

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE  
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Réf : ...../UAMOB/F.SNV.ST/DEP.AGR/2022

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOMEMASTER

Domaine : SNV      Filière : Sciences Agronomiques  
Spécialité : Sciences du Sol  
Présenté par :

*KORICHI Imane & ATALLAH Imane*

### *Thème*

*Estimation et cartographie des métaux lourds dans le sol*

Soutenu le : 06 / 07 / 2022

Devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
<i>LIBDIRI, F.</i>	<i>MCB</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Président</i>
<i>METIDJI, K.</i>	<i>MCB</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Examineur</i>
<i>LAMINE Salim</i>	<i>MCA</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Promoteur</i>

*Année Universitaire : 2021/2022*

# ***Remerciement***

*En premier, nous remercions le bon dieu 'Allah 'le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et de la patience pour être ce que nous sommes aujourd'hui et pour mener à terme ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur **Mr. LAMINE .S** maitre de conférences (A) pour ses précieuses orientations, son aide, ses conseils et son souci de réaliser ce travail de recherche,*

*Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury, Le président **M. LIBDIRI Farid** ainsi que l'examineur **Mm. METIDJI Karima** d'avoir accepté d'examiner ce travail et de nous avoir honorées par leur présence le jour de la soutenance.*

*Nous voudrions aussi témoigner notre reconnaissance et exprimer toute notre gratitude à nos enseignants qui ont participé pour une grande part dans notre formation*

# ***DEDICACE***

*Je dédié ce modeste travail à mes très chers parents, à mon très chère père **Djamel** tout ce qu'il a fait pour moi, par leur soutien moral et matériel, leur encouragement, pour ça patience.*

*A ma très chère mère **Hakima** celle qui m'a transmis l'a vie, le courage, et l'amour pour leur soutien moral et matériel, pour ça tendresse, et pour l'encouragement qu'elle a me donnée pendant mon parcours, que dieu tout puissant garde mes parents et les protège.*

*A mon frère **AMINE**, et mes sœur **MERIEM** et **HOUDA**, sans oublié mes grands-mères mes tante mes oncles et toutes ma famille que j'aime.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes cotes, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, et ma binôme **IMANOCHÉ** et toutes mes collègues d'études.*

***Imane. A***

# ***DEDICACE***

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon chère père **Tayeb***

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur ma vie et mon bonheur ; maman **Wahiba** que j'adore.*

*A mon frère **ABED ELHAK**, et mes sœur **BOUCHRA**, **YASMINE** et **SELMA**, sans oublié ma grand-mère mes tante et toutes ma famille que j'aime.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes cotes, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, et ma binôme **IMANOCHE** et toutes mes collègues d'études.*

***Imane. K***

## **Résumé**

Les métaux lourds présents dans l'atmosphère, le sol et l'eau proviennent aujourd'hui de différentes sources telles que des sites d'enfouissement, des déchets domestiques et industriels, des sites d'extraction de minerais et de pétrole ainsi que de la pollution atmosphérique. La télédétection spatiale est une discipline scientifique qui intègre un large éventail de compétence et de technologie utilisée pour l'observation, ses principales sources sont les mesures et les images obtenues à l'aide de plates-formes aériennes et spatiales. Avec le développement de l'industrialisation et de l'urbanisation, la contamination des sols agricoles par les métaux lourds tend à s'accumuler rapidement et à nuire à la santé humaine. La spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge (Vis-NIR) permet de surveiller rapidement la variation des métaux lourds, d'ailleurs Cette étude a exploré le potentiel de la dérivée d'ordre fractionnaire (FOD), de l'algorithme de combinaison optimale des bandes et de différents modèles mathématiques dans l'estimation des métaux lourds du sol par spectroscopie Vis-NIR dans le sol.

**Mots clés : métaux lourds, sol, contamination, spectroscopie, Télédétection, Vis-NIR**

## **Abstract**

Heavy metals present in the atmosphere, soil and water today come from various sources such as landfills, domestic and industrial waste, mineral and oil extraction sites as well as air pollution, Space remote sensing is a scientific discipline that integrates a wide range of skills and technology used for observation, its main sources are measurements and images obtained using aerial and space platforms, With the With the development of industrialization and urbanization, contamination of agricultural soils by heavy metals tends to accumulate rapidly and harm human health. Visible-near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy enables rapid monitoring of heavy metal variation; moreover, this study explored the potential of the fractional order derivative (FOD), combination algorithm optimal bands and different mathematical models in the estimation of soil heavy metals by Vis-NIR spectroscopy in soil.

**Keywords: heavy metals, soil, contamination, spectroscopy, remote sensing, Vis-NIR**

## ملخص

تأتي المعادن الثقيلة الموجودة في الغلاف الجوي والتربة والمياه اليوم من مصادر مختلفة مثل مقالب القمامة والنفايات المنزلية والصناعية ومواقع استخراج المعادن والنفط بالإضافة إلى تلوث الهواء ، يعد الاستشعار عن بعد في الفضاء نظاماً علمياً يدمج مجموعة واسعة من المهارات و التكنولوجيا المستخدمة في المراقبة ، مصادرها الرئيسية هي القياسات والصور التي تم الحصول عليها باستخدام المنصات الجوية والفضائية ، مع تطور التصنيع والتحضر ، يميل تلوث التربة الزراعية بالمعادن الثقيلة إلى التراكم السريع والإضرار بصحة الإنسان. يتيح التحليل الطيفي المرئي القريب من الأشعة تحت الحمراء (Vis-NIR) المراقبة السريعة لتباين المعادن الثقيلة، علاوة على ذلك، استكشفت هذه الدراسة إمكانات مشتق الترتيب الكسري (FOD)، والنطاقات المثلى لخوارزمية التوليف والنماذج الرياضية المختلفة في تقدير المعادن الثقيلة في التربة بواسطة التحليل الطيفي Vis-NIR في التربة.

**الكلمات المفتاحية:** المعادن الثقيلة، التربة، التلوث، التحليل الطيفي، الاستشعار عن بعد، Vis-NIR.

# *Tables des matières*

# Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction général

## *Chapitre I: Synthèse Bibliographique*

<b>I.1. GENERALITE SUR LES SOLS</b> .....	4
<b>I.1.1. Définition du sol :</b> .....	4
<b>I.1.2. Diverses phases du sol</b> .....	4
<b>I.1.2.1. Phase liquide du sol :</b> .....	4
<b>I.1.2.2. Phase gazeuse du sol :</b> .....	5
<b>I.1.2.3. Phase solide du sol :</b> .....	5
<b>I.1.2.3.2. Terre fine :</b> .....	6
<b>I.1.3. Fractions constitutives du sol</b> .....	6
<b>I.1.3.1. Fractions minérales</b> .....	6
<b>I.1.3.2. Fractions organiques</b> .....	7
<b>I.2. Les métaux lourds</b> .....	7
<b>I.2.1. Généralités sur les métaux lourds</b> .....	7
<b>I.2.2. Définition</b> .....	7
<b>I.2.3. Classification des métaux lourds</b> .....	8
<b>I.2.3.1. Les métaux essentiels</b> .....	8
<b>I.2.3.2. Les métaux non nécessaires (toxique)</b> .....	8
<b>I.2.4. La toxicité des métaux lourds</b> .....	8

<b>I.2.5. Les effets des métaux lourds .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6. Les caractéristiques principales des métaux lourds .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.1. Le fer .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.2. Le Zinc .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.3. Le Plomb .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.4. Le Manganèse.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.5. Le Cadmium.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.6. Le Cuivre .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.6.7. Le Sélénium .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.Métaux lourds dans le sol.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.1 Les sols en Algérie.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.1. Classification des sols en Algérie .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2. Origine des métaux lourds dans le sol.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2.1. Source naturelle .....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2.2. Source anthropique .....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.3. Relation métaux lourds-sol .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.4. Forme et localisation des métaux lourds dans le sol.....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.6. Comportement des métaux lourds dans le sol.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.6.1. Cas du plomb.....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.6.2. Cas du zinc.....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.6.3. Cas du chrome.....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.7. Les facteurs modifiant et mobilité des métaux lourds dans le sol .....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.7.1. Le PH .....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.7.2. Le potentiel redox (Eh).....</b>	<b>20</b>
<b>I.3.7.3. La teneur en argile.....</b>	<b>20</b>
<b>I.3.7.4. L'activité biologique .....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.7.5. La matière organique .....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.7.6. Capacité d'échanges cationique CEC .....</b>	<b>21</b>

