abrasion.

1-4- Facteurs influençant l'émission des polluants par les véhicules

1-4-1- Facteurs liés aux véhicules

Plusieurs facteurs influencent les émissions de polluants atmosphériques des véhicules. Ainsi, le type de véhicule joue un rôle important. On peut distinguer les véhicules particuliers, les véhicules utilitaires, les poids lourds ainsi que les catégories à deux roues. Les variations de carburant et de technologie utilisées ont également un impact sur les émissions de polluants. En effet, les moteurs diesel et à essence n'émettent pas les mêmes polluants, et les véhicules équipés de climatisation ont tendance à émettre davantage. Aussi, l'état du véhicule et son entretien ; en effet, l'âge du véhicule ainsi que sa maintenance régulière peuvent réduire les émissions de polluants. Ajouté à cela le niveau de chargement du véhicule dont la contribution est relativement importante ; un véhicule chargé émet davantage de polluants, car son moteur doit fournir plus de puissance pour atteindre une vitesse donnée (Deletraz et Paul, 1998).

1-4-2- Facteurs liés au milieu

Plusieurs facteurs externes liés au milieu peuvent influencer le taux des polluants émis par le parc automobile. D'une part les conditions de circulation, qui ont un impact significatif, en particulier lors des phases d'accélération, de décélération, des arrêts aux feux, de l'altitude et de la pente. Cependant, la vitesse du véhicule demeure l'un des facteurs les plus critiques dans la production de polluants. D'autre part, les facteurs climatiques ; en effet, la température de l'air, joue par exemple un rôle important car elle influence le temps nécessaire au moteur pour atteindre une température de 70°C lors du démarrage à froid. De plus, le vent, peut soit ralentir, soit faciliter le déplacement des véhicules, ce qui peut également avoir un impact sur les émissions de polluants (Deletraz, 1998).

1-5- Pollution de l'air par les éléments trace métalliques-ETM : cas du Cd, Pb

1-5-1- Propriétés et origine du Cd et Pb

D'après Galvez-Cloutier et Lefrançois (2005), un métal est généralement obtenu à partir d'un minerai ou d'un autre métal ayant une apparence caractéristique et qui est capable de conduire la chaleur et l'électricité de manière efficace. Les métaux se caractérisent également par leur dureté et leur malléabilité, ainsi que leur aptitude à se combiner

facilement avec d'autres éléments pour former des alliages qui peuvent être utilisés à diverses fins, d'où l'origine anthropique de ces éléments dans l'environnement.

Par ailleurs, les éléments traces métalliques (ETM) sont également présents naturellement dans l'environnement, à des niveaux variables en fonction de la composition initiale de la roche mère. Les roches peuvent se décomposer en sols, libérant ainsi les ETM qu'elles contiennent. Ces éléments sont également présents dans tous les autres compartiments de l'environnement, y compris l'eau, l'air et les organismes vivants.

La localisation ou la forme chimique des ETM dans l'environnement peut varier en fonction de phénomènes naturels ou de l'intervention humaine. Il existe donc un cycle biogéochimique des ETM, comme illustré par la Figure 1, où les éléments traces métalliques se déplacent entre les différents compartiments et changent de forme chimique sous l'influence de processus naturels ou anthropiques.

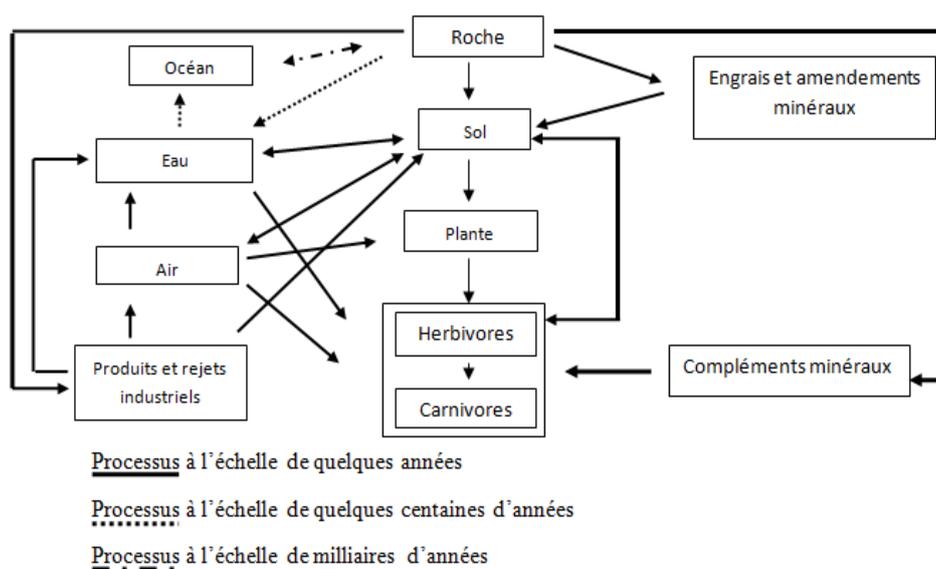


Figure 01 : Cycle biogéochimique des éléments (Lamand et al. 1991).

Le cadmium est un métal de Couleur blanche, mou et malléable. Il s'oxyde au contact de l'air, ce qui lui donne une apparence ternie (Callender, 2003). Dans les horizons supérieurs des sols cultivés, les concentrations naturelles de cadmium varient généralement entre 0,2 et 0,4 mg.kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011). Cependant, dans certains sites pollués, ces concentrations peuvent atteindre des valeurs supérieures à 150 mg.kg⁻¹, notamment en raison de l'épandage de boues contaminées (Krika, 2014).

Bien que le cadmium ne soit pas considéré comme essentiel au développement des organismes animaux ou végétaux, ses propriétés physiques et chimiques, similaires à celles du zinc et du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus. C'est pourquoi le cadmium est identifié comme un polluant extrêmement toxique (Godt et al. 2006). Le transfert du cadmium du sol vers les plantes est principalement influencé par le pH et la concentration du métal dans le sol (Tudoreanu et Phillips, 2004), la présence ou l'absence d'autres cations, en particulier le zinc (Nan et al. 2002), et la quantité de carbone organique. En effet, le cadmium peut être phyto-accumulé sous forme de complexe cadmium-acide organique à faible poids moléculaire (Tremel-Schaub et Feix, 2005). En plus de ces facteurs, la biodisponibilité du cadmium peut être modifiée par l'ajout de divers amendements (Kirkham, 2006).

Le plomb est un métal gris mou que l'on trouve en petite quantité dans la croûte terrestre. Il appartient au groupe VIB de la classification périodique des éléments et une fois extrait et transformé, il peut représenter un danger potentiel permanent pour l'environnement. La source principale de plomb dans l'environnement est l'activité humaine, et il n'existe aucune technologie capable de le détruire ou de le rendre inoffensif. Les sources naturelles du plomb atmosphérique incluent l'érosion éolienne des sols, les poussières volcaniques, les incendies de forêt, les sels marins et le délabrement du radon (Saka et al. 2011). Selon Steinnes (2013), le plomb est considéré comme le micropolluant métallique ayant la mobilité la plus faible dans le sol. Son comportement est influencé par divers facteurs tels que sa dynamique, ainsi que les caractéristiques pédologiques et physico-chimiques du sol. L'argile et, plus particulièrement, la matière organique sont identifiées comme les principales phases d'adsorption pour le plomb. Le plomb n'est pas un élément essentiel à la croissance des plantes ou des animaux et ne participe à aucun métabolisme cellulaire (Uveges et al. 2002).

1-5-2- Facteurs influençant la dispersion et transfert des ETM dans l'air

1-5-2-1- Facteurs de dispersions indirects liés aux polluants

Les polluants peuvent causer une dispersion indirecte de poussières par voie atmosphérique, résultant de la circulation des véhicules et des infrastructures routières. D'après le service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes-SETRA (2004), seulement 10% des poussières restent sur la chaussée, tandis que 90% sont dispersés. Les particules transportées peuvent être influencées par différents facteurs indirects tels que la taille, la forme, la composition chimique, la concentration et le temps de séjour des particules.

❖ La taille des particules

La dimension des particules est considérée comme la caractéristique physique la plus significative et le paramètre ayant le plus d'impact sur l'environnement. L'atmosphère environnante renferme divers éléments traces métalliques provenant du trafic routier, notamment le plomb, le cadmium, le zinc et le cuivre. La concentration de ces éléments est directement liée à celle d'autres particules (Ghezri, 2014). Les particules fines, ayant un diamètre de $2,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$, sont principalement générées par l'usure des freins et contiennent du chrome, du fer, du cuivre, du zinc, du zirconium, du molybdène, de l'étain, de l'antimoine, du baryum et du plomb. Les particules de plus grande taille proviennent des pneus, de l'érosion du revêtement routier et du salage des routes, et renferment de l'aluminium, du silicium, du potassium, du calcium, du titane, du manganèse, du fer, du zinc et du strontium (Veschambre, 2006). Les particules de très grande taille (diamètre de 10 à $100 \mu\text{m}$) se déplacent localement et retombent rapidement au sol en raison de la force de gravité.

❖ La structure des particules

Les éléments traces métalliques (ETM) ont la capacité de se répandre dans les couches supérieures de l'atmosphère après avoir été transportés sur des distances variables, puis de retomber dans d'autres régions. Ils peuvent exister sous deux formes principales dans l'air : sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatils, ou sous forme de composés métalliques solides qui se déposent sur de très fines particules ou poussières générées lors de processus de combustion. Ces deux formes influencent la durée pendant laquelle les éléments traces métalliques demeurent dans l'atmosphère, ainsi que leur capacité de dispersion et la distance qu'ils parcourent avant de se déposer (Ghezri, 2014).

❖ La concentration des polluants

La concentration des polluants d'origine automobile, y compris les éléments traces métalliques, qui se dispersent et se déposent le long des routes, est déterminée par le trafic routier et la composition du parc automobile, tels que le nombre de véhicules circulant chaque jour, le type de véhicule, le type de moteur, la vitesse, etc. Cette concentration est un reflet de la manière et de l'étendue de la dispersion ; en effet, plus la quantité de polluants est élevée, moins la dispersion est efficace, ce qui entraîne une détérioration de la qualité de l'air (Bouteraa, 2014).

❖ La taille des particules

La taille des particules joue un rôle crucial dans leur temps de séjour dans l'atmosphère et leur capacité de dispersion. Les particules fines ont tendance à rester plus longtemps dans l'air par rapport aux particules plus grosses qui se déposent rapidement en raison de leur poids. Les particules fines présentent également une plus grande aptitude à se disperser et peuvent être transportées sur de plus grandes distances et à des altitudes plus élevées, s'éloignant ainsi des sources d'émission. Par exemple, les particules de plomb ont un temps de séjour atmosphérique d'environ 10 jours, ce qui leur permet de se déplacer sur de longues distances et de se déposer dans des régions éloignées de leur origine d'émission (Normand, 2012).

1-5-2-2- Facteurs de dispersion directs liés aux conditions externes

Les conditions externes ont également un impact important sur la dispersion des polluants d'origine automobile. Parmi ces conditions, on peut citer :

a- Les facteurs météorologies

Les conditions météorologiques ont une influence significative sur la dispersion des polluants dans l'air. En effet, il convient de considérer attentivement les facteurs météorologiques, tels que ceux énumérés ci-dessous, notamment à proximité des autoroutes et des grands axes routiers, comme souligné par Laffray et al. (2018).

✚ La vitesse et direction du vent

La vitesse et la direction du vent sont des paramètres importants à prendre en compte dans la dispersion des polluants. Le vent, qui correspond au mouvement de l'air, est un facteur de transport des polluants et joue un rôle déterminant dans la distance de dispersion et la dilution des polluants primaires, comme l'ont souligné Omar (2015) et Laffray et al. (2018).

La vitesse du vent influe directement sur la dispersion des polluants. En effet, un vent fort permet de disperser les polluants, ce qui conduit à une diminution des niveaux de pollution dans les zones urbaines. À l'inverse, un vent de faible vitesse favorise l'accumulation locale des polluants. La direction du vent est également un paramètre important à considérer dans le déplacement des polluants. En effet, la topographie du site peut entraver le mouvement du vent et ainsi conduire à une stagnation des polluants sur une zone donnée (Omar, 2015 ; Laffray et al. (2018).

✚ **La pression atmosphérique**

La pression atmosphérique a un impact sur les mouvements des masses d'air et influence directement la dispersion des émissions de polluants provenant des véhicules motorisés (Laffray et al. 2018). Une basse pression atmosphérique, caractéristique d'une situation dépressionnaire, peut entraîner une turbulence de l'air assez forte, favorisant ainsi une bonne dispersion des substances polluantes et améliorant la qualité de l'air. En revanche, dans le cas de hautes pressions ou de situations anticycloniques, la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants (Omar, 2015).

✚ **La température**

Lorsque les températures sont basses, les gaz sont moins mobiles, la situation inverse est observée lorsque les températures sont élevées ; en effet, les polluants deviennent plus mobiles (Omar, 2015). La différence de température entre deux couches d'air (air chaud au-dessus de l'air plus froid) peut conduire à la formation d'une couche d'inversion thermique pouvant bloquer la dispersion des polluants, entraînant ainsi une stagnation et induisant l'accumulation de ces derniers (Laffray et al.2018).