<b>I.3.8. Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé.....</b>	<b>22</b>
<b>I.3.9. Contamination de métaux lourds dans le sol en Algérie.....</b>	<b>23</b>
<b>I.3.9.1. Contamination des sols par les métaux lourds.....</b>	<b>23</b>
<b>I.3.9.2. Sources naturelles de contamination.....</b>	<b>24</b>
<b>I.3.9.3. Sources anthropiques de contamination.....</b>	<b>25</b>

## *CHAPITRE II : Télédétection et quantification des métaux lourds dans le sol*

<b>II.1. La télédétection.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1.1. Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1.2. Définition.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1.3. Principe physique de la Télédétection.....</b>	<b>29</b>
<b>II.1.3.1. Spectre électromagnétique.....</b>	<b>30</b>
<b>II.1.3.2. Source de l'énergie électromagnétique.....</b>	<b>32</b>
<b>II.1.3.3. Perturbations atmosphériques.....</b>	<b>33</b>
<b>II.1.3.4. Réflectance spectrale de la végétation, du sol et de l'eau.....</b>	<b>35</b>
<b>II.1.4. Exemples de la télédétection.....</b>	<b>36</b>
<b>II.1.5. Les images satellitaires.....</b>	<b>36</b>
<b>II.1.5.1. La résolution des images satellitaires.....</b>	<b>36</b>
<b>II.1.5.1.1. La résolution spectrale.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.1.2. La résolution spatiale.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.1.3. La résolution temporelle.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.1.4. La résolution radiométrique.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.2. Contraintes liées à l'utilisation d'un satellite.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.2.1. Compromis spatial –temporel.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1.5.2.2. Compromis spatial-spectral.....</b>	<b>38</b>
<b>II.1.5.2.3. Volume d'informations.....</b>	<b>38</b>
<b>II.1.6. Capteurs embarqués à bord des satellites.....</b>	<b>38</b>
<b>II.1.6.1. Les capteurs non-imageurs.....</b>	<b>38</b>
<b>II.1.6.2. Les capteurs-imageurs.....</b>	<b>39</b>

<b>II.2. Estimation et quantification des métaux lourds dans le sol</b> .....	39
<b>II.2.1. Analyse des métaux lourds dans le sol</b> .....	40
<b>II.2.1.1. Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)</b> .....	40
<b>II.2.1.2. Spectroscopie d'émission atomique à couplage inductif (ICP-AES)</b> .....	40
<b>II.2.1.3. Spectroscopie de masse à couplage inductif (ICP-MS)</b> .....	41
<b>II.2.1.4. Spectrométrie de fluorescence atomique (AFS)</b> .....	41
<b>II.2.1.5. Spectromètre à fluorescence X (XRF)</b> .....	41
<b>II.2.1.6. Analyse de l'activation des neutrons (NAA)</b> .....	42
<b>II.2.1.7. D.C. argon plasma spectromètre d'émission atomique multi élémentaire (DCP-MAES)</b> .....	42
<b>II.2.1.8. Spectromètre d'absorption atomique (AAS)</b> .....	42
<b>II.2.1.9. Microscope électronique à balayage à rayons X à dispersion d'énergie (SEM-EDX).</b> .....	43

*Chapitre III: Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol*

<b>III.1. Distributions spatiales des métaux lourds dans les sols</b> .....	45
<b>III.1.1. Distributions spatiales des métaux lourds</b> .....	45
<b>III.1.2. Méthode du modèle</b> .....	46
<b>III.1.3. Évaluation de la précision du modèle</b> .....	47
<b>III.2. Détection de la contamination des sols par les métaux lourds à l'aide de spectroradiométrie de terrain</b> .....	50
<b>III.2.1. Statistiques descriptives du sol</b> .....	51
<b>III.2.2. Développement de bibliothèques spectrales sur le terrain et en laboratoire</b> .....	53
<b>III.2.3. Analyse de discrimination statistique</b> .....	54
<b>III.3. Évaluation des risques des métaux lourds dans les sols pour la santé</b> .....	55
<b>III.3.1. Risque pour la santé humaine</b> .....	56
<b>III.3.2. Évaluation des risques sanitaires des métaux lourds dans les sols</b> .....	56
<b>III.4. Évaluation des risques écologiques des métaux lourds dans les sols</b> .....	59
<b>III.4.1. Risque écologique potentiel</b> .....	59

<b>III.4.2. Risque écologiques potentiels des métaux lourds dans les sols.....</b>	<b>60</b>
<b>III.5. Le développement d'indices spectraux pour la quantification des métaux lourds .</b>	<b>60</b>
<b>III.5.1. L'estimation de la teneur en métaux lourds.....</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1.1. Sélection des indices spectraux du sol sec.....</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1.2. Sélection des variables spectrales optimales pertinentes .....</b>	<b>62</b>
<b>III.5.1.3. Modèles d'estimation de la teneur en métaux lourds du sol et évaluation de la précision .....</b>	<b>63</b>
<b>III.5.1.4. Modèles d'estimation des teneurs en métaux lourds .....</b>	<b>67</b>
<b>III.5.2 Estimation de métaux lourds dans un sol agricole en utilisant Vis-NIR Spectroscopie .....</b>	<b>67</b>
<b>III.5.2.1. Réduction des caractéristiques spectrales .....</b>	<b>68</b>
<b>III.5.2.2. Les méthodes de modélisation .....</b>	<b>69</b>
<b>III.5.2.3. Corrélation entre les métaux lourds et les indices spectraux optimaux .....</b>	<b>70</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>75</b>
<b>Références bibliographies.....</b>	<b>84</b>

# *Listes des tableau*

## Liste des tableaux

### *Chapitre I: Synthèse Bibliographique*

<b>Tableau I. 1:</b> Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie .....	14
<b>Tableau I. 2:</b> Effets du pH et du potentiel redox sur la mobilité des métaux lourds du sol....	20

### *Chapitre III: Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol*

<b>Tableau III. 1:</b> Résultats de la régression partielle par les moindres carrés (PLSR) entre les concentrations de métaux lourds et les indicateurs de spectre .....	48
<b>Tableau III. 2:</b> Résultats du réseau neuronal à rétropropagation (BPNN) entre les concentrations de métaux lourds et les indicateurs de spectre. ....	49
<b>Tableau III. 3:</b> Les variables spectrales pertinentes optimales pour l'estimation de trois teneurs en métaux lourds dans le sol. ....	63
<b>Tableau III. 4:</b> Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour l'Hg. ....	71
<b>Tableau III. 5:</b> Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour le Cr. ....	72
<b>Tableau III. 6:</b> Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour le Cu. ....	72

# *Listes des figures*

## Liste des figures

### *Chapitre I: Synthèse Bibliographique*

<b>Figure I. 1:</b> Classification périodique des éléments. (Fourest E, 1993).....	8
<b>Figure I. 2:</b> Les sols en Algérie d’après les métaux lourds.....	13
<b>Figure I. 3:</b> Concentration en métaux lourds dans le sol : le résultat de la biodisponibilité (Meerts, 2009-2010).....	22
<b>Figure I. 4:</b> Contamination diffuse et locale (Pereira et Sonnet, 2007). .....	26

### *CHAPITRE II : Télédétection et quantification des métaux lourds dans le sol*

<b>Figure II. 1:</b> Le système Mondial d’Observation Météorologique (Copyright 2008 © EUMETSAT) 28	
<b>Figure II. 2:</b> Principe physique de la télédétection .....	29
<b>Figure II. 3:</b> Nature et propagation d’une onde électromagnétique.....	31
<b>Figure II. 4:</b> Spectre électromagnétique (LILESAD et KIEFER, 1987) .....	31
<b>Figure II. 5:</b> Distribution spectrale de l’énergie émise par un corps noir à des différentes températures (LILESAD et KIEFER, 1987) .....	33
<b>Figure II. 6:</b> Rayonnement solaire et influence de l’atmosphère (BROSSIER R. et LUMMAUX J-C. ,1979).....	34
<b>Figure II. 7:</b> Type de diffuse .....	34
<b>Figure II. 8:</b> Schéma sur la diffuse de Rayleigh .....	34
<b>Figure II. 9:</b> Courbes typiques de la réflectance spectrale de la végétation du sol et de l’eau (LILESAD et KIEFER, 1987).....	35
<b>Figure II. 10:</b> <i>Orbites réalisées par les satellites défilants.</i> .....	38
<b>Figure II. 11:</b> Deux modes de télédétections .....	39