✚ **Les précipitations**

Les précipitations ont un rôle important dans l'amélioration de la qualité de l'air, car elles contribuent à éliminer les particules polluantes en les plaquant au sol et en les emportant avec les eaux d'écoulement (Omar, 2015).

b- La topographie

La topographie joue un rôle essentiel dans les mécanismes de diffusion des polluants. En effet, si la route est encaissée, les polluants peuvent stagner aux bords de la route, tandis que s'ils sont surélevés, ils peuvent s'évacuer plus facilement. Le vent en combinaison avec la topographie peut également influencer la dispersion des polluants. Dans le cas de rues étroites bordées en continu par de grands bâtiments, les émissions de polluants liées à la circulation des véhicules sont entraînées par l'écoulement tourbillonnaire formé à l'intérieur du canyon. Les polluants s'accumulent alors en particulier vers le trottoir sous le vent. Lorsque le vent est parallèle à la direction de la rue, la dispersion des polluants à l'intérieur de la rue est favorisée, mais cela peut entraîner une dégradation de la qualité de l'air et une accumulation des polluants en amont de la rue (Burton, 2016).

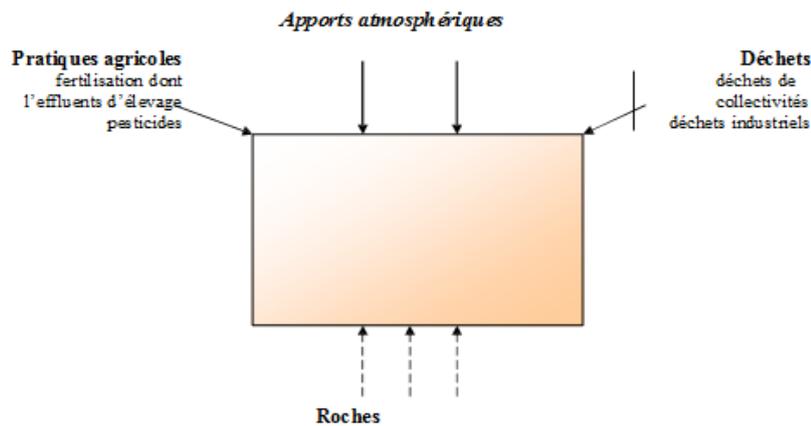


Figure 02 : Origine des éléments traces métalliques dans le sol.

2- Contamination des sols en bordures de route par les ETM

Les sols des bordures de routes constituent des réservoirs importants d'ETM. La présence de ces éléments dans les sols peut être naturelle ou induite par l'homme (Figure 02).

2-1- Origine naturelle

Les ETM proviennent d'abord de phénomènes naturels tels que l'héritage de la roche mère, les cycles biogéochimiques, les transferts pédologiques verticaux et latéraux (Hemme et al. 2016). Le sol sera d'autant plus riche en ETM que la roche mère l'est. Ainsi, des sols formés sur des sables quartzeux renferment des quantités extrêmement faibles d'ETM (moins de 0.05 mg/kg de matière sèche de Cd, moins de 5 mg/kg de matière sèche de Cu), alors que ceux qui se sont formés sur des sédiments calcaires ou marneux, ou des schistes sont plus riches (0,5 à 1 mg/kg de MS de Cd, 25 à 50 mg/kg de MS de Cu), (Alloway, 2013). Les roches cristallines, les plus basiques contiennent davantage d'ETM (Cu, Co, Mn, Zn) ; celles qui sont acides et riches en silice ont des teneurs plus élevées en matière organique (MO). Les roches sédimentaires ont des teneurs assez élevées en éléments-traces, ces dernières s'accroissent en cas d'accumulation de carbone fossile (schistes bitumineux, lignites, tourbe, etc.), (Delaplace et al. 2021).

2-2- Origine anthropique

Ces dernières années, la pollution de l'environnement par les éléments traces métalliques (ETM) a suscité une préoccupation croissante tant sur le plan écologique que sur le plan de la santé publique à l'échelle mondiale. De plus, l'exposition humaine à ces substances a connu une augmentation spectaculaire en raison de leur utilisation exponentielle dans de nombreux secteurs tels que l'industrie, l'agriculture, les foyers et la technologie (Edelstein et Ben-Hur, 2018 ; Kaur et al. 2019). Les études menées sur la dispersion et la distribution des métaux dans l'environnement ont démontré l'existence de niveaux significatifs de contamination par les ETM dans les écosystèmes aquatiques et terrestres liés au trafic routier (El Hadeef El Okki et al. 2016 ; Masindi et Muedi, 2018 ; Sahraoui et al. 2021, Sahli et al. 2021).

Chapitre II

Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Situation géographique

Constantine est située au Nord-Est de l'Algérie, entre une latitude de $36^{\circ}23'$ et une longitude de $7^{\circ}35'$. Elle est entourée d'obstacles naturels imposants, étant construite sur un majestueux rocher entre les deux côtés de l'oued Rhumel. La ville se trouve à 245 km de la frontière Algéro-tunisienne, à 431 km de la capitale Alger vers l'ouest, à 89 km au nord de Skikda vers le nord, et à 235 km de Biskra vers le sud. Les repères géographiques indiquent que la région n'est pas homogène en termes de position et de niveau de la mer, se situant entre les deux lignes Kentour de 400 à 800 m au nord et de 800 à 1200 m au sud (Figure 03).

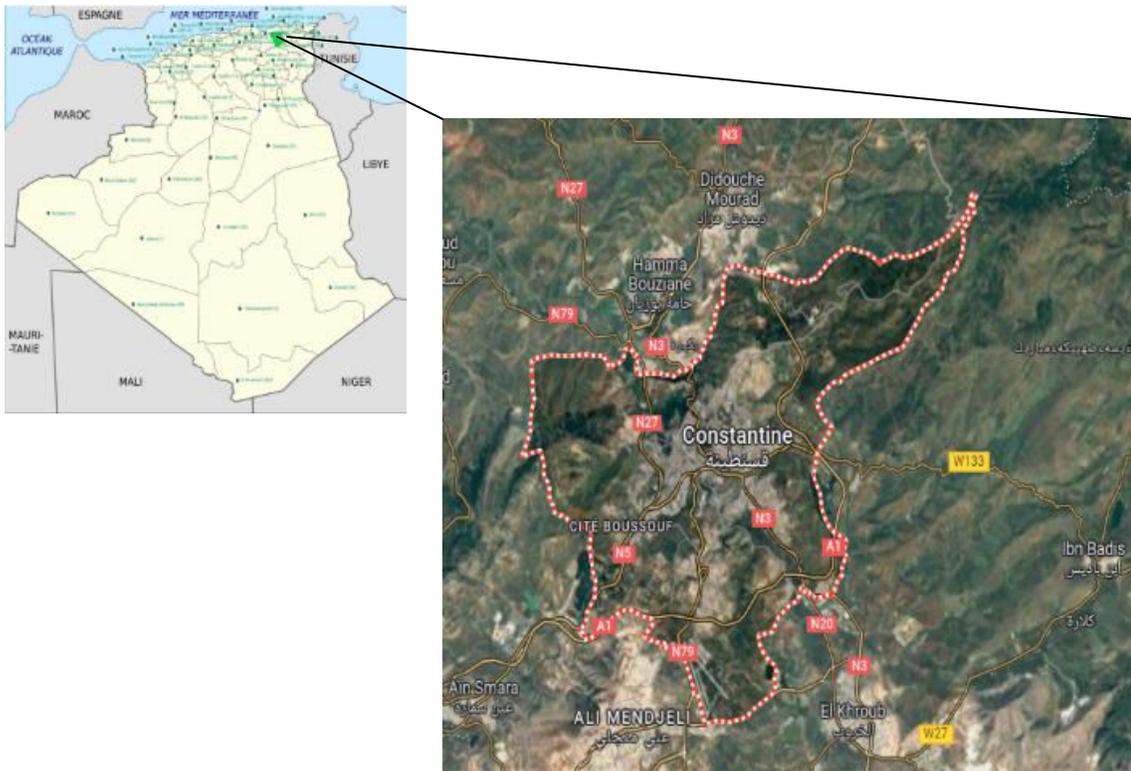


Figure 03 : Localisation géographique de la wilaya de Constantine (Googlemaps, 2023).

1.2. Climatologie

La diversité climatique de l'Algérie est remarquable en raison de sa vaste superficie. Le nord bénéficie d'un climat méditerranéen tandis que le reste du pays est dominé par des climats semi-arides, arides ou désertiques (classifications de Köppen BWh et BWk) (Figure 04).

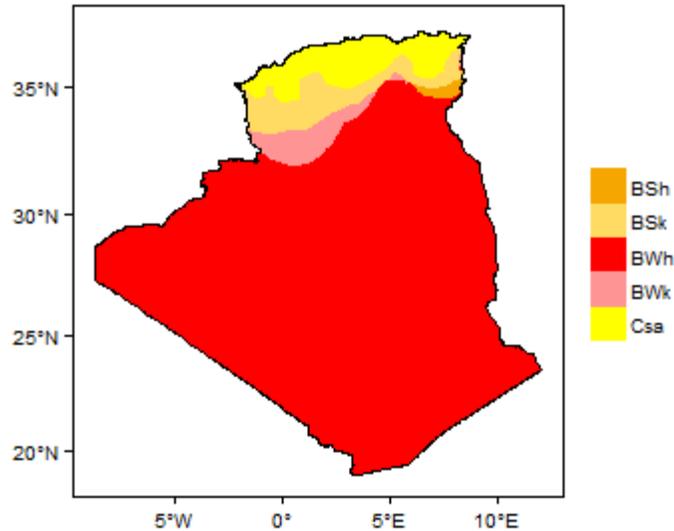


Figure 04 : Carte climatique de l'Algérie selon la classification de Köppen (Maps Alegria, 2021).

La région de Constantine en Algérie est soumise à un climat méditerranéen, ce qui implique des précipitations irrégulières et une alternance nette entre une saison sèche et une saison de pluie, comme pour l'ensemble de la zone méditerranéenne. La moyenne pluviométrique varie de 500 mm à 700 mm par an. La région de Constantine se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais, et été chaud et sec. Il subit des influences de l'étage méditerranéen bioclimatique subhumide en hiver et de l'atlas saharien en été (Mebarki, 2005). Les masses d'air provenant des monts de la région de Constantine font souffler le vent dans une direction dominante Nord-Ouest et Nord.

Les données climatiques de Constantine calculées à un rythme mensuel durant la période allant du mois de mai 2020 au mois d'avril 2023 sont portées dans le tableau N°02. Les paramètres pris en considération sont : la température, les précipitations, et le vent à titre indicatif. Ces derniers ont été obtenus à partir de l'archive du site web historique-meteo.net. Le choix de la durée allant du mois de mai 2020 au mois d'avril 2023, peut être justifié par le fait que cette dernière coïncide avec la période d'échantillonnage.

Tableau 02 : Données climatiques mensuelles (T° min, max et moy en °C, précipitations en mm, et vitesse du vent en Km/h) dans la région de Constantine

(Mai 2020-Avril 2021, Mai 2021-Avril 2022, Mai 2022-Avril 2023, Historique météo, 2023).

	T. min (°C)	T. max (°C)	T. moy (°C)	P (mm)	Vent (Km/h)
Mai 2020-Avril 2021	17	26	22	33	18
	21	30	25	24	21
	25	34	30	22	19
	26	35	30	10	21
	20	27	24	125	17
	15	22	18	23	16
	12	19	15	94	14
	7	12	10	59	19
	6	12	9	57	21
	8	17	12	40	20
	7	16	11	62	14
	11	21	16	27	16
Moy/cumul	14,583	22,583	18,5	576	18
Mai 2021-Avril 2022	17	26	22	121	16
	24	33	29	17	19
	26	37	32	1	17
	27	38	32	12	18
	22	34	28	2	17
	13	23	18	2	15
	10	16	13°	18	19
	6	15	11°	12	17
	4	13	9°	8	13
	5	15	10°	8	16
	7	16	12°	23	18
	8	22	15°	7	20
Moy/cumule	14,083	24	19,25	231	17,083
Mai 2022-Avril 2023	15	29	22	5	20
	22	39	30	1	19
	23	40	32	2	18
	22	37	30	2	20
	22	34	28	8	17
	18	29	23	5	12
	12	20	16	16	19
	10	19	14	3	16
	4	12	8	12	16
	5	14	10	4	12
	8	20	14	5	17
	9	23	16	6	20
Moy/cumule	14,166	26,333	20,25	69	17,166

L'examen du tableau 02, montre que la température moyenne durant la période prise en considération dans cette étude, est de l'ordre (19,33°C). La température la plus élevée a été enregistrée pour la période allant du mois de Mai 2022 au mois d'Avril 2023 (26,33°C), alors que la plus faible est pour la période allant du mois de mois de Mai 2021 au mois d'Avril 2022 (14,08°C).

Pour les précipitations, la moyenne interannuelle s'élève à 292 mm. Le minimum est de 69mm, alors le maximum est de 567 mm.

Comme mentionné plus haut, les vents dominants sont ceux du Nord-Ouest et Nord. Le tableau N°02, montre que la vitesse maximale du vent (18 Km/h), alors que la minimale est 17,08 Km/h. La vitesse moyenne durant la période d'observation est de 17,41Km/h.

1.3. Statistiques sur le trafic routier à Constantine

Du fait de sa situation géographique, qui lui permet de connecter les zones dynamiques de toutes les régions du pays, la wilaya de Constantine bénéficie d'un réseau d'infrastructures routières particulièrement développé. Elle compte 7 routes nationales, 21 chemins de wilayas, ainsi qu'un grand nombre de routes communales, en plus de l'autoroute Est-Ouest (Figure 05).