## Listes des tableaux

---

### *Chapitre III: Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol*

- Figure III. 1:** Comparaison de la valeur prédite par le modèle BP et des valeurs mesurées pour As (a) et Hg (b). ..... 50
- Figure III. 2:** Spectres moyens pour les échantillons de sol caractérisés par des concentrations faibles (échantillon 57) et élevées (échantillon 73) de métaux lourds sur le site d'étude ..... 52
- Figure III. 3:** Variation moyenne (n = 85) des concentrations des quatre métaux lourds trouvés sur le site d'étude. .... 52
- Figure III. 4:** Bibliothèque spectrale sur le terrain de la contamination des sols par les métaux lourds (HMSC) sur le site de la rue Bow. Les régions spectrales liées à l'absorption de la vapeur d'eau (1350-1430, 1790-1950 et 2400-2500 nm) ont été supprimées ..... 53
- Figure III. 5:** Bibliothèque spectrale en laboratoire de la contamination des sols par les métaux lourds (HMSC) sur le site de la rue Bow. .... 54
- Figure III. 6:** Les intervalles de longueur d'onde ombragés en gris indiquent les différences statistiquement significatives entre les spectres obtenus sur le terrain. La ligne pointillée rouge indique la limite de la signification statistique (niveau de confiance de 95%). ..... 54
- Figure III. 7: es intervalles de longueur d'onde ombragés en gris indiquent les différences statistiquement significatives entre les spectres obtenus sur le terrain. La ligne pointillée rouge indique la limite de la signification statistique (niveau de confiance de 95 %). ..... 55
- Figure III. 8:** Les risques sanitaires des métaux lourds dans les sols de surface. .... 58
- Figure III. 9:** Pearson correlation coefficients between the soil heavy metal content and spectral indices for (a) As; (b) Cd; and (c) Hg (p = 0.01). ..... 62
- Figure III. 10:** Scores Z montrant la capacité de prédiction des bandes spectrales individuelles de la première dérivée pour trois teneurs en métaux lourds du sol obtenues à l'aide de l'algorithme de Boruta, où les symboles verts, jaunes et violets représentent les variables spectrales importants, provisoires et non importantes, respectivement, pour : (a) As ; (b) Cd ; et (c) Hg (p = 0,01). ..... 62

## Listes des tableaux

---

**Figure III. 11:** Comparaison de la teneur en métaux lourds du sol entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain en termes de surfaces par interpolation spline cubique basée sur : (a) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (b) valeurs prédites par le modèle pour As ; (c) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (d) valeurs prédites par le modèle pour Cd ; et (e) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (f) valeurs prédites par le modèle pour Hg. .... 65

**Figure III. 12:** Les changements des coefficients de corrélation du rapport spectral avec la teneur en humidité du sol sur la longueur d'onde..... 66

**Figure III. 13:** Les changements des valeurs p pour les corrélations du rapport spectral de DSSR à MSSR avec la teneur en humidité du sol sur la longueur d'onde. .... 66

# *Liste des abréviations*

## Listes des abréviations

---

### Liste des abréviations

Abréviation	Signification
<b>Mo</b>	Matièreorganique
<b>HAP</b>	Hydrocarburesaromatiquepolycycliques
<b>Fe</b>	Fer
<b>Mg</b>	Magnésium
<b>Sio4</b>	Silicates
<b>Al (OH) 3</b>	Oxydesd'aluminium
<b>Fe2 O3</b>	L'hématite
<b>Ca</b>	Calcium
<b>(Co3)2</b>	Carbonate
<b>Zn</b>	Zinc
<b>Pb</b>	Plomb
<b>Hg</b>	Mercure
<b>Cd</b>	Cadmium
<b>Mn</b>	Manganèse
<b>Cu</b>	Cuivre
<b>Zn O</b>	Oxyde de zinc
<b>Zn cl</b>	Chlorure de zinc
<b>Al</b>	Aluminium
<b>Ni</b>	Nickel
<b>Co</b>	Carbone organique
<b>Sn</b>	Étain
<b>Ph</b>	Potentielhydrogène
<b>Eh</b>	Potentiel redox
<b>Se</b>	Sélénium
<b>B</b>	Bore
<b>Cr</b>	Chrome
<b>As</b>	Arsenic
<b>O2</b>	Oxygène

## Listes des abréviations

---

<b>CEC</b>	Capacité d'échange cationique
<b>ETM</b>	Eléments traces métalliques
<b>Zn c 12</b>	Chlorure
<b>Zn s</b>	Le sulfate
<b>Zns O<sub>4</sub></b>	Sulfate
<b>Fe O-OH</b>	Oxyhydroxyde de fer
<b>REM</b>	Rayonnement électromagnétiques
<b>mm</b>	Millimètre
<b>Nm</b>	Nanomètre
<b>CNN</b>	réseau neuronal convolutif
<b>EMLR</b>	stepwise multiple linear regression
<b>SMLR</b>	enter multiple linear regression
<b>PLSR</b>	partial least square regression
<b>BPNN</b>	back propagation neural network
<b>RI</b>	risque écologique
<b>HSI</b>	imageur hyperspectral
<b>HJ-1A</b>	HuanJing-1A
<b>Vis-NIR</b>	La spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge
<b>FOD</b>	dérivée d'ordre fractionnaire
<b>NDI</b>	indice de différence normalisée
<b>RI</b>	indice de rapport
<b>DI</b>	indice de différence
<b>PI</b>	indice de produit
<b>SI</b>	l'indice de somme
<b>HMSC</b>	la contamination des sols par les métaux lourds

*Introduction*

*Générale*

# Introduction générale

L'activité humaine agricole urbaine et industrielle sans cesse croissantes est à l'origine d'une contamination de notre environnement par des métaux lourds, alors que de nombreuses molécules organiques peuvent être dégradées, les métaux lourds ne le peuvent pas et leur concentration régulièrement dans les sols, Plusieurs éléments chimiques considérés comme des métaux lourds se trouvent naturellement dans les sols. Il est donc normal qu'un test de sol révèle la présence de traces de métaux lourds. Toutefois, lorsqu'ils se trouvent en quantité trop importante, ils peuvent devenir dangereux et sont considérés comme des contaminants inorganiques, D'ailleurs sont présents naturellement dans les sols. **(Zorrig ; 2011).**

Le développement de l'activité industrielle (industries métallurgiques et chimiques) et de l'activité agricole (pesticides, engrais, ...) depuis le siècle dernier a entraîné des apports parfois intensifs de ces éléments qui deviennent des polluants pour l'environnement. Même à faibles concentrations, ils peuvent constituer un sérieux problème de santé publique du fait de leur toxicité et de leur caractère bio-accumulatif **(STERCKEMAN T. et al ,2008).**

La télédétection spatiale est un domaine scientifique moderne de haute technologie et qui se développe continuellement pour mieux répondre aux besoins en information dans les domaines des sciences de la terre, de la protection de l'environnement, de la gestion des ressources naturelles et de plusieurs autres domaines **(BENMOSTEFA; 2012, LAMINE et al., 2018, 2019, 2020, 2022 ; BACHARI et al., 2021 ; DENG et al., 2019a, 2019b ; EVANS et al., 2018 ; DIKE et al., 2018 ; PETROPOULOS et al., 2016)**

En conséquence, Un certain nombre de méthodes ont été mises au point par plusieurs organismes de réglementation et laboratoires privés et sont appliquées couramment pour la quantification et le contrôle des matrices solaires et de quantification utilisée dans le monde entier pour analyser les métaux lourds dans le sol.