Figure 05 : Carte de réseau du trafic routier à Constantine (Chouabbia et al. 2021).

Comparativement aux autres wilayas algériennes, Constantine se positionne en troisième place en termes de nombre de véhicules, avec un parc automobile total de 20450 véhicules. Cette position est précédée par la capitale Alger, qui compte 25591 véhicules, suivie de Blida avec 25814 véhicules. D'après le tableau 03, le parc automobile de Constantine représente 4,31% du nombre total de véhicules en Algérie selon l'Office National des Statistiques-ONS (2020).

Tableau 03 : Répartition du parc automobile en Algérie par wilaya (ONS, 2020).

Wilaya	Nombre	Pourcentag
Alger	25591	5,39
Blida	25814	5,44
Oran	8568	1,81
Constantine	20450	4,31
Tizi Ouzou	7033	1,48
Bejaïa	11199	2,36
Annaba	14702	3,10
Batna	16803	3,54
Boumerdes	10230	2,16
Sétif	20105	4,24
Tipaza	14464	3,05
Chlef	6052	1,28
Autres wilayas	293421	61,84
Total	474432	100

Selon les données de l'ONS en 2020, le parc automobile de Constantine se compose principalement de voitures de tourisme avec 16081 unités, de camionnettes avec 2869 unités, de camions avec 376 unités, de tracteurs agricoles avec 125 unités, de tracteurs routiers avec 1174 unités, de remorques avec 138 unités, d'autocars et d'autobus avec 180 unités, de motos avec 495 unités et de véhicules spéciaux avec 12 unités (Figure 06). En outre, concernant l'évolution du parc automobile de Constantine par source d'énergie, l'ONS (2020) rapporte que la proportion de la source d'énergie essence est plus importante que celle de la source d'énergie Gasoil, avec 58,66% contre 41,34%.

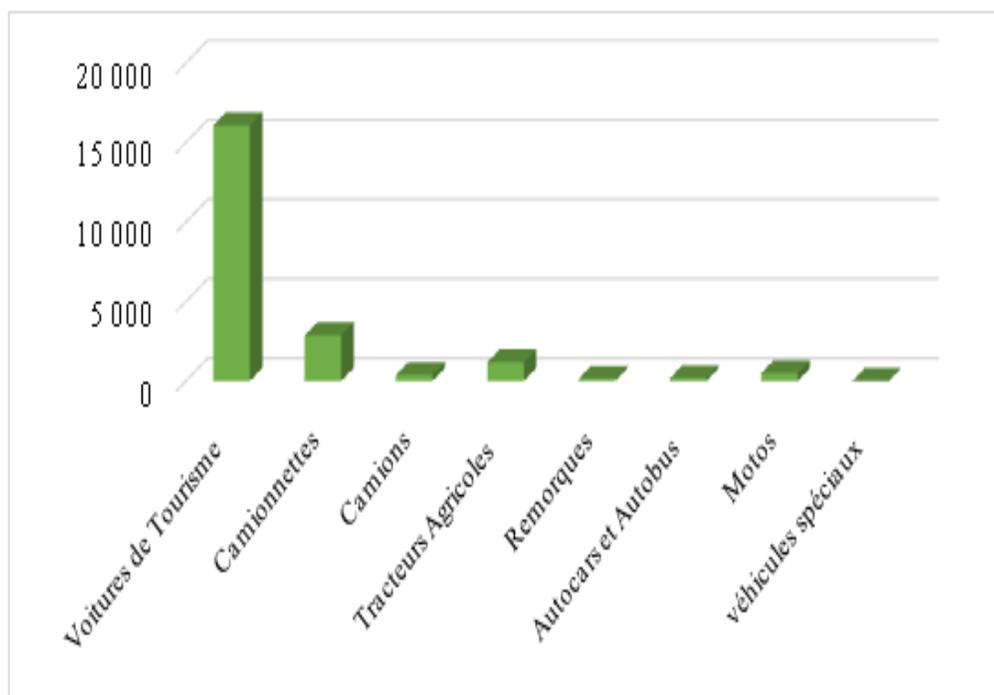


Figure 06 : Répartition du parc automobile à Constantine par genre de véhicules.

2. Choix et localisation des stations d'échantillonnage

Dans le cadre de cette étude, l'échantillonnage a été effectué le long de la route nationale N°5 (RN5) reliant la cité Boussouf à la commune d'Ain Smara. Cette route était l'axe principal de transport entre la capitale et l'est du pays pendant une longue période, et était considérée comme la route la plus fréquentée avant l'ouverture de l'autoroute Est-Ouest (Figure 07).

Le point de départ était situé à proximité de l'Institut National de l'Alimentation, la Nutrition et des Technologie Agro-alimentaires (INATAA) et s'est étendu jusqu'à l'entrée de la commune d'Ain Smara, sur une distance de 18 km (aller/retour). Durant l'exploration de la zone d'étude, 13 points de prélèvements ont été retenus. La zone d'échantillonnage et les points de prélèvement sont illustrés par les figures 08 et 09.

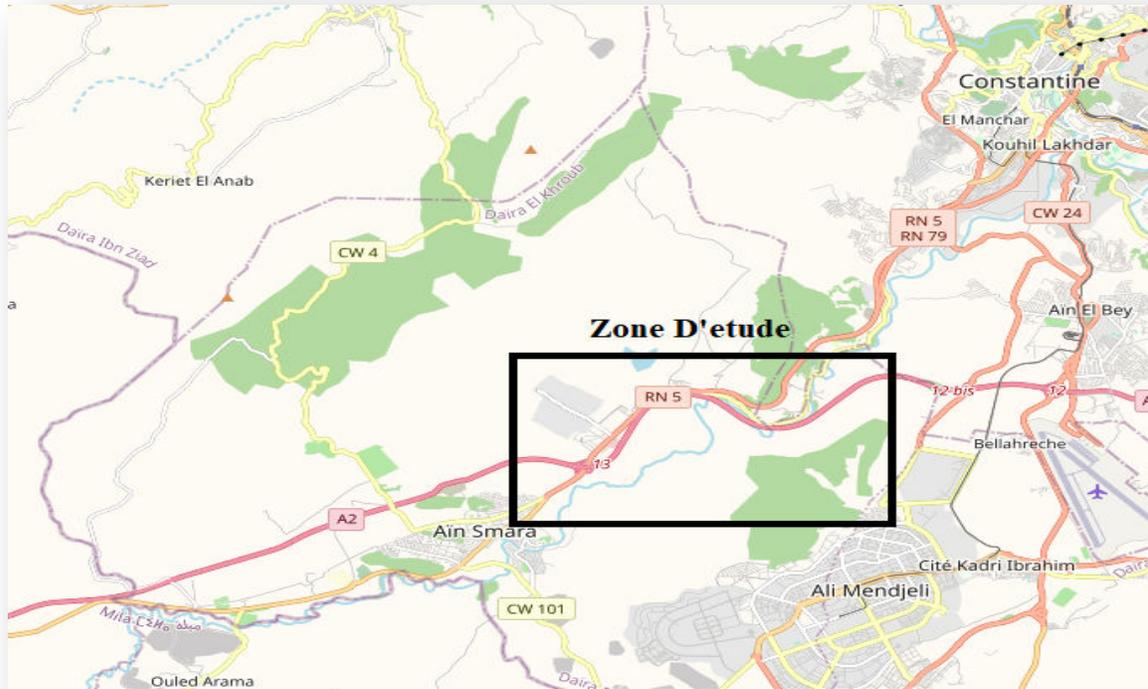


Figure 07 : Localisation de la zone d'échantillonnage (openstreetMap, 2023).

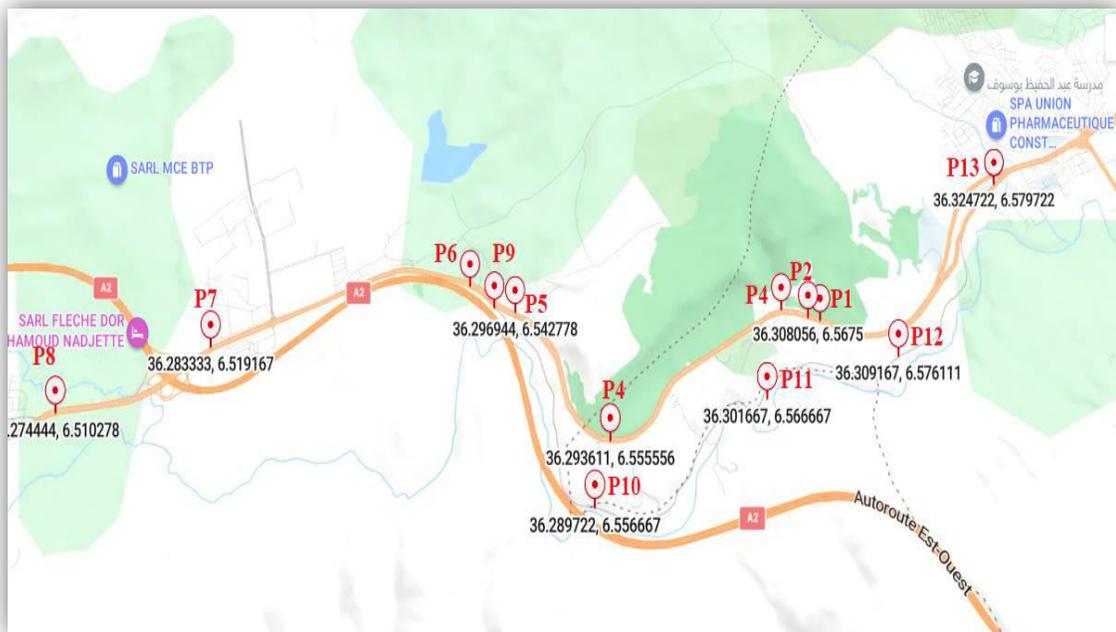


Figure 08 : Localisation des stations de prélèvements (Bing MAP 2023).

3. Prélèvement, traitement et préparation des sols

Les échantillons de sol ont été prélevés d'une manière aléatoire à l'aide d'une tarière en acier à une profondeur de 20 cm. Treize échantillons ont été collectés le long de l'axe routier reliant la cité Boussouf à la commune d'Ain Smara.

Les échantillons de sol ont été soigneusement conservés dans des sacs en plastique, identifiés par le lieu et la date de prélèvement. Une fois au laboratoire, le sol échantillonné est séché à l'air libre durant une période de 15 jours. Ensuite, il est broyé à l'aide d'un mortier en porcelaine, tamisé à 2mm de diamètre, et conservé dans des sacs en papier Kraft jusqu'à analyse (Figure 09).



Figure 09 : prélèvement et préparation des échantillons de sol.

4. Extraction et dosage des ETM

4.1. Extraction des ETM dans le sol

L'extraction des ETM dans les échantillons de sol a été effectuée par digestion humide à l'eau régale. La digestion a été réalisée à chaud en utilisant une unité de minéralisation Kjeldahl. Ainsi, 500 mg de sol ($\varnothing < 2$ mm), ont été digérés avec 10 ml d'eau régale (1 V d'acide nitrique- HNO_3 , 65%, Sigma-Aldrich, USA, et 3 V d'acide chlorhydrique- HCl , 37%, Sigma-Aldrich, USA). Après refroidissement, la solution obtenue est filtrée dans des fioles de 20 ml en utilisant du papier filtre sans cendres de type Whatman 540, puis conservés à 4°C jusqu'à analyse. Les étapes du processus d'extraction des ETM dans les échantillons de sol sont illustrées par la figure 10.

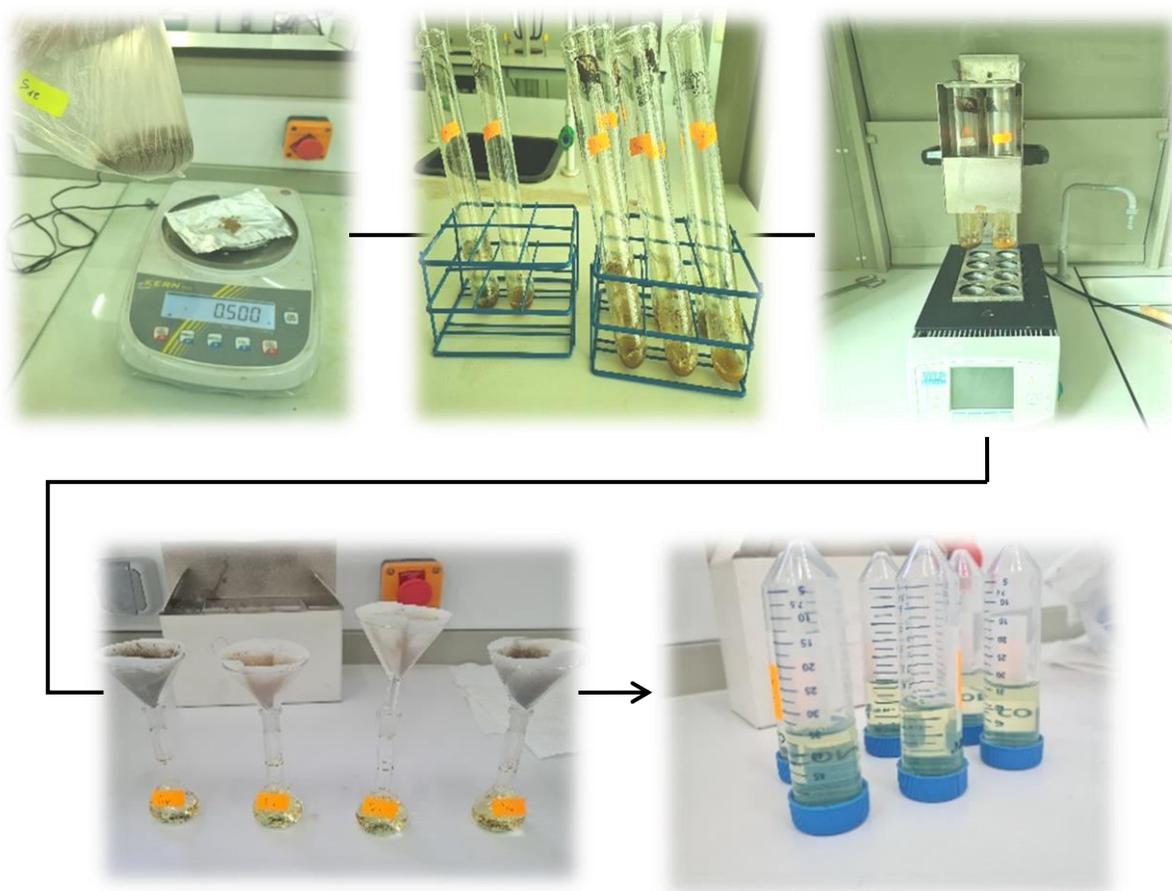


Figure 10 : Processus d'extraction des ETM dans le sol.