Pour atteindre ces objectifs de recherche, notre mémoire est subdivisé en trois chapitres à savoir :

Le premier chapitre, qui sera englobe l'introduction et quelques généralités sur le thème, posant quelques définition et notions usuelles et scientifiques des constituants, des métaux lourds et de leurs interactions avec les sols

## **Introduction générale**

---

Alors que Le deuxième chapitre, présente de la télédétection en général avec quelques exemples et sur la quantification des métaux lourds dans le sol avec quelque technique

Dans Le troisième chapitre nous présenterons certains des résultats et interprétations que nous avons conclus par la chine, et on termine par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

*Synthèse*

*Bibliographique*

## I.1. GENERALITE SUR LES SOLS

Les sols sont des systèmes multiphasiques complexes et hétérogènes, composés d'air, d'eau et de solide (sable, limon, argile, matière organique (MO), nutriments, écosystèmes,...etc.) en outre, les sols sont des médias ouverts et dynamiques, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère, (**Sposito. 1997.**) ILS doivent accomplir cinq fonctions principales de base:

- ❖ Offrir un habitat physique, chimique et biologique pour les organismes vivants ;
- ❖ Réguler les flux d'eau, le stockage et le recyclage des cycles des nutriments et d'autres éléments ;
- ❖ Maintenir les activités et diversités biologiques pour subvenir à la croissance des plantes et la productivité des animaux ;
- ❖ Filtrer, tamponner, transformer, immobiliser et détoxifier les substances organiques et inorganiques ;
- ❖ Fournir un support mécanique aux organismes vivants et à leurs structures (**Nortcliff.S. (2002).**)

### I.1.1. Définition du sol :

Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, présentant une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres (**Glossary Of Soil Science Terms 1965.**)

Il est constitué par un mélange de matériaux minéraux et organiques, qui sert de support et milieu naturel pour la croissance des plantes (**Legros, J.P ; 2007**)

Qui est dénommée couverture pédologique, est la résultante au cours du temps de plusieurs facteurs génétiques :

- ❖ La roche-mère sur laquelle s'est développé ; (**Duchaufour, 1984**)
- ❖ Environnementaux tels que le climat, le relief et la végétation (**Boulaine, 1989**)

### I.1.2. Diverses phases du sol

#### I.1.2.1. Phase liquide du sol :

La phase liquide du sol est souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus ou moins importante de la porosité du sol, est constituée d'eau où se trouvent diverses

substances organiques et minérales dissoutes et des particules en suspension. La composition de la solution du sol varie selon :

- Le climat,
- Les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire...etc.)
- L'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne ...etc.) (**Duchaufour, 1984**)

### **I.1.2.2. Phase gazeuse du sol :**

Dans un sol bien aéré, les gaz qui règnent dans l'atmosphère du sol sont : L'azote (78 à 80%) ; L'oxygène (18 à 20%) ; Le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

D'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides ou les HAP peuvent également être détectées dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol :

- Soit à l'état libre ;
- Soit dissous dans la solution du sol (**Hillel, 1982**)

Cependant, dans certaines conditions (d'hydro-morphie par exemple), la phase gazeuse peut être absente ; tout l'espace poral du sol est alors occupé par l'eau et le sol est dit saturé. (**Calvet, 2003**)

### **I.1.2.3. Phase solide du sol :**

La phase solide du sol est en général majoritairement minérale qui comprend :

#### **I.1.2.3.1. Eléments grossiers :**

Ce sont les éléments > 2mm et on les classe par dimensions :

- 0,2 cm à 2 cm : graviers ;
- 2 à 5 cm : cailloux ;
- 5 à 20 cm : pierres ;
- > 20 cm : blocs.

Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (sur un échantillon de sol, au laboratoire, on estime le pourcentage après passage au tamis de 2mm).

### I.1.2.3.2. Terre fine :

La terre fine est la fraction de terre qu'il reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc < 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions :

- 2mm à 0,2 mm : sable grossiers ;
- 0,2 mm à 50 µm : sable fins ;
- 50 µm à 20 µm : limons grossiers ;
- 20 µ à 2 µ : limons fins ;
- < 2 µ : argiles.

Elle comprend aussi une fraction organique dont le taux varie selon le type de sol et les conditions de pédogenèse. Les sols cultivés présentent des taux de matière organique compris dans une gamme allant de moins de 1% à 20% de la masse du sol (Calvet, 2003)

### I.1.3. Fractions constitutives du sol

Le sol contient deux fractions intervenant principalement dans la sorption des polluants à savoir les fractions organiques et minérales.

#### I.1.3.1. Fractions minérales

Il existe trois catégories majoritaires dans le sol :

- ✚ **Les silicates** sont des oxydes de silice qui ont des structures très diverses (Unités isolées (olivine (Fe, Mg)  $2 [SiO_4]$ ) ; Chaîne (pyroxène (Mg, Fe)  $2 (SiO_3)_2$ ) ; Feuillet (smectite) et sont souvent associés à des cations métalliques tels que l'aluminium, le fer ou le magnésium.
- ✚ **Les oxydes**, oxy-hydroxydes et hydroxydes les plus importants et les très abondants dans les sols sont : La gibbsite (oxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$ ), La goethite et l'hématite (oxydes de fer ((FeO-OH),  $(Fe_2O_3)$ )), la birnessite et la lithiophorite (oxydes de manganèse).
- ✚ **Les carbonates** les plus abondants sont les carbonates de calcium (Calcite) et les carbonates de magnésium (Dolomite (Ca, Mg)  $(CO_3)_2$ ). Ceux-ci peuvent Co-précipiter avec d'autres métaux (exemple : calcite magnésienne) ou former un revêtement sur d'autres minéraux (coating) en changeant ainsi leurs propriétés de surfaces (Sposito, 2008.)

### I.1.3.2. Fractions organiques

En ce qui concerne la matière organique ou phase organique du sol, elle correspond à tout ce qui est constitué de carbone organique, qu'il soit vivant ou non vivant (insectes, plantes, humus, microorganismes...etc.).

L'humus est un terme qui regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et qui peut être classé en deux catégories :

➤ **Substances non humiques :**

Correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques biophysicochimiques sont reconnaissables (exemple : les hydrates de carbone, les protéines, les acides aminés, les lipides,...etc.).

➤ **Substances humiques :**

Sont issues de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation,...etc.) de la matière organique du sol (**Pansu, M. And Gautheyrou, J ; 2001**)

## I.2. Les métaux lourds

### I.2.1. Généralités sur les métaux lourds

En général métaux lourds sont les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm<sup>3</sup>. On retrouve dans certaines publications anciennes l'appellation de « métal pesant ». (**GERARD, 2000**)

### I.2.2. Définition

En chimie, les métaux lourds sont en général définis sur la base de propriétés spécifiques (poids moléculaire, capacité à former des cations polyvalents...) (**Adriano, 1986 ; Fergusson, 1980**).

D'un point de vue chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux.

D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.cm<sup>3</sup> (ADRIANO D.C., 2001). .

D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

**I.2.3. Classification des métaux lourds**

**I.2.3.1. Les métaux essentiels**

Sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les Tissus biologiques (LOUE, 1993). Certains peuvent devenir toxiques lorsque la Concentration dépasse un certain seuil. Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides. (KABATA-PENDIAS A., et PENDIAS H., 2001).

**I.2.3.2. Les métaux non nécessaires (toxique)**

Ce sont des métaux à caractère polluant avec des effets toxiques sur les organismes vivants même à faible concentration et sans effet bénéfique connu sur la cellule. C'est le cas des métaux lourds tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg) et le cadmium (Cd) (BEHANZIN G. J., et al. 2014).

<b>Bloc S</b>		<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></div> <b>Métaux lourds de densité &gt; 5</b> </div>										<b>Bloc p</b>								
H												B	C	N	O	F	He			
Li	Be	<b>Bloc d</b>										Al	Si	P	S	Cl	Ar			
Na	Mg	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	Ac	<b>Bloc f</b>																	
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr				

**Figure I. 1:** Classification périodique des éléments. (Fourest E, 1993)

**I.2.4. La toxicité des métaux lourds**

La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

- Leur non-dégradabilité.
- leur toxicité à faible concentration.
- Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des Chaines trophiques (BENSAHA, 2010).

La combinaison qui se produit entre les éléments non essentiels et essentiels est présentée par des interactions ayant une forte influence sur la toxicité des métaux La toxicité de certains métaux non essentiels est également reconnue, même à de très faibles concentrations (Pb, Cd, Hg, etc.), tandis que les métaux peuvent aussi devenir basiques est dangereux à fortes concentrations (Zn, Cu, Fe, Mn, etc.). (SOUMAORO, 2015)

### **I.2.5. Les effets des métaux lourds**

En effet, les métaux lourds peuvent, par le phénomène de lessivage, polluer les nappes phréatiques et les cours d'eau avoisinants. En pénétrant dans un sol contaminé, l'eau provenant des précipitations ou de la fonte des neiges peut se remplir d'oligo-éléments dissous.

Étant donné que la toxicité des métaux lourds est renforcée par la bioaccumulation et la bioamplification, les métaux peuvent présenter des risques pour la santé humaine et l'environnement, même en petites quantités.

### **I.2.6. Les caractéristiques principales des métaux lourds**

#### **I.2.6.1. Le fer**

Le fer du latin « *ferrum* », est un élément métallique blanc argenté, de symbole Fe C'est un élément sa transition de numéro atomique 26. A l'état libre le fer métallique se trouve dans les météorites, en général allié au Nickel. Le métal est largement présent dans certains composés chimiques. Le fer se trouve généralement à l'état divalent dans les eaux qui ne se trouve pas en contact avec l'air par contre dans les eaux superficielles exposés à l'air, le fer est à l'état ferrique (BELABED, 2010).

#### **I.2.6.2. Le Zinc**

Le zinc est un élément chimique métallique bleuâtre, de symbole Zn et de numéro atomique 30. C'est un élément de transition (BENSAHA, 2010). Il n'existe pas à l'état Métallique dans la nature, il n'est présent qu'à l'état divalent (ZnII) (AIT ZIANE & BOUYAHIA, 2013).

Le zinc est, dans la nature, habituellement associé à d'autres métaux tels que le cuivre et le plomb. Parmi ces composés, citons :

- L'oxyde de zinc : ZnO (blanc de zinc ou blanc de neige),
- Le chlorure : ZnCl<sub>2</sub>,
- Le sulfure : ZnS (blende),
- Le sulfate : ZnSO<sub>4</sub>. (KRIBI, 2005).

### I.2.6.3. Le Plomb

C'est un métal gris bleuâtre, brillant, mou et ductile. Constitue des gisements primaires dans les roches éruptives et métamorphiques, il ne se trouve pas à l'état natif, il existe sous forme de sulfate et peut être associé à d'autres éléments telle que le Zinc, l'arsenic, le cuivre et l'argent (AIT ZIANE & BOUYAHIA, 2013)

### I.2.6.4. Le Manganèse

Le manganèse est un élément chimique métallique, blanc argenté, de symbole Mn et de numéro atomique 25. Il existe à l'état soluble dans les eaux. C'est un oligo-élément indispensable, on le trouve dans tous les tissus. On le trouve dans la nature sous forme d'oxyde, de sulfure, oxyde de carbonate et de silicate. Son origine dans l'eau provient essentiellement de la dissolution des roches, et d'éventuels rejets industriels.

Le manganèse provenant des sources anthropiques, pénètre facilement dans les eaux de surfaces, les eaux souterraines et les eaux d'égouts (SOUMAORO, 2015).

### I.2.6.5. Le Cadmium

Le cadmium est un métal relativement rare, mais il est utilisé pour plusieurs buts. Dans sa forme pure c'est un métal blanc argenté avec une couleur bleuâtre. Le cadmium est également très malléable.

Le Cadmium fait également partie des métaux lourds les plus dangereux. Même à de faibles concentrations, il tend à s'accumuler dans le cortex rénal sur de très longues périodes (50 ans) où il entraîne une perte anormale de protéines par les urines (protéinurie) et provoque des dysfonctionnements urinaires chez les personnes âgées (CASAS, 2005).

### I.2.6.6. Le Cuivre

C'est un élément chimique métallique de couleur rouge-brun, de symbole Cu et NA29. Il est indispensable au métabolisme des êtres vivants (oligo-éléments). Il existe à l'état natif et extrait d'une grande variété de minerais (**BELABED, 2010**). Il peut être présent dans l'eau à partir du contact avec des minéraux porteurs de cuivre ou de déchets minéraux provenant de la production de cuivre. Il peut se concentrer dans les eaux naturelles généralement à des teneurs inférieures à 1mg/l et ses principales sources anthropiques sont les industries, les traitements agricoles et la corrosion des tuyauteries (**RODIER &al. 2005**).

Le cuivre est l'un des métaux les plus employés à cause de ses propriétés physiques et sa conductibilité électrique et thermique (**BELABED, 2010**).

### I.2.6.7. Le Sélénium

Le sélénium est un oligo-élément au pouvoir antioxydant indispensable au bon fonctionnement de l'organisme et joue un rôle majeur. Cependant, il doit être utilisé avec quelques précautions. En dehors d'une intoxication grave aux métaux lourds. (**AIT ZIANE & BOUYAHIA, 2013**)

## I.3.Métaux lourds dans le sol

### I.3.1.1 Les sols en Algérie

Les sols dans les régions montagneuses de l'Atlas algérien sont prédominés par des leptosols rocheux.

Dans la zone plus sèche au nord de l'Atlas, les sols sont généralement riches en carbonate de calcium (calcisols). Beaucoup de ces sols sont adaptés à l'agriculture, mais la disponibilité de l'eau constitue une contrainte majeure pour la croissance des cultures.

Le long de la région côtière la plus humide, les sols sont mieux développés et donnent lieu à plus de végétation - y compris les luvisols et les cambisols, Les vertisols, qui supportent la culture céréalière et le pâturage, caractérisent la région côtière orientale de l'Algérie. La région aride au sud de l'Atlas est caractérisée par des leptosols mal développés, qui contiennent peu de matière organique. Les régions d'arenosols désignent de vastes étendues de dunes de sable.

Les fluvisols se trouvent le long des vallées des oueds. Au sud de l'Atlas, les oueds sont généralement éphémères, mais dans la région nord, plus humide, où les oueds sont plus ou moins pérennes, les vallées sont souvent cultivées intensivement (**Carte du sol de l'Algérie, 2019**)

D'ailleurs, En Algérie Les métaux lourds sont présents naturellement dans les sols. Le développement de l'activité industrielle (industries métallurgiques et chimiques) et de l'activité agricole (pesticides, engrais, ...) depuis le siècle dernier a entraîné des apports parfois intenses de ces éléments qui deviennent des polluants pour l'environnement. Même à faibles concentrations, ils peuvent constituer un sérieux problème de santé publique du fait de leur toxicité et de leur caractère bio-accumulatif.

### **I.3.1.1. Classification des sols en Algérie**

La classification des sols d'Algérie qu'il présente est d'abord fondée sur le facteur climatique qui a joué le rôle essentiel dans la formation du sol (vent, pluie, température), ensuite sur le degré d'évolution du sol (nombre d'horizons différenciés), enfin, accessoirement, sur le degré de lessivage. Les sols d'Algérie peuvent ainsi être regroupés, en fonction du facteur climatique dominant dans leur formation, en trois grands groupes de sols zonaux ayant chacun leurs caractères propres déterminés par les conditions du milieu commandant les processus de pédogenèse :

- Sols sahariens où le facteur dominant de formation des sols est le vent (considérer comme négligeable, comme le dit l'auteur, la température et la sécheresse qui permettent justement l'action du vent) ;
- Sols des régions semi-arides où le sol zonal serait dû à l'équilibre climatique vent-pluie (ou plus exactement à l'équilibre : action du vent- résistance de la végétation) ;
- Sols des régions telliennes humides où humidité et végétation deviennent les principaux facteurs de formation des sols zonaux (**d'après J.-H Durand**).