4.2. Dosage des ETM

Le dosage des ETM (Cd, Pb) dans les extraits de sol a été effectué par Spectrophotométrie d'Absorption Atomique à Flamme de type UNICAM 919/71. La flamme utilisée correspond à un mélange air-acétylène.

5. Traitement statistique des résultats

Les teneurs en cadmium et en plomb dans le sol ont été représentés par leurs données statistiques (minimum, moyenne, maximum, et écartype). Cette présentation permet d'avoir une vue d'ensemble sur la présence de ces éléments dans le sol.

De plus, différents indices ont été calculés. Ces derniers permettent un meilleur diagnostic des niveaux de contamination par les ETM, et une évaluation correcte du risque écologique engendré par la présence en excès combinée ou non de ces éléments dans le sol.

Auparavant, différentes représentations graphiques ont été réalisées. Ces dernières permettent une meilleure visualisation et interprétation des résultats obtenus.

Chapitre III

Résultats et discussion

1. Teneurs en cadmium et en plomb dans les sols

Les résultats des teneurs en éléments traces métalliques (Cd, Pb) dans les sols de la zone d'étude sont présentés dans le tableau 04 par leurs valeurs statistiques (minimum, maximum, moyenne, et écart type). Sont indiqués également sur ce même tableau, les fonds géochimiques rapportés par différents auteurs dans le monde. De plus, les teneurs en Cd et Pb enregistrées par station sont illustrées par les figures 11 et 12.

Tableau 04 : Données statistiques des teneurs en cadmium et en plomb dans le sol ($\mu\text{g/g}$).

		Cd	Pb
Minimum		0.08	1.08
Maximum		4.48	420
Moyenne		0.83	89.77
Ecartype		1.19	121.15
Fond géochimique	Sols mondiaux¹	0.41	27
	Sols français²	nc	31.2
	Sols américains³	nc	16
	Sols canadiens⁴	nc	70
Données bibliographiques	El HadeF El Okki et al. (2016)	[0.68-2.34]	[15.6-53.9]
	Belhiouani (2019)	[0.02-0.37]	[17.90-63.72]
	Sahraoui (2022)	[0.22-0.46]	[17.37-85.38]
	Cheriti (2022)	[0.05-2.28]	[13.01-147.52]
	Taiba et al. 2022	-	[19.85-468.13]

nc : non communiqué, ¹Kabata-Pendias (2011) ; ²Baize (1997) ; ³Shacklette and Boerngen (1984); ⁴Canadian Council of Ministers of the Environment-CCME (2007).

1.1. Teneurs en cadmium dans le sol

Les résultats des teneurs en Cd enregistrées pour les sols de la zone d'étude montrent des variations spatiales relativement importantes (Tableau 04, Figure 11). La valeur la plus faible ($0.08 \mu\text{g/g}$) est enregistrée au niveau de la station 03, alors que la plus élevée ($4.48 \mu\text{g/g}$) est celle de la station 07. La moyenne pour l'ensemble des sols investigués est de $0.83 \mu\text{g/g}$.

Faute de normes pour les sols algériens, nous avons tenté de comparer nos résultats avec les backgrounds donnés par différents auteurs et/ou organismes dans le monde (Tableau 04). Ainsi, il apparait que les concentrations enregistrées dépassent largement le fond géochimique proposé par Kabata-Pendias (2011) pour les sols mondiaux dans 41,66% des cas. La moyenne enregistrée pour la zone d'étude est également supérieure à cette valeur de référence ($0.41 \mu\text{g/g}$) indiquant ainsi un enrichissement de ces sols par le cadmium.

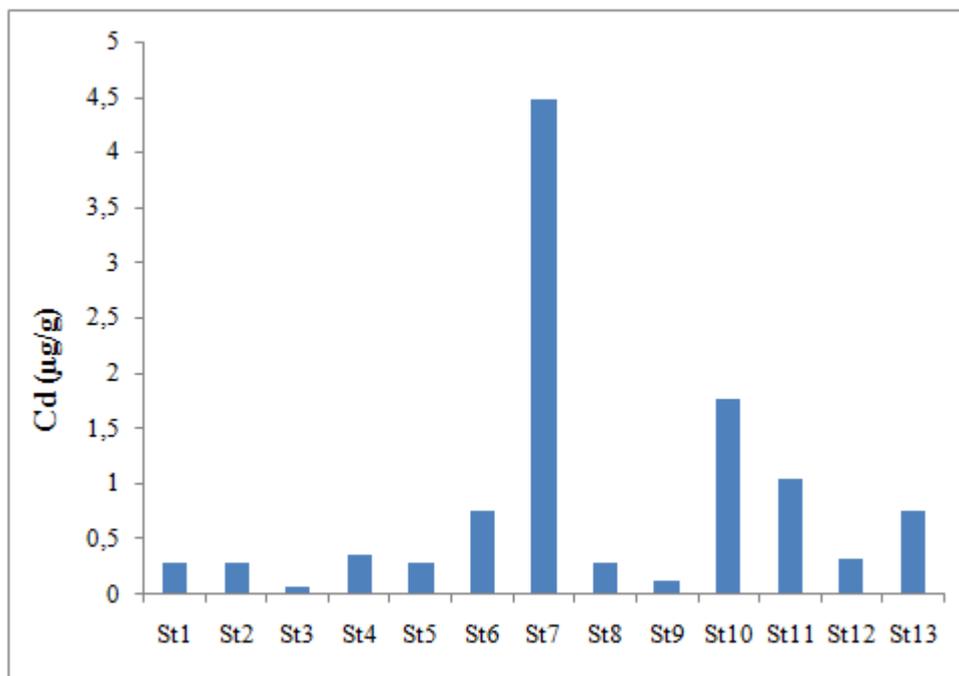


Figure 11 : Répartition des teneurs en cadmium ($\mu\text{g/g}$) dans le sol en fonction des stations.

1.2. Teneurs en plomb dans le sol

Les résultats des teneurs en Pb contenu dans les sols de la zone d'étude portés dans le tableau 04 et illustrés par la figure 12, montrent que la concentration la plus basse ($1,08 \mu\text{g/g}$) a été observée au niveau de la station 01, tandis que la plus élevée ($420 \mu\text{g/g}$) a été notée au niveau de la station 07. En moyenne, pour l'ensemble des sols étudiés, la concentration est de $89,77 \mu\text{g/g}$.

De même que pour le cadmium, les résultats enregistrés pour la zone d'étude ont été confrontés aux fonds géochimiques fournies par différents auteurs le monde, tels qu'indiqués dans le Tableau 04. Ainsi, il apparaît que les concentrations enregistrées dépassent largement le fond géochimique proposé par Kabata-Pendias (2011) pour les sols mondiaux dans 27% des cas. La moyenne observée dans la zone d'étude dépasse également cette valeur de référence ($27 \mu\text{g/g}$) reflétant ainsi un enrichissement des sols par le plomb.

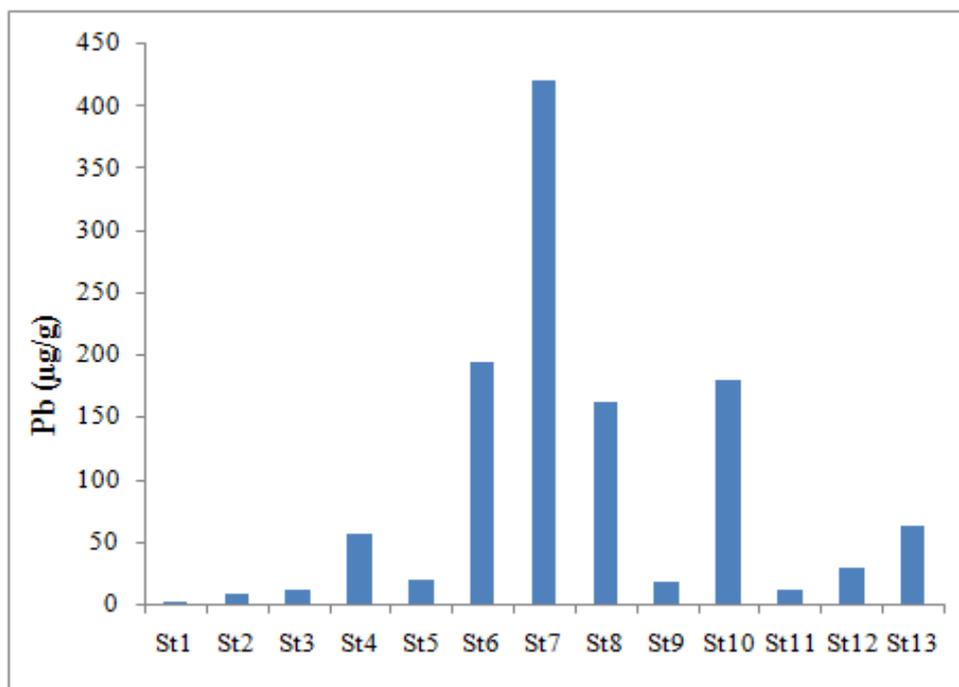


Figure 12 : Répartition des teneurs en plomb ($\mu\text{g/g}$) dans le sol en fonction des stations.

2. Diagnostic du niveau de contamination métallique des sols et évaluation du risque écologique : approche des indices

Les indices utilisés dans cette étude pour l'évaluation du niveau de contamination des sols de la zone investiguée, par le cadmium et le plomb, et du risque écologique causé par ces derniers sur les composantes du milieu naturel sont de deux types : monométalliques et polymétalliques.

Pour le premier type, nous avons utilisé l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur de contamination (FC), et l'indice de risque écologique (Er). Pour le deuxième, nous avons calculé le degré de contamination (DC), et l'indice de risque écologique potentiel (PERI).

Pour le calcul de ces indices, nous avons retenu les valeurs de références du Cd et du Pb indiquées dans le tableau 04 établies pour les sols mondiaux par Kabata-Pendias (2011). Ainsi, la valeur de référence pour le cadmium est ($\text{Cd} = 0.41 \mu\text{g/g}$) et pour le plomb ($\text{Pb} = 27 \mu\text{g/g}$).

2.1. Les indices monométalliques

2.1.1. Indice de géo-accumulation

Cet indice permet l'évaluation du niveau de contamination des sols par les ETM. De caractère empirique, il compare une concentration donnée versus une valeur considérée

comme fond géochimique. Contrairement au facteur de contamination, cet indice implique un coefficient (1,5) qui permet de corriger les variations dans les niveaux de background pouvant être causées par des effets de lithologie (Müller, 1981). Il est calculé selon la formule ci-dessous.

$$I_{geo_x} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 Bg_x} \right)$$

Avec :

C_x : est la teneur de l'élément x dans un échantillon du sol ;

Bg_x : est le bruit de fond géochimique pour cet élément x.

Müller (1981) a proposé 7 classes pour interpréter cet indice. Ces dernières sont décrites dans le tableau 05.

Tableau 05 : Classes de contamination des sols en fonction de l'indice de géo-accumulation-Igeo (Müller, 1981).

Classe	Indice de géo accumulation	Interprétation
1	$I_{géo} < 0$	Non contaminé
2	$0 < I_{géo} < 1$	Non contaminé à modérément contaminé
3	$1 < I_{géo} < 2$	Modérément contaminé
4	$2 < I_{géo} < 3$	Contamination modérée à élevée
5	$3 < I_{géo} < 4$	Contamination élevée
6	$4 < I_{géo} < 5$	Contamination élevée à extrêmement élevée
7	$I_{géo} > 5$	Contamination extrêmement élevée

Les résultats relatifs au calcul de cet indice pour les deux éléments sont illustrés par les figures 13 et 14. Ces dernières montrent que :

L'indice de géo-accumulation du cadmium varie entre un minimum de -2.94 et un maximum de 2.86, enregistrés au niveau des stations 3 et 7, respectivement (Figure 13). Les sols étudiés sont ainsi considérés comme non contaminés à modérément contaminés par ce métal. Sur les 13 stations retenues pour cette étude, les sols sont non contaminés dans 8 stations ($I_{géo} < 0$), non contaminés à modérément contaminés dans 3 stations ($0 < I_{géo} < 1$), modérément contaminés dans un seul cas ($1 < I_{géo} < 2$). La classe de contamination modérée à élevée est également représentée par une seule station ($2 < I_{géo} < 3$).