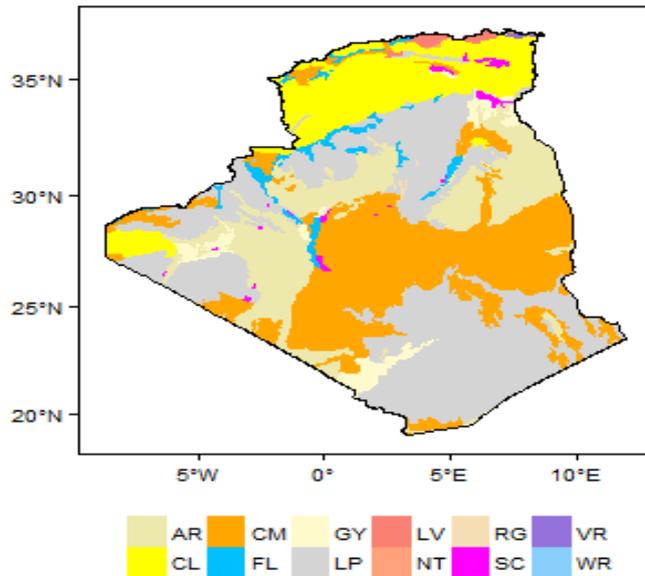


Figure I. 2: Les sols en Algérie d’après les métaux lourds

<b>AR</b>	Artisols	<b>CM</b>	Cambisols	<b>GY</b>	gypsisols	<b>LV</b>	Luvisols	<b>RG</b>	Regosols
<b>WR</b>	Water body	<b>VR</b>	Vertisols	<b>LP</b>	leptosols	<b>NT</b>	Nitisols	<b>SC</b>	solontchaks
<b>CL</b>	Calsisols	<b>FL</b>	Flivisols						

**I.3.2. Origine des métaux lourds dans le sol**

La présence des métaux lourds dans les sols peut être d’origine (sources) naturelle ou anthropique.

**I.3.2.1. Source naturelle**

Est fonction du fond pedo-géochimique local et des Apports de poussières et aérosols libères dans l’atmosphère par l’activité volcanique, les Embrunsmarins, etc. La composition chimique de la roche-mère va influencer la richesse future du sol en métaux.

**I.3.2.2. Source anthropique**

Les sources humaines liées à l’exploitation et au traitement des minéraux, à la fabrication et l’utilisation d’engrais et de pesticides, à l’industrie chimique, aux décharges et à l’incinération de déchets ménagers et industriels, etc. d’ailleurs L’accomplissement des cycles biogéochimiques des métaux dans les sols et les plantes modifie la forme chimique des éléments

traces métalliques et participe à leur évolution dans les sols. Enfin, les transferts pédologiques verticaux et latéraux vont entraîner le lessivage des métaux vers les horizons profonds et les nappes phréatiques. Ainsi, les Métaux se trouvent dispersés dans les différents horizons du sol (Bert et Deram, 1999 ; Baize, 1997).

**Tableau I. 1:**Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie

Métal	Utilisations	Métal	Utilisations
<b>Al</b>	Transport 25% Bâtiments 8.1% Emballage 20% Construction électrique 10% Autres 25%	<b>Ni</b>	Acierinoxydable 65% Alliages de nickel 15% Aciers et font alliées 7.5% Revêtement de surface 7.5 Autres 25%
<b>Cd</b>	Piles 70% Pigments 13% Autres 17%	<b>Hg</b>	Cellules d'électrolyse 50% Construction électrique 25% Autres 25%
<b>Cr</b>	Aciersinoxydables 65% Chimie et réfractaires 20% Divers 15%	<b>Pb</b>	Batteries 70% Laminés et munitions 10% Chimie 10% Autres 10%
<b>Fe</b>	Sidérurgie 99% Autres 1%	<b>Mo</b>	Ferromolybdène et alliages 70% Chimie (catalyseurs) 30%
<b>Co</b>	Superalliages 72.6% Aimants 9% Carburescimentés 3.4% Céramiques 9.6% Chimie 5.4%	<b>Zn</b>	Galvanisation 50% Piècesmoulées 15% Laiton et autresmétauxd'alliages 20% Demi-produits 5% Chimie et autres 10%
<b>Cu</b>	Construction électrique 55% Bâtiment 20% Equipementindustriel 10% Transports 5% Autres 10%	<b>Sn</b>	Fer blanc 30% Soudure 30% Chimie 15% Etain et divers 25%

### I.3.3. Relation métaux lourds-sol

Le sol est un milieu conservation capable de réduire la mobilité des substances (métaux lourds) par un phénomène d'adsorption aux particules du sol et aux racines des plantes. Mais le sol est également réactif c'est-à-dire qui transforme chimiquement les substances (métaux lourds) et ce à l'aide d'organisme vivants. Ceci se traduit au niveau de cycle de la nature par la décomposition continue de la biomasse morte et dont les éléments s'accumulent avec les éléments humique et minéraux argileux. De ce fait, les sols ne sont pas uniquement un lieu de déposition des substances (métaux lourds), ils sont également des sources de (métaux lourds) disponibles pour la constitution d'une nouvelle biomasse

D'ailleurs, les sols sont un milieu d'écoulement des substances (métaux lourds) qui ne sont pas adsorbé ou ne le sont que difficilement et qui sont transportées avec l'eau de percolation dans les couches plus profond ou même dans les eaux souterraines.

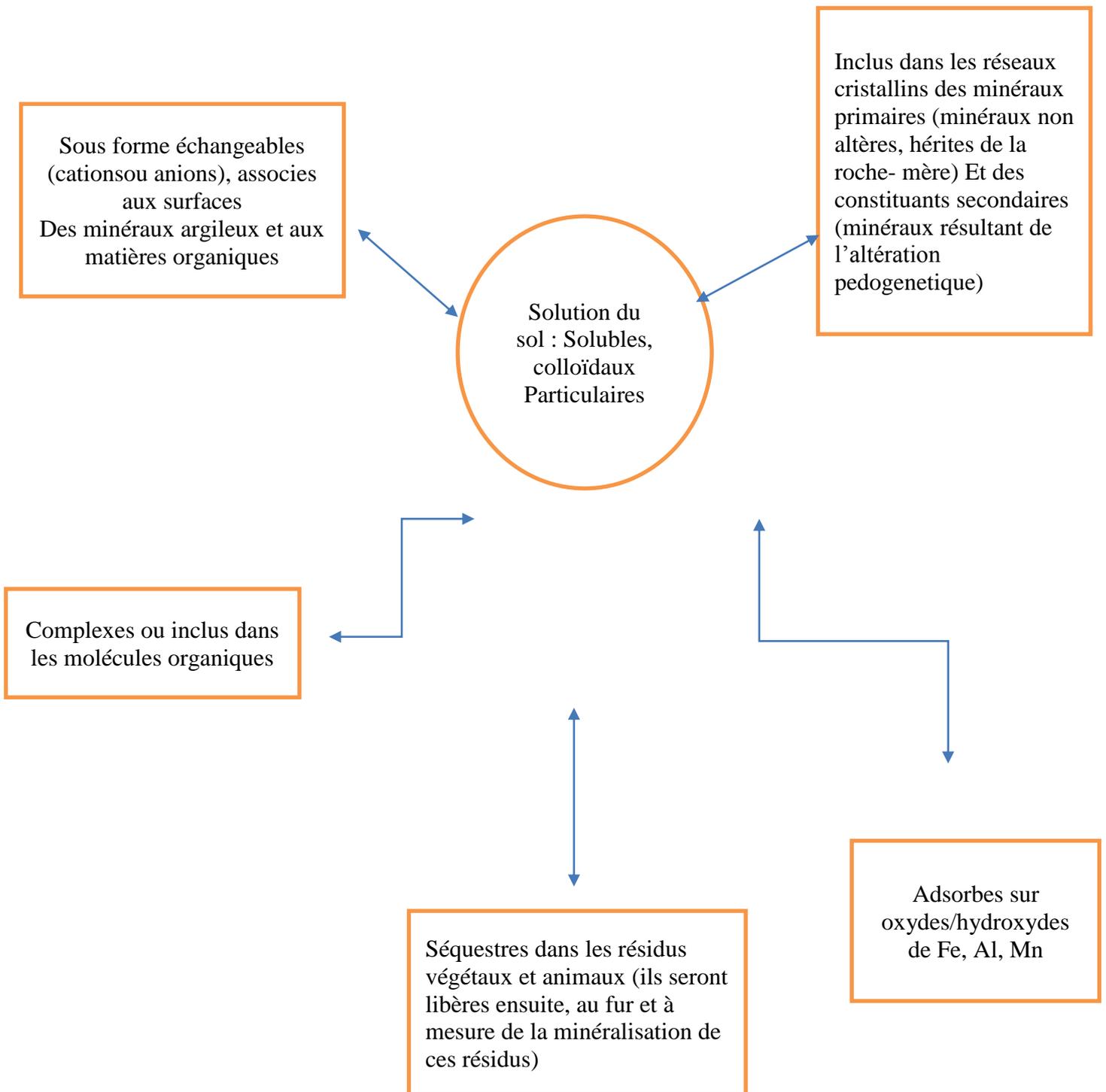
En résumé, le sol représente pour les métaux lourds :

- Un lieu de déposition retenant les substances grâce à ses propriétés colloïdales (matière organique-argile) ;
- Une 'usines' de transformation des substances grâce aux réactions chimiques et à ses cortèges microbiens spécialisés ;
- Un distributeur de substances aux organismes vivants (animaux et végétaux) par le biais des racines des plantes ;
- Un 'liquidateurs' des substances qu'il n'arrive pas à fixer (**Kadem, 2005**).