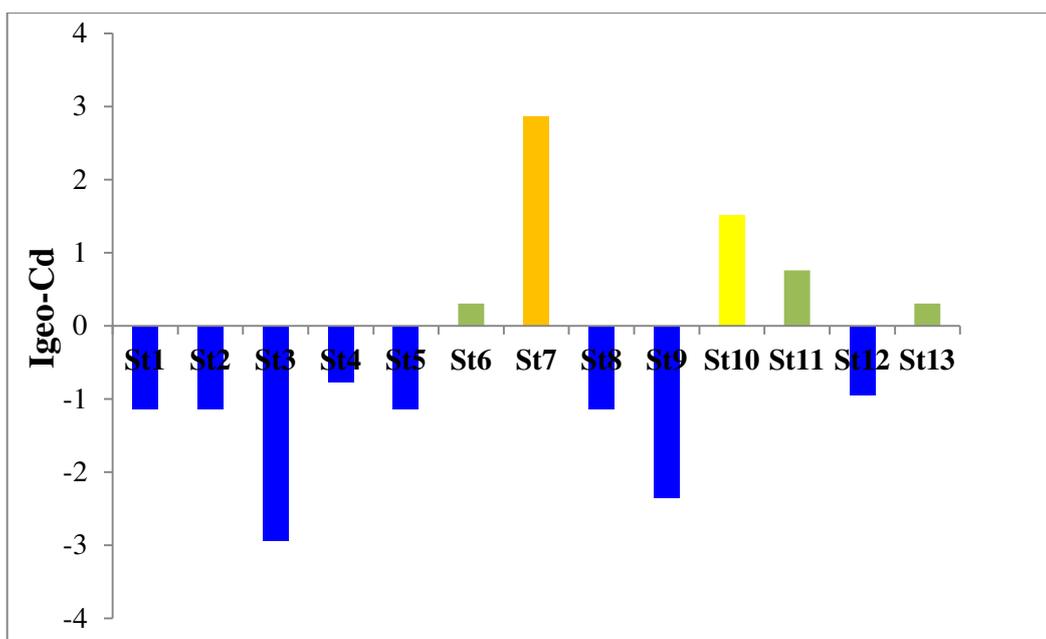


Figure 13 : Variation des indices de géo-accumulation du cadmium en fonction des stations.

Pour le plomb, l'indice de géo-accumulation varie de -5,22 à 3,37, enregistrés respectivement au niveau des stations 1 et 7 (Figure 14). Ainsi, sur l'ensemble des sols étudiés la contamination est modérée à élevée. Parmi les 13 stations incluses dans cette étude, 7 points sont caractérisés par des sols non contaminés ($I_{\text{géo}} < 0$), 2 stations sont non contaminées à modérément contaminées ($0 < I_{\text{géo}} < 1$). Au niveau des stations 6, 8 et 10, la contamination est modérée à élevée ($2 < I_{\text{géo}} < 3$). Enfin, la classe de contamination élevée est également représentée par une seule station ($3 < I_{\text{géo}} < 4$).

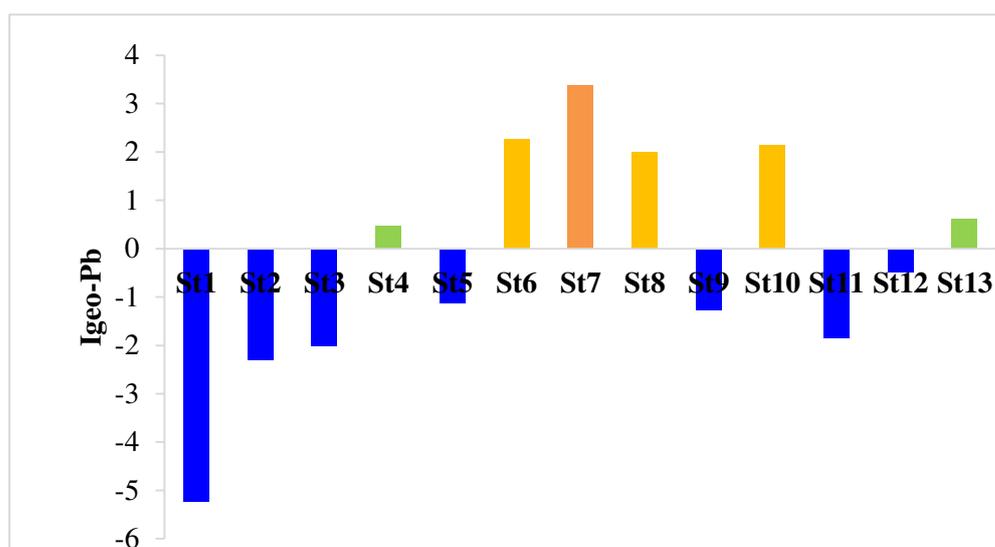


Figure 14 : Variation des indices de géo-accumulation du plomb en fonction des stations.

2.1.2. Facteur de contamination

Le facteur de contamination (FC) est le rapport entre la concentration d'un métal dans le sol étudié et sa teneur dans un sol de référence. Il est calculé selon la formule suivante :

$$FC = \left(\frac{C_x}{Bg_x} \right)$$

Avec :

C_x : Concentration de l'élément mesurée dans le sol,

Bg_x : Concentration de référence de ce même élément

L'interprétation des résultats se fait suivant les classes de contamination établies par Hakanson (1980) récapitulées dans le tableau 06.

Tableau 06 : Classes de qualité selon le facteur de contamination-FC (Hakanson, 1980).

Classe	Facteur de contamination	Interprétation
1	$FC < 1$	Faible
2	$1 \leq FC < 3$	Modérée
3	$3 \leq FC < 6$	Considérable
4	$6 \leq FC$	Très forte

En ce qui concerne le cadmium (Figure 15), le facteur de contamination varie de 0,19 à 10,92, enregistrés respectivement aux stations (St3) et (St7). Les sols étudiés sont donc considérés comme faiblement à très fortement contaminés par ce métal. Parmi les 13 stations incluses dans cette étude, 8 sont faiblement contaminées ($FC < 1$), 3 stations sont classées comme modérément contaminées ($1 \leq FC < 3$). Une seule station (St10) est classée dans la catégorie de contamination considérable ($3 \leq FC < 6$), et une autre (St7) dans la catégorie de contamination très forte ($FC \geq 6$).

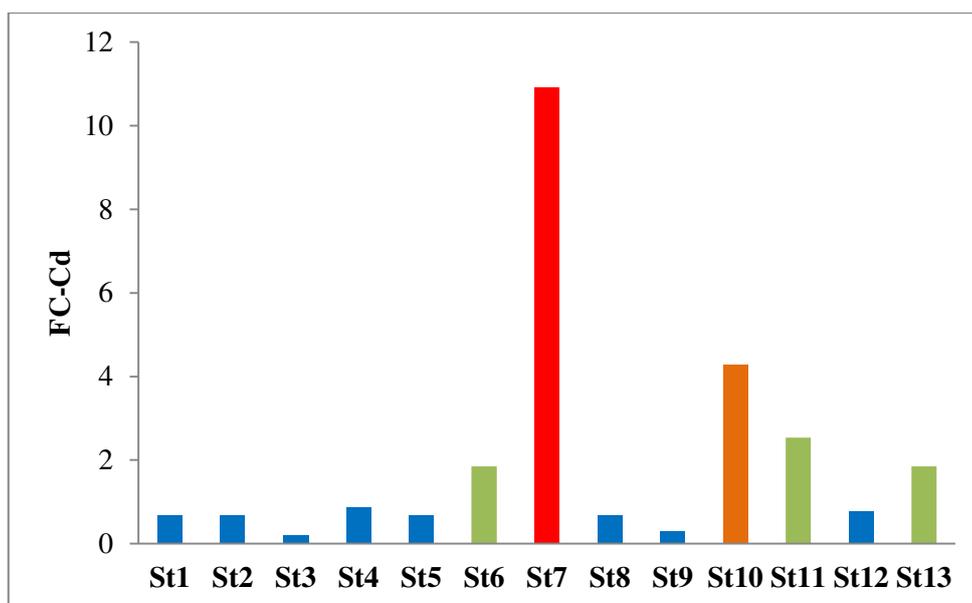


Figure 15 : Variation des facteurs de contamination du cadmium en fonction des stations.

Pour le plomb (Figure 16), les valeurs du facteur de contamination (FC) varient de 0,04 à 15,55, enregistrées respectivement au niveau des stations (St1) et (St7). Par rapport à l'ensemble des stations étudiées, 5 sols sur 13 sont faiblement contaminés par plomb ($FC < 1$), 3 sont classés comme modérément contaminés ($1 \leq FC < 3$), et 4 sont très fortement contaminés ($FC \geq 6$).

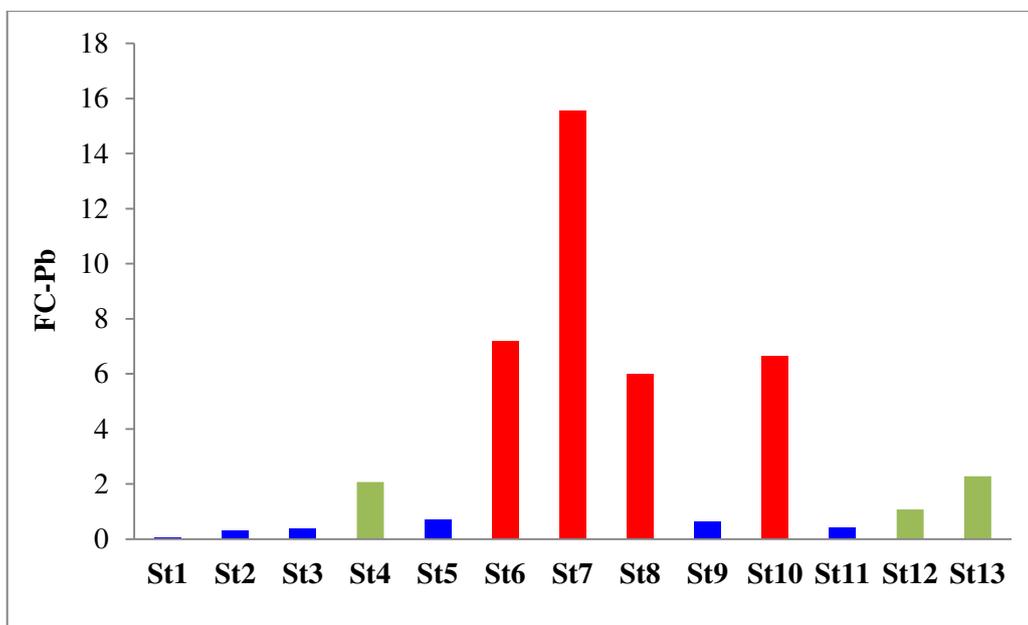


Figure 16 : Variation des facteurs de contamination du plomb en fonction des stations.

2.1.3. Indice de risque écologique

Cet indice permet d'estimer le risque écologique causé par un élément trace métallique sur l'écosystème et ses composantes (Hakanson, 1980). Il est calculé selon l'équation suivante :

$$E_r^i = T_r^i * FC_f^i$$

Avec :

FC = Facteur de contamination ;

T_r : Facteur de réponse toxique spécifique à chaque élément (Cd = 30, Pb = 5).

Pour l'interprétation des résultats, nous avons utilisé la classification de Hakanson (1980) décrite dans le tableau 07.

Tableau 07 : Classes de qualité selon l'indice de risque écologique-Er (Hakanson, 1980).

Classe	Indice de risque écologique	Interprétation
1	$E_r < 40$	Risque faible
2	$40 \leq E_r < 80$	Risque modéré
3	$80 \leq E_r < 160$	Risque considérable
4	$160 \leq E_r < 320$	Risque élevé
5	$320 \leq E_r$	Risque très élevé

Selon les résultats obtenus (Figure17), il a été observé que les valeurs de l'indice de risque écologique lié à la présence du cadmium dans le sol varient entre 5,85 et 327,80. Ces valeurs extrêmes ont été enregistrées respectivement, au niveau des stations (St3) et (St7). Ainsi, il convient de souligner que les teneurs en cadmium contenues dans les sols étudiés présentent un risque faible à très élevé.

Parmi les 13 stations sélectionnées dans cette étude, il a été constaté que dans 8 d'entre elles, les sols présentent un risque faible ($E_r < 40$). Dans 3 stations, le risque est modéré ($40 \leq E_r < 80$). Enfin, le risque est considérable ($80 \leq E_r < 160$) à très élevé ($E_r \geq 320$) au niveau des stations (St10) et (St7), respectivement.

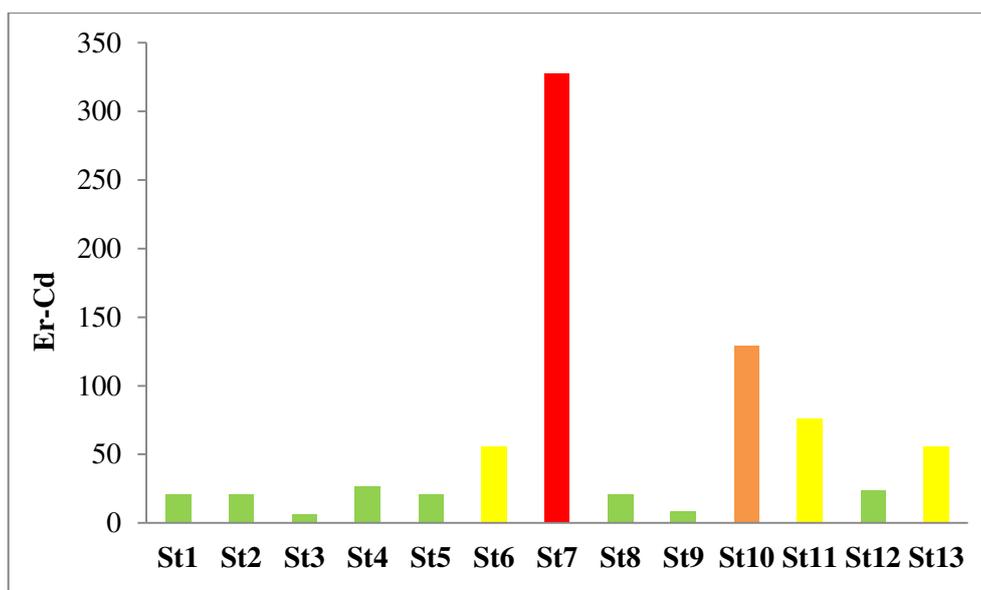


Figure 17 : Variation de l'indice du risque écologique du cadmium en fonction des stations.

Pour le plomb, les résultats obtenus (Figure 18) ont révélé que l'indice de risque écologique associé à ce métal présente une gamme de valeurs allant de 0,20 à 77,78. Ces valeurs extrêmes ont été enregistrées, respectivement, aux stations (St1) et (St7). Ainsi, le niveau du risque écologique au niveau de ces stations est faible à modéré.

Parmi les 13 stations sélectionnées pour cette étude, il a été observé que dans 12 d'entre elles, les teneurs en plomb dans le sol présentent un risque faible ($Er < 40$). Ce risque est modéré ($40 \leq Er < 80$) au niveau de la station (St7).

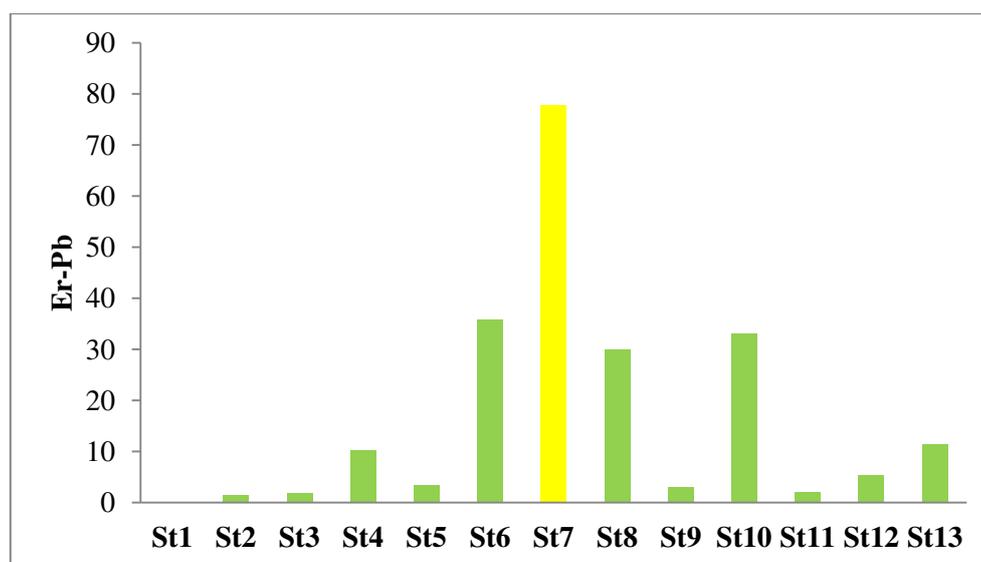


Figure 18 : Variation de l'indice du risque écologique du plomb en fonction des stations.

2.2. Les indices polymétalliques

2.2.1. Degré de contamination (DC)

Le degré de contamination permet d'évaluer le niveau de contamination polymétallique des sols. Il est calculé selon la formule suivante :

$$DC = \sum_{i=1}^n FC$$

Avec :

i: l'élément donné ;

n : le nombre d'éléments traces métalliques étudiés (2 dans notre cas)

FC : le facteur de contamination.

Pour l'interprétation des résultats, nous nous sommes basés sur la classification établie par Hakanson (1980) décrite dans le tableau 08.

Tableau 08 : Classes de contamination des sols en fonction du degré de contamination-DC (Hakanson, 1980)

Classe	Degré de contamination	Classes
1	DC < 8	Faible degré de contamination
2	8 ≤ DC < 16	Degré de contamination modéré
3	16 ≤ DC < 32	Degré de contamination considérable
4	DC ≥ 32	Degré de contamination très élevé

Les résultats relatifs au calcul du degré de contamination sont illustrés par la figure 19. L'examen de cette dernière montre que cet indice varie entre 0,5 et 18,09 enregistrées, respectivement, aux stations 2 et 6. Ainsi, la présence combinée du cadmium et du plomb dans le sol révèle un degré de contamination polymétallique faible à considérable. Cette valeur critique est due essentiellement à la présence du cadmium ; en effet, ce dernier y contribue à 60.36%

Parmi les 13 stations incluses dans cette étude, on observe que 10 stations présentent un faible degré de contamination (DC<8), une station est classée comme ayant un degré de contamination modérée (8≤ DC<16). Les sols des deux stations restantes (St6 et St7) sont classés dans la catégorie de degré de contamination considérable (16 ≤ DC<32).

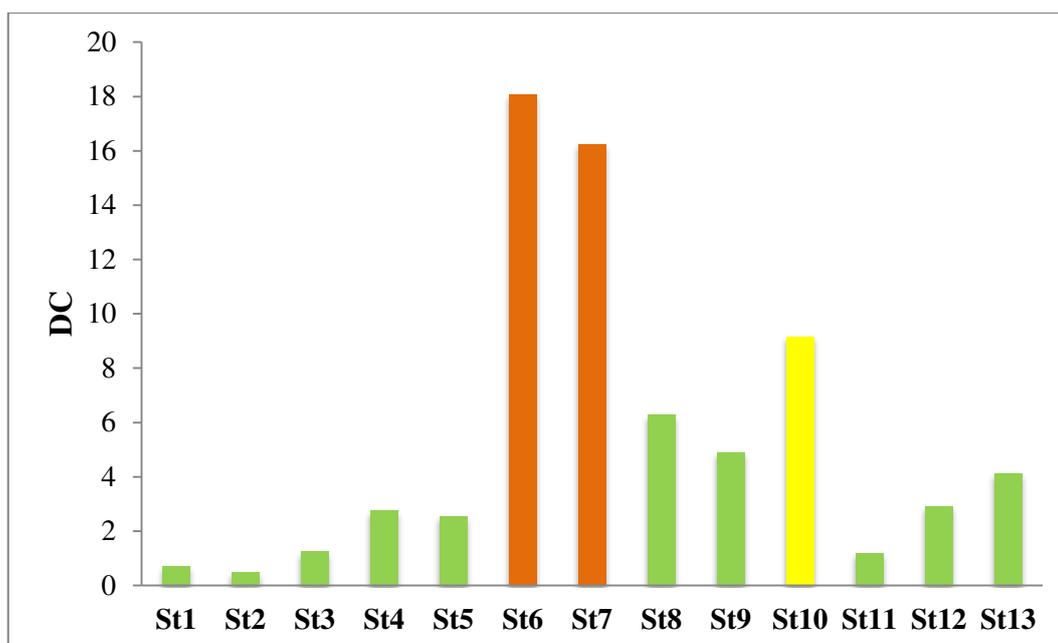


Figure19 : Variation du degré de contamination en fonction des stations.

2.2.2. Indice de risque écologique potentiel (PERI)

Cet indice est utilisé pour évaluer le risque écologique potentiel polymétallique. Il est calculé selon la formule ci-dessous (Hakanson, 1980).

$$PERI_x = \sum (E_r^i)$$

Avec :

Er : Indice de risque écologique monométallique.

L'interprétation de ces résultats se fait sur la base de la classification établie par Hakanson (1980) décrite dans le tableau 09.

Tableau 09 : Classes de contamination des sols en fonction de l'indice du risque écologiques potentiel-PERI (Hakanson, 1980).

Classe	Indice de risque écologique potentiel	Interprétation
1	PERI < 90	Risque faible
2	90 ≤ PERI < 180	Risque modéré
3	180 ≤ PERI < 360	Risque considérable
4	360 ≤ PERI < 720	Risque élevé
5	720 ≤ PERI	Risque très élevé

D'après les résultats obtenus (Figure 20), il a été remarqué que l'indice de risque écologique potentiel associé aux deux métaux (Cd et Pb) affiche une plage de variation allant de 7,69 à 405,58. Ces valeurs extrêmes ont été enregistrées respectivement aux stations (St3) et (St7). Il est important de souligner que les sols examinés présentent un éventail de risques allant d'un niveau faible, sans contamination, à un niveau considérable. Parmi les 13 stations sélectionnées pour cette étude, on a observé que dans 10 d'entre elles, les sols présentent un risque polymétallique faible ($PERI < 90$). Dans 2 stations, les sols présentent un risque modéré ($90 \leq PERI < 180$). Ce risque est considérable ($180 \leq PERI < 360$) au niveau de la station (St7).

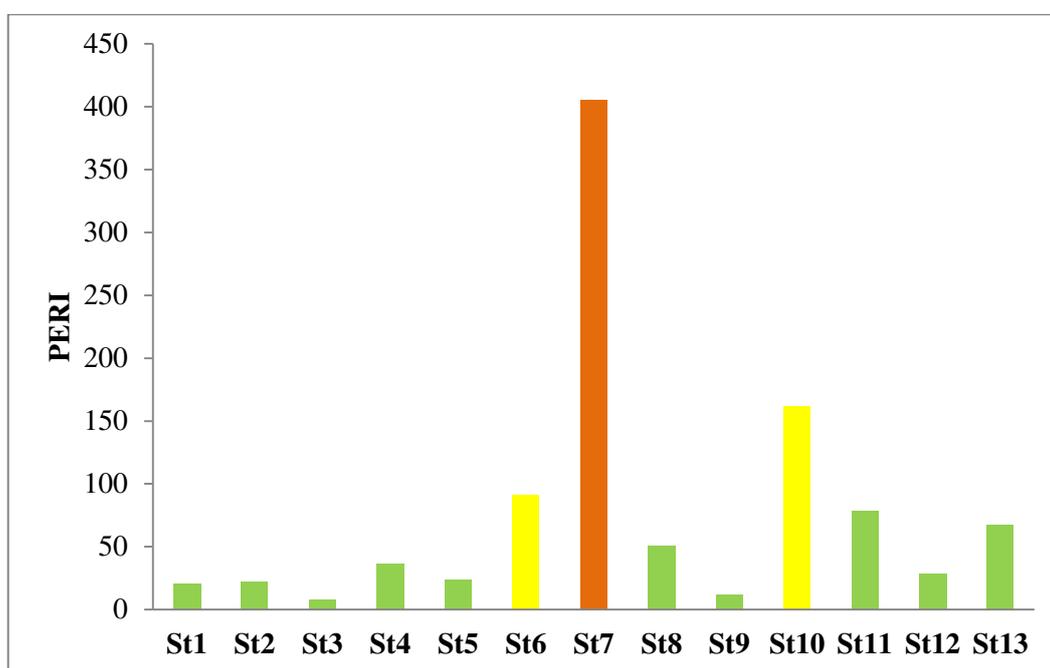


Figure 20 : Variation de l'indice de risque écologique potentiel en fonction des stations.

3. Discussion

Globalement, les résultats obtenus révèlent la présence du Cd et du Pb dans tous les échantillons de sols prélevés sur les 13 stations investiguées. Le plomb est plus abondant que le cadmium et ceci quelque soit le point de prélèvement. Les concentrations moyennes sont de l'ordre de $0.83 \mu\text{g/g}$ et $89.77 \mu\text{g/g}$, pour le cadmium et le plomb, respectivement.

La confrontation de ces concentrations aux normes des fonds géochimiques établies par différents auteurs et organismes dans le monde a révélé des perturbations et des enrichissements considérables par les deux éléments. En effet, les teneurs enregistrées pour le cadmium dépassent la valeur proposée par Kabata-Pendias (2011) dans 5 stations sur 13

investiguées. C'est aussi le cas pour le plomb ; les teneurs enregistrées dépassent la valeur de références proposée par le même auteur pour les sols mondiaux ($27 \mu\text{g/g}$) dans 7 stations, celle des sols français ($31.2 \mu\text{g/g}$) proposée par Baize (1997) dans 6 stations, celle des sols américains ($16 \mu\text{g/g}$) proposée par Shacklette and Boerngen (1984) dans 9 stations, et celle des sols canadiens ($70 \mu\text{g/g}$) proposée par le conseil canadien du ministère de l'environnement-CCME (2007) dans 4 stations.