### I.3.4. Forme et localisation des métaux lourds dans le sol

Les métaux lourds sous formes associées à la phase solide se trouvent en quantité majoritaire mais ce sont les métaux lourds sous formes associées à la phase liquide (solution du sol avec ses éléments solubles) qui, bien que minoritaires, sont les plus importants puisqu'ils sont les plus bio disponibles (**Pereira et Sonnet, 2007**).

D'ailleurs, Les métaux lourds existent dans six compartiments différents du sol



### I.3.5. la répartition et devenir des métaux lourds dans le sol

L'étude de la répartition d'un élément trace métallique entre les composants solides s'appelle la spéciation appréhendée par une technique qui porte le nom « d'extraction séquentielle ».

La variable déterminante de cette répartition est le degré de solubilité du métal.

- ✚ si le métal est soluble, il va passer dans les nappes ou dans la plante.
- ✚ s'il est insoluble, il va rester dans le sol.

La solubilité va dépendre de plusieurs facteurs, le plus important est l'acidité du sol.

- ✚ Un sol acide facilite la mobilisation. Les métaux lourds ne s'accumulent pas. Ils sont transférés vers les nappes phréatiques et les fleuves ou absorbés par les plantes et présentent alors un risque pour la santé.
- ✚ Un sol calcaire contribue à l'immobilisation de certains métaux (certains éléments réagissent différemment, notamment l'arsenic, plus mobile dans un sol calcaire).

Sol Phase solide (50% du volume)		Autres phases (eau, gaz)		
Matière minérale (95 – 98%)	Matière organique (2 - 5 %)			
	Oxydes de fer et de manganèse	Acides  10 %	Polysaccharides  30 %	Substances chimiques  50 - 60 %
		E T M		

### I.3.6. Comportement des métaux lourds dans le sol

Les associations des métaux aux différents constituants du sol, peuvent être diverses :

- Inclusion dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires ;
- Adsorption sur les phases hydroxylées du fer (Fe), aluminium(Al), magnésium (Mn) ;
- Complexations ou inclusion dans les macromolécules organiques ;
- Echange ionique avec les surfaces des minéraux argileux et des matières organiques ;
- Présence sous une forme soluble, colloïdale ou particulaire dans la solution du sol.

Les métaux plus distingués dans ce cas :

### I.3.6.1. Cas du plomb

Le plomb est le plus répandu des métaux lourds. Le plomb est généralement considéré comme peu mobile dans les sols, surtout en conditions réduites. Cependant sa solubilité peut augmenter rapidement suite à la formation de complexes organiques, d'ailleurs est un métal amphotère, c'est-à-dire sensible aux variations de pH : la solubilité est minimale dans l'intervalle de pH = 9 jusqu'à pH=11.

### I.3.6.2. Cas du zinc

La concentration en zinc de la solution du sol dépend de sa concentration totale dans le sol, de la solubilité de ses composés, et de l'ampleur de l'absorption.

Le sulfate de zinc est très soluble alors que l'oxyde est relativement insoluble. Le pH du sol semble être un des principaux facteurs affectant la mobilité ou la rétention de zinc (Zn). Dans des sols acides (pH<5) et oxydés, le zinc est un des métaux lourds les plus mobiles (**BOURRELIER, P. H. BERTHELIN, J. 2008**)

### I.3.6.3. Cas du chrome

Le sol se trouve à l'état de valence Cr<sup>3+</sup> ou Cr(VI) dans les sols, mais les deux valences exhibent des toxicités et des mobilités différentes. Dans les sols des régions tempérées, où les minéraux argileux prédominent, les cations Cr(VI) sont repoussés par la charge négative des particules du sol. Cette répulsion et la solubilité des composés de Cr(VI) rendent le chrome hexavalent assez mobile (**O'NEILL, 2005**) ce qui en fait la forme la plus toxique pour les systèmes biologiques. Le chrome trivalent apparaît le plus souvent sous la forme de cation dans les sols où il forme des composés oxydes ou hydroxydes relativement insolubles. De par sa charge positive, le cation Cr(III) est attiré par les particules de sol chargées négativement et s'associe avec les fractions les plus fines du sol. Cr(III) est donc moins mobile que Cr(VI) dans les sols.

## I.3.7. Les facteurs modifiant et mobilité des métaux lourds dans le sol

### La biodisponibilité

Représente la capacité d'un élément trace métallique à passer d'un compartiment du sol quel qu'il soit vers une bactérie, un animal ou un végétal vivant dans ce dernier (**Juste, 1988**).

De nombreuses études ont mis en évidence l'influence du pH sur la mobilité des éléments métalliques dans un sol (Ge, et al, 2000 ; Hund-Rinke et Kördel, 2003 ; Peakall et Burger, 2003 ; Peijnenburg et Jager, 2003 ; Terrés, et al, 2002).

La majorité des éléments métalliques est plus mobile en conditions acides qu'en conditions alcalines : l'abaissement du pH favorise la mobilité des éléments métalliques notamment par la mise en solution des sels métalliques alors que, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation des éléments métallique par la formation de composés insolubles (Perrono, 1999 ; Richards, et al, 2000).

Ce phénomène s'explique par la compétition avec les protons (Yin et al, 2002). Dans les sols à pH acide, la plupart des sites de liaison potentiels sont occupés par des protons, les métaux sont donc libres et mobiles. Par contre, quand le pH augmente pour devenir alcalin voire basique, la compétition des éléments métalliques avec les protons, en nombre inférieur, diminue : les sites de liaison sont occupés par les éléments métalliques et donc immobilisés.

### La mobilité

La mobilité d'un élément trace métallique constitue l'aptitude d'un élément à passer dans des compartiments du sol ou il est de moins en moins énergétiquement retenu, avec comme Compartiment ultime la phase liquide ou, dans certains cas, l'atmosphère du sol (Juste, 1988).

Il existe de multiples paramètres influençant la mobilité des métaux dans les sols dont les plus importants sont (Colinet, 2003) :

#### I.3.7.1. Le PH

De nombreuses études ont mise en évidence l'influence du pH sur la mobilité des éléments métalliques dans un sol (Viard, 2004), quand le pH diminue d'une unité, la concentration des cations métalliques libres augmente d'environ un facteur de 2 dans la solution du sol et par conséquent améliore la phytoextraction.

Les organismes et les micro-organismes eux-mêmes peuvent influence la disponibilité des métaux lourd dans leur environnement proche par acidification locale lors d'une réaction métabolique ou par la production de composé complexant les métaux lourds (Huynh, 2009).

### I.3.7.2. Le potentiel redox (Eh)

Le potentiel redox (eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques. Ainsi, les faibles valeurs d'Eh favorisent la dissolution des hydroxydes et entraînent une augmentation de la concentration des métaux associé avec des composants.

De plus, la modification du degré d'oxydation des ligands ou des éléments se liant avec le métal influence indirectement la solubilité des métaux lourds. Par exemple, en conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfure qui piège volontiers les éléments métalliques tels que Pb, cd, Zn.

Bien que influence des conditions oxydoréductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparait souvent comme secondaire par rapport au Ph. En effet, pour un sol donné l'Eh varie en fonction inverse du Ph, il augmente quand le Ph diminue (**Huynh, 2009**).