Par rapport aux données bibliographiques, nous avons tenté de confronter nos résultats aux teneurs rapportées par différents auteurs en Algérie (Tableau 04). Ainsi, il apparaît que la concentration minimale en cadmium ($0.08 \mu\text{g/g}$) enregistrée pour les sols de la zone d'étude est proche des minimums enregistrés par Belhiouani (2019) pour les sols de bordures de la route nationale (RN03) reliant le centre de ville de Constantine à la commune de Hmma Bouziane, et par Cheriti (2022) pour les sols des bordures des oueds du bassin versant Kebir Rhueml. En effet, ces auteurs ont rapportés des valeurs de l'ordre de ($0.02 \mu\text{g/g}$) et ($0.05 \mu\text{g/g}$), respectivement. Il est important de rappeler que ces valeurs sont inférieures à la plupart des bruits de fond proposés par différents auteurs dans le monde. Ainsi, ces concentrations pourraient refléter le fond géochimique des sols dans le constantinois. En revanche, la concentration maximale en cadmium enregistrée pour la zone d'étude ($4.48 \mu\text{g/g}$) est largement supérieure à celles rapportées par différents auteurs pour les sols en Algérie. En effet, El hadef El Okki et al. (2016) ont rapporté un maximum de l'ordre de ($2.34 \mu\text{g/g}$) pour les sols des bordures de l'oued Rhumel en zone urbaine, Belhiouani (2019) a enregistré une concentration maximale de l'ordre de ($0.37 \mu\text{g/g}$) pour les sols en bordures de la route nationale N03, Sahraoui (2022), a rapporté un maximum de ($0.46 \mu\text{g/g}$) pour les sols de la même zone, et enfin Cheriti (2022) a enregistré une valeur maximale de l'ordre de ($2.28 \mu\text{g/g}$).

Concernant les teneurs en plomb, la valeur la plus faible ($1.08 \mu\text{g/g}$) enregistrée pour la zone d'étude est nettement inférieure à celles rapportées par différents auteurs pour les sols algériens (Tableau 04), notamment El Hadeef El Okki et al. (2016), Belhiouani (2019), Sahraoui (2002), Cheriti (2022), et Taiba et al. (2022). Cependant, la concentration maximale en plomb enregistrée pour la zone d'étude ($420 \mu\text{g/g}$) dépasse largement celles rapportées par El Hadeef El Okki et al. (2016) qui ont enregistré un maximum de l'ordre de ($53.9 \mu\text{g/g}$), Belhiouani (2019) avec une concentration maximale de l'ordre de ($63.72 \mu\text{g/g}$), Sahraoui (2022) avec une valeur maximale en plomb de ($85.38 \mu\text{g/g}$), et Cheriti (2022) avec un maximum de 147.52. Il est à signaler que cette valeur maximale est très

proche de celle enregistrée par Taiba et al. (2022) pour des sols prélevés dans une zone industrielle, à proximité du complexe sidérurgique ArcelorMittal à Annaba.

Dans les sols naturels, les teneurs en ETM sont largement influencées par la présence de ces derniers dans la roche mère, elles sont souvent faibles et reflètent le fond géochimique. A l'inverse, les concentrations dépassant le bruit de fond géochimique indiquent un enrichissement par ces éléments, et reflètent donc l'impact des activités anthropiques. Ainsi, les teneurs élevées en cadmium et plomb enregistrées pour la zone d'étude peuvent être dû a fait que les échantillons de sols ont été prélevés sur les bordures de l'axe routier reliant la cité Bousouf à la commune d'Ain Smara. Ce tronçon est caractérisé par un trafic intense et fût pendant longtemps la principale route reliant le contre ville de Constantine à la capitale Alger. Actuellement, malgré l'ouverture l'autoroute Est-Ouest, cet axe continue à être très fréquenté, et est ainsi considérée comme la principale source de contamination des écosystèmes dans cette région. En effet, les émissions des véhicules constituent l'une des principales sources de contamination par les éléments traces métalliques (ETM) en milieu urbain (Jeong, 2022. Keshavarzi et al. 2021). Les gaz d'échappement des véhicules ainsi que l'usure de la route, des pneus et des freins peuvent libérer des ETM qui se déposent sous forme de dépôts atmosphériques secs ou humides (Duong et Lee, 2011). Plusieurs études ont confirmé l'influence des émissions des véhicules sur l'enrichissement des sols en cadmium à proximité des routes (Aslam et al. 2015 ; Szwalec et al. 2020, Tammime et Bouza, 2020 ; Derouaz et Benguedouar, 2021). Luo et al. (2015) ont conclu que le trafic routier contribue à la contamination des différents horizons des sols urbains par le cadmium avec un pourcentage allant de 26% à 59 %. En effet, ce métal est utilisé comme stabilisant des caoutchoucs, et est ajouté aux lubrifiants et aux équipements de protection (glissière, clôture, usure de la chaussée, etc.). D'après la bibliographie, l'usure des pneus et des freins sont responsables de 3 à 7 % des émissions de cadmium dans le milieu naturel. D'autres études ont également souligné la corrélation entre l'intensité du trafic routier et les niveaux de plomb dans le sol (Yilmaz et Zengin, 2004 ; Yan-Ju et al. 2007). En effet, les concentrations en plomb dans le sol au bord des routes en zone urbaine peuvent être très élevées en raison de l'accumulation progressive de dépôts de poussière contenant du plomb provenant des gaz d'échappement et des particules atmosphériques. Bien que l'utilisation de carburants plombés ait été largement éliminée en Algérie, et ce depuis la généralisation de la production, du transport et de la commercialisation de l'essence sans plomb depuis le 1^{er} juillet 2021, et la suppression des essences plombées, les émissions passées des véhicules à essence au plomb peuvent encore persister pendant

longtemps dans le sol. Le carburant contenant du plomb tétraéthyle, utilisé comme antidétonant, généré sans doute des quantités significatives d'oxyde de plomb dans les gaz d'échappement des véhicules, ainsi que des traces de plomb tétraéthyle. Sellami et al. (2020), grâce à l'analyse par fluorescence X de l'essence commerciale, ont rapporté une teneur en plomb de 0,982 g/L, correspondant à 1,53 g de plomb tétraéthyle par litre d'essence en Algérie. De même, Oucher et al. (2015), dans leur étude sur la pollution de l'air associée aux ETM et aux particules d'aérosols à Alger, ont enregistré une concentration d'environ 299,3 ng/m³ en plomb, concluant que l'essence au plomb en était la principale source.

De plus, il est important de souligner que la concentration en ETM dans le sol peut varier selon plusieurs facteurs. Cela peut inclure l'intensité du trafic routier, la densité des véhicules, la vitesse, les pratiques de maintenance routière, l'état de la route, et d'autres activités à proximité de la route. Plusieurs pics de concentrations en cadmium mais aussi en plomb ont été enregistrés pour les sols étudiés. Ces pics peuvent être attribués au fait que ce tronçon de la route nationale (RN05) est caractérisée par la présence de ralentisseurs qui obligent les conducteurs à freiner. La conduite agressive génère des quantités importantes de polluants, mais un freinage excessif peut également contribuer à ces pics de pollution. Cela pourrait expliquer en partie les concentrations élevées en cadmium et en plomb enregistrées au niveau des stations 6, 7 et 10. Ces constatations ont été confirmées par le calcul des indices de contamination. En effet, nous avons enregistré des Igeo supérieurs à l'unité dans ces stations reflétant des situations de contamination faible à élevée. Pour les FC, la situation est encore plus préoccupante ; en effet, la contamination est modérée à très forte.

De plus, il convient de souligner le risque écologique lié à la présence de ces ETM en quantité relativement importante dans le sol. Ceci est confirmé par le calcul des indices de risque monométallique (Er) spécifique à la présence excessive du cadmium ou du plomb dans le sol, mais aussi par l'indice PERI reflétant le risque lié à la présence combinée des deux éléments. De même que pour les indices de contaminations, ce risque semble être plus important au niveau des stations 6, 7 et 10. En effet, les valeurs de Er reflètent des situations de risque faible, modéré voir élevé selon les stations et l'élément étudié. Aussi, la présence excessive des deux éléments dans ces stations exprimé *via* le PERI reflète des situations de risque modéré à élevé. Ainsi, sur l'ensemble des sols étudiés, les résultats de l'indice de risque écologique monométallique et pluri métallique indiquent que les concentrations en Cd et Pb sont susceptibles d'avoir des effets nocifs sur les organismes

vivant dans le sol, et affecter par conséquent négativement la diversité, la biologie ou encore l'écologie des différentes communautés.

Conclusion

Conclusion

Le trafic routier et les infrastructures routières constituent une source majeure de contamination des écosystèmes et leurs composantes par différents types de polluants. Les émissions des véhicules ainsi que l'usure de la route, des pneus et des freins contribuent par exemple à l'enrichissement des sols en cadmium (Cd) et en plomb (Pb). Ces éléments peuvent avoir des effets nocifs sur les organismes vivant dans le sol, ce qui peut affecter la diversité, la biologie et l'écologie des différentes communautés.

A l'issue de cette étude relative à l'évaluation du niveau de contamination des sols en bordures de route par le cadmium et le plomb, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les résultats démontrent la présence généralisée du cadmium (Cd) et du plomb (Pb) dans tous les échantillons de sol prélevés sur les 13 stations étudiées. Les concentrations moyennes de Cd et Pb sont respectivement de l'ordre de 0,83 $\mu\text{g/g}$ et 89,77 $\mu\text{g/g}$. Ces concentrations dépassent les normes géochimiques établies par différents auteurs et organismes dans le monde ;
- Des pics de concentrations ont été enregistrés, notamment aux stations 6, 7 et 10, où les ralentisseurs et le freinage excessif ont contribué à un enrichissement accru des sols par le Cd et le Pb ;
- Les indices de géo accumulation, le facteur de contamination, le degré de contamination, l'indice de risque écologique monométallique et l'indice de risque écologique potentiel ont révélé des situations d'enrichissement et de risque considérables selon les stations et l'élément ;

Globalement, cette étude apporte une contribution significative à la compréhension de la contamination des sols par le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) dans la région étudiée. Elle met en évidence le rôle prépondérant du trafic routier en tant que source principale de contamination et souligne les risques écologiques qui en découlent.

En perspectives, il serait intéressant :

- d'élargir la zone d'étude en prenant en considération d'autres axes routiers, et plus particulièrement ceux de l'autoroute Est-Ouest ;
- de quantifier d'autres éléments traces métalliques dont la présence est souvent associée à celle du cadmium et plomb notamment le cuivre, le zinc, le chrome, le nickel, etc. ;

Conclusion

- de faire un suivi saisonnier afin de mettre en évidence l'effet des facteurs climatiques sur le dépôt ou encore la dispersion des polluants métalliques ;
- d'étudier d'autres types de polluants très caractéristiques des zones urbaines et axes routiers notamment les polluants particuliers (PM10, PM2.5, PM1, PM0.1)

*Références
bibliographiques*

Aichi L. 2015. Le Coût économique et financier de la pollution de l'air. Rapport publié au Journal Officiel Français-Édition des Lois et Décrets, 610. 299p.

Alloway B.J. 2013. Sources of heavy metals and metalloids in soils in: Heavy Metals in Soils. Springer, Dordrecht 22. 11-50.

Aslam M., Yaqub M., Akhtar R., Muhammad U., Bibi S., Talimand H and Shakir S.K. 2015. Effects of Road Side Pollution on Vegetation-A Mini-Review. J Bio-Molecular Sci, 3(3-4), 97-106.

Ayangbenro A.S. and Babalola O.O. 2017. A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments : A Review of Microbial Biosorbents. Int J Environ Res Public Health. 19, 14(1) : 94.

Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France): Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), 1-410p.

Belhiouani H. 2019. Utilisation intégrée des escargots pour la surveillance de la contamination métallique des sols : approches chimique, biologique et écotoxicologique, (PhD thesis), Université Frères Mentouri Constantine. 269p.

Bisht S., Pandey P., Bhargava B., Sharma S., Kumar V., Sharma K.D. 2015. Bioremediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology. Braz. J. Microbiol., 46 (1): 7-21.

Boutera M. 2014. Utilisation des végétaux pour l'évaluation de la pollution atmosphérique le long de l'autoroute Est-Ouest dans la région de Constantine. Mémoire de magister. Université Constantine 1, 132p.

Burton A.2016. Les Rues « canyons », des Hotspots Locaux de Pollution de l'air. Santé Environnement. <https://www.sante-environnement.be/Les-rues-canyons-des-hotspots-locaux-de-pollution-de-l-air>.

Callender E. 2003. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. In: B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 67-105.

Canadian Council of Ministers of the Environment-CCME. 2007. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: summary of a protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines. In: Canadian

environmental quality guidelines. Winnipeg, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment.

Catinon M. 2010. Détermination de la pollution atmosphérique métallique : étude critique de l'utilisation des écorces d'arbres. Thèse de Doctorat de l'université de Grenoble 1, École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement Laboratoire d'Ecologie Alpine-UMR 5553. 46, 48-148. 206p

Charpin D., Paireon J.C., Annesi-Maesano I., Caillaud D., De Blay F., Dixsaut G. and Delaval P. 2016. La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF). Revue des Maladies Respiratoires, 33(6), 484-508.

Cheriti O. 2022. Utilisation des gastéropodes pulmonés terrestres comme traceurs de la pollution métallique des sols dans le bassin du kebir Rhumel : de l'inventaire à la bioindication. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri Constantine 1. 240p.

Chouabbia K., Nedjima M. and Lazri Y. 2021. Connectivité durable et attractivité : cas du centre-ville de Constantine. Revue Dirassat. 12, 02: 3-39.

Deletraz G. 1998. Protocol de mesure de la pollution émis par l'A63 et de sa dispersion à Biriadou et à Urruge. In Iagasaki J-J. et Lavergne-Ruscassie M.P. (éd). Les effets de diffusion spatiale des autoroutes : recherche d'indicateurs permanents : 17 et 18 septembre 1998. Observatoire de l'environnement économique et écologique de l'autoroute A63 IRSAM (UPPA), Pau pp.115-128p.

Deletraz G., Paul E. 1998. État de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes. Rapport de la Sociétés-Environnement-Territoires (SET) et du Laboratoire de la montagne alpine (LAMA). Équipe SIG. Espace Serge Martin. 144,145p.

Delplace G., Viers J., Schreck E., Oliva P., Behra P. 2021. Pedo-geochemical background and sediment contamination of metal (loid)s in the old mining-district of Salsigne (Orbiel valley, France). Chemosphere. 287: 132111.

Derouaz M.C.E. et Benguedouar M.M. 2021. Utilisation des feuilles et écorces de *Fraxinus excelsior* L. comme indicateurs de la contamination par le chrome et le plomb en bordures de routes. Mémoire de master. Université Frères Mnetouri-Constantine 1. 83p.

- Dhaliwal S.S., Singh J., Taneja P.K. and Mandal A. 2020.** Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1319-1333.
- Duong T.T., and Lee B.K. 2011.** Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *Journal of environmental management*, 92(3), 554-562.
- Edelstein M., Ben-Hur M. 2018.** Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulture*. 234, 431-444.
- El-Okki El Okki M. 2016.** Etude des relations Lumbricidae-éléments traces métalliques en conditions naturelles et contrôlées. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri-Constantine 1. 272p.
- Fontana Y. 2019.** La Chine et l'Inde dans les négociations internationales sur le climat: une analyse comparée à partir de facteurs environnementaux, énergétiques et économiques. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes. 303p.
- Galvez-Cloutier R. and Le François P.J. 2005.** Les sols contaminés par des métaux lourds : distribution géochimique et techniques de restauration. *Vecteur environnement*. 38 (3), 30-38.
- Gherzi F. 2014.** Étude de l'adsorption du plomb par la résine lewattit. Mémoire de Master. Université de Tlemcen, 56p.
- Gholizadeh A., Taghavi M., Moslem A., Neshat A.A., Lari-Najafi M., Alahabadi A., Ahmadi E., Ebrahimi-Aval H., Asour A.A., Rezaei H., Gholami S., Miri M. 2019.** Ecological and health risk assessment of exposure to atmospheric heavy metals. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 184, 109-622.
- Godt J ., Scheidig F ., Grosse-Si C., Esche V ., Brandenburg P., Reich A ., Groneberg D. 2006.** The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *J Occup Med Toxicol*. 1, 22-27.
- Hakanson L., 1980.** An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research* 14, 975-1001.
- Hemme C.L., Green S.J., Rishishwar L., Prakash O., Pettenato A., Chakraborty R., Deutschbauer A.M., Van Nostrand J.D., Wu L., He. Z. 2016.** Lateral gene transfer in a heavy metal-contaminated-groundwater microbial community. *MBio* 7, e02234-15, 14.

Jeong C. M., Choi Y.H., Ncho C.M., Goel A., Gupta V. 2022. Impact of embryonic manipulations on core body temperature dynamics and survival in broilers exposed to cyclic heat stress. *Scientific Reports*, 12(1), 15-110.

Journal Officiel de la République Algérienne-JORA. 2003. La Loi Algérienne n°03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, l'article 04. 23p.

Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, 201-213.

Kaur R., Sharma S., and Kaur H.2019. Heavy metals toxicity and the environment. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP1. 247-249.

Keshavarzi A., Kumar V., Ertunc G., Brevik E.C. 2021. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals contamination: an appraisal based on the Tellus soil survey *Environ. Geochem. Health*, 4 : 3 2121-2142

Kirkham M.B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation and amendments. *Geoderma* 137 (1-2), 19-32.

Krika A. 2014. Etude de la distribution des métaux lourds dans les ripisylves de l'oued Rhumel. Thèse de Doctorat en Sciences. Université Constantine 1. 184p.

Laffray X. 2018. Pollution atmosphérique dans la vallée de l'Arc (Maurienne, Savoie) : Nouvelles approches en bio-surveillance végétale. Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I, 316p.

Lamand M. 1991. Les oligo-éléments dans la biosphère. Dans *Les oligo-éléments en médecine* (Ed), et en biologie, Chappuis P, SFERETE, Lavoisier Tec&Doc, Paris, 25-39.

Luo Y., Jia B., Liu J., Lam W.H., Li X., Gao Z. 2015. Modeling the interactions between car and bicycle in heterogeneous traffic. *Journal of advanced transportation*, 49(1), 29-47p.

Maas S, Scheifler R, Benslama M, et al. 2010. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environ Pollut.* 158(6):2294-2301.

Masindi V., Muedi K.L. 2018. Environmental contamination by heavy metals. *HeavyMetals.* 10, 115-132.

Mebarki A. 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat. Université Mentouri de Constantine. 360p.

Müller G., 1981. The heavy metal pollution of the sediments of Neckars and its tributary: a stocktaking. *Chemiker-Zeitung* 105, 157-164.

Nan Z., Li J., Zhang J., and Cheng G. 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. *Science of the Total Environment*. 285(1-3), 187-195.

Normand G. 2012. Outils d'évaluation du risque écotoxicologique des contaminants atmosphériques. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke. 58p.

Omar Y. 2015. Bioaccumulation de quelques métaux lourds (Pb, Zn et Cu) d'origine routière au moyen d'une mousse (*Bryum argenteum* Hedw) dans la ville de Tiaret (Algérie) : classes de pollution et cartographie .Thèse de doctorat en Sciences. Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes. 168p.

Oucher N., Kerbachi R., Ghezloun A., and Merabet H. 2015. Magnitude of air pollution by heavy metals associated with aerosols particles in Algiers. *Energy Procedia*, 74, 51-58.

Philippe C. 2004. Analyse de la pollution atmosphérique aux échelles locale et régionale. Modélisation spatiale et temporelle à l'aide d'une méthode de scénarii épisodiques. Thèse de doctorat présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen. 214 p.

Robert M. and Juste C. 1999. Enjeux environnementaux et industriels - Dynamique des éléments traces dans l'écosystème sol. *In* : Spéciation des métaux dans le sol. Les Cahiers du Club Crin, Paris, pp. 15-37p.

Sahli L., Belhiouani H., Burga-Pérez K-F., El Hadeff El Okki M., Afri-Mehennaoui F-Z., Férard J-F. and Mehennaoui S. 2021. Assessment of Freshwater Sediment Quality: Potential Ecological Risk and Ecotoxicity Tests as Complementary Approaches. *Chemistry and Ecology*, 37:3, 219-233.

Sahli L, Afri-Mehennaoui FZ, El Hadeff El Okki M. and Megennaoui S. 2014. Utilisation d'indices pour l'évaluation de la qualité des sédiments : cas du bassin Boumerzoug (Algérie). *Eur. Sc. J.* 10, 35 : 333-343.

Sahli L. 2012. Etude du comportement de quelques espèces floristiques et faunistiques des écosystèmes aquatiques vis-à-vis des éléments traces métalliques par des bioessais. Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, 262p.

Sahli L, Afri-Mehennaoui FZ, El Hadeff El Okki M, Blaise C. and Megennaoui S. 2011. Spatial, seasonal variations and ecotoxicological significance of sediment trace metal

concentrations in Kebir-Rhumel basin (northeast of Algeria). *Water Sci Technol.* 64(8):1759-1766.

Sahraoui A.S. 2022. Utilisation *in situ* et *ex situ* de *Helix aspersa* comme bioindicateur de la contamination des sols par le cadmium et le plomb. Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, 184p.

Sahraoui A.S., Verweij R.A., Belhiouani H., Cheriti O., Van Gestel C.A.M., Sahli L. 2021. Dose-dependent effects of lead and cadmium and the influence of soil properties on their uptake by *Helix aspersa*: an ecotoxicity test approach. *Ecotoxicology*, 30:331-342.

Service d'Etude Technique des Routes et Autoroute-SETRA. 2004. La pollution des sols et des végétaux à proximité des routes Les éléments traces métalliques (ETM). Rapport SETRA. Économie Environnement Conception 73, 12p.

Saka S, Bahi A, Aouacheri W. 2011. L'effet du stress oxydant induit par l'acétate de plomb sur le système enzymatique du glutathion chez les rats. *Ann Toxicol Anal.* 23(3), 139-145.

Sellami S, Zeghouan O, Lassaad M, Moussaoui Y, Kebabi B. 2020. Determination of lead concentrations in the soils of Setif City, Eastern Algeria. *Arab J Geosci.* 13(18):929.

Shacklette H.T. and Boerngen J.G. 1984. Element Concentrations in Soils and Other Surficial Materials of the Conterminous United States. United States Geological Survey Professional Paper-USGS, 1, 1270.

Steinnes E. 2013. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: Existing and missing knowledge. *Environmental Reviews* 14: 169-186.

Szwalec A., Mundala P., Kędzior R. and Pawlik J. 2020. Monitoring and assessment of cadmium, lead, zinc and copper concentrations in arable roadside soils in terms of different traffic conditions. *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-12.

Taiba A., Sahraoui A.S, El HadeF El Okki M. and Sahli L. 2022. Identification of pollution sources and spatial distribution of trace metals in soils of the industrial area El Hadjar (Annaba, Algeria), *Chemistry and Ecology*, 38:9, 823-840.

Tammin Y., Bouza L. 2020. Utilisation de *Ficus retusa* comme indicateur de la contamination métallique de l'air en bordures de route (Constantine). Mémoire de Master. Université Frères Mentouri-Constantine 1. 50p.

Tremel-Schaub A. and Feix I. 2005. Contamination des sols. Transfert des sols vers les plantes. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. EDP Sciences/ADEME. 422p.

- Tudoreanu L., Phillips C.J.C. 2004.** Empirical models of cadmium accumulation in maize, rye grass and soya bean plants. *J. Sci..Food. Agri*, 84: 845-852.
- Uveges J.L., Corbett A.L., Mal T.K. 2002.** Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife). *Environmenatal pollution*. 120, 319-323.
- Veschambre S. 2006.** Caractérisation et quantification des éléments traces métalliques dans les dépôts et les particules atmosphériques de la vallée d'aspe (Pyrénées). Mise en place d'indicateurs de la qualité de l'air liés au trafic routier. Thèse de Doctorat. Université de Pauet de pays de l'Adour, 417p.
- Yan-Ju L., Yong-Guan Z., and Hui D. 2007.** Lead and cadmium in leaves of deciduous trees in Beijing, China: Development of a metal accumulation index (MAI). *China: Enviromental Pollution*, 145(2):387-90.
- Yilmaz S., and Zengin M. 2004.** Monitoring environmental pollution in Erzurum by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *Environment International*, 29(8), 1041-1047.
- Yu R., He L., Cai R., Li B., Li Z., Yang K. 2017.** Heavy metal pollution and health risk in China. *Global health journal*. 1,47-55.
- Zekri J., Rached O., Sahli L., Yilmaz M.A., Temel H., and Tahar A. 2019.** Assessment of soil contamination and plant stress tolerance in an antimony mining area: case study for *Scabiosa atropurpurea* L. and *Santolina chamaecyparissus*. *Environ Ecol*. 37(3): 747-757.

Année universitaire : 2022/2023

**Présenté par :
DJAAFAROU Manel
SAOUD Wafa**

Intitulé : Diagnostic de la contamination des sols en bordures de routes par le cadmium et le plomb : cas de la RN05 (W. Constantine)

Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master en Ecologie Fondamentale et Appliquée

Résumé:

L'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination des sols en bordures de route par les éléments traces métalliques (cadmium et plomb). Pour cela des échantillons de sols ont été prélevés le long de la route nationale (RN5), reliant la cité Boussouf à la commune d'Ain Smara. Treize points d'échantillonnage ont été retenus. L'extraction du cadmium et du plomb a été effectuée par digestion humide à l'eau régale, et les teneurs ont été dosées par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme. Les résultats de cette étude mettent en évidence la présence généralisée du Cd et du Pb dans tous les échantillons de sol. Les concentrations moyennes sont respectivement d'environ 0,83 µg/g et 89,77 µg/g. Ces valeurs dépassent les normes géochimiques, ce qui indique des situations d'enrichissements considérables selon les points d'échantillonnage. Ces constatations sont confirmées par les résultats de calcul des indices de contamination et de risque écologique.

Globalement, cette étude apporte une contribution significative aux données déjà existantes relatives à la contamination métallique des sols dans la région de Constantine. De plus, elle met en évidence la contribution du trafic routier en tant que source principale de contamination et souligne les risques écologiques qui en découlent.

Mots clés : Trafic routier, sol, contamination, cadmium, plomb.

Laboratoire de recherche : Biologie et Environnement

Jury d'évaluation :

Président du jury :	TOUATI Laid	Prof.	UFM-Constantine 1
Rapporteur :	SAHLI Leila	Prof.	UFM-Constantine 1
Examineur :	KARBOUA Fayçal	MAA.	ENS-Constantine 3

Date de soutenance : 22/06/2023