**Tableau I. 2:** Effets du pH et du potentiel redox sur la mobilité des métaux lourds du sol

Mobilité Relative	Ph		Potentiel redox	
	Neutre- alcalin	Acide	Oxydant	Réducteur
Très haute	Se, Mo	B	B	-
Haute	AS	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, (Mn)	Mo, Se	-
Moyenne	Mn	Cu, Al, Pb, Cr	Cu, Co, Hg, Ni, Zn, Cd	Mn
Basse	Pb, Fe, Zn, Cd, Tl	Fe(III), Tl	Pb, Tl	Fe, Zn, Co, Ni
Tèsbasse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Mo, Se, As	Al, Cr, Fe, Mn	Al, Cr, Hg, Cu, Se, B, Mo, Cd, Pb

### I.3.7.3. La teneur en argile

Les argiles, de par leurs propriétés physico-chimiques, jouent un rôle très important dans la disponibilité des métaux lourds. Il a été montré que les métaux lourds peuvent être absorbés immobilisés par les minéraux argileux ou également être complexés par la matière organique du

sol en formant alors un complexe organométallique. En effet, la charge électro négative des argiles les rend aptes à contracter des liaisons électrostatiques avec toute entité chargée positivement, comme les cations métalliques. Ces liaisons sont réversibles et les cations fixés sont échangeables : ils peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la phase aqueuse du sol. Cette capacité d'échange de cations (CEC) exprimée en milliéquivalents pour 100g est une caractéristique importante de chaque argile qui conditionne grandement la biodisponibilité d'un métal dans le sol (**Huynh, 2009**)

#### **I.3.7.4. L'activité biologique**

Les principaux modes d'action sur le transport des polluants métalliques sont la solubilité, l'insoluble et la volatilisation. Parmi les micro-organismes, il existe de nombreuses communautés bactériennes et fongiques dont les activités métaboliques affectent le mouvement des métaux lourds. Cependant, bon nombre de ces phénomènes sont également fréquents chez les plantes. (**Huynh, 2009**)

#### **I.3.7.5. La matière organique**

La matière organique joue un rôle important dans la mobilité et biodisponibilité des métaux lourds dans le sol, d'ailleurs On peut diviser la matière organique présente dans le sol en une fraction vivante et une autre morte. La fraction vivante est composée de la faune, la microflore, les racines etc. La fraction morte est composée de débris organiques plus ou moins décomposés. La matière organique des sols possède une grande surface spécifique et peut aussi jouer un rôle important dans le contrôle de l'acidité du sol. Les substances humiques peuvent fixer les ions métalliques par complexation. La matière organique des sols peut chimisorber efficacement les ions métalliques avec un haut degré de sélectivité, il peut alors se former de fortes liaisons ioniques ou covalentes. La force et la réversibilité de la liaison dépendent alors du ligand organique mis en jeu. Dans les sols, il existe de nombreux ligands organiques capables de se lier aux métaux lourds : carboxylique, phénolique, carbonyle, etc. (**McBride, 2000**).

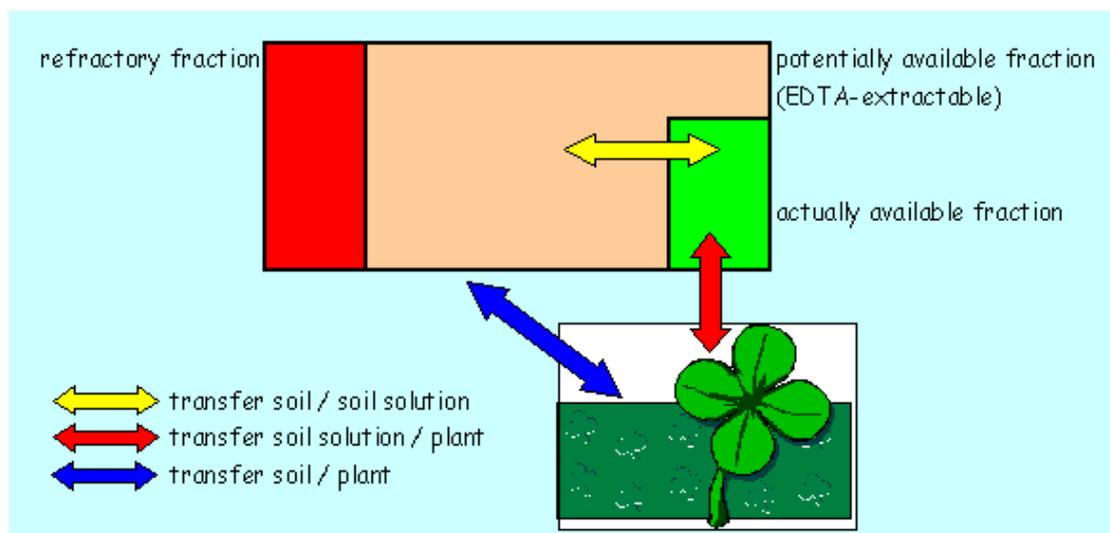
#### **I.3.7.6. Capacité d'échanges cationique CEC**

La CEC représente un élément essentiel dans la compréhension de l'adsorption des ETM dans les sols. Il y a une rétention des éléments par le sol quand la CEC est élevées. Cette augmentation de la CEC abaisse la biodisponibilité de ces éléments d'où la diminution de leurs teneurs dans les sols (**Sissaoui et Mehidi, 2011**) d'ailleurs, la capacité d'échange ionique représente que les métaux lourds ont une forte affinité pour la fraction l'argile du sol ainsi qu'avec d'autres phases minérales comme les oxydes de fer, Aluminium, manganèse ou

phosphate, carbonate, etc. L'existence de ces Les éléments favorise le gel des métaux lourds. En fait, ils ont une chargeL'électronégativité qui leur permet de nouer des liens réversibles avec, notamment, Cations métalliques qui restent remplaçables. Capacité d'échange d'ions métalliques elle joue un rôle de stabilisation plus important que la matière organique (Alloway, 1995 ; Impens et al. 1991)

#### ✚ La concentration :

La mesure de la concentration totale des métaux lourds dans le sol ne reflète pas systématiquement la toxicité d'un site pour la plante. Les seuils de toxicité sont fonctions de la mobilité et de la biodisponibilité des métaux. Des lors, les scientifiques se trouvent confrontés à de grandes difficultés lorsqu'il s'agit de déterminer les seuils de concentration totale d'éléments traces métalliques considérés comme phytotoxiques (Kabata-Pendia et Pendias, 2001).



**Figure I. 3:** Concentration en métaux lourds dans le sol : le résultat de la biodisponibilité (Meerts, 2009-2010)

### I.3.8. Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé

Les métaux lourds, ou éléments traces métalliques (ETM), existent naturellement mais en quantités très faibles dans les sols, l'eau et l'air. Certaines activités humaines, comme la combustion du charbon, du pétrole, des déchets et certains procédés industriels en rediffusent en revanche en grande quantité dans l'environnement. Ils sont souvent liés aux particules fines PM<sub>2,5</sub>, à l'exception du mercure, qui est principalement gazeux. Si une partie des métaux lourds retombe aux alentours de la source d'émissions, certains peuvent voyager sur de longues distances.

Les métaux lourds ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air : ils sont biopersistants, perturbent les écosystèmes, détériorent les sols, les eaux de surface, les forêts et les cultures et s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Certains sont cancérigènes pour l'homme.

D'ailleurs, Certains éléments sont nécessaires à la vie en très faible quantité : ce sont les oligoéléments. À trop faible dose ils provoquent des carences dans l'organisme, mais ils deviennent toxiques à haute dose (TOUZE .S, CHARTIER. R, GABORIAU .H, 2004)

### **I.3.9. Contamination de métaux lourds dans le sol en Algérie**

Une augmentation de la pollution par les métaux lourds dans les sols d'Algérie en raison de l'industrialisation et de l'urbanisation intense est devenue un grave problème environnemental, d'ailleurs l'Algérie abrite plusieurs installations industrielles qui sont la principale source de déchets dangereux. Des échantillons de sol de surface, y compris les différentes zones fonctionnelles (usage du sol) à plusieurs wilaya par exemple (Hassi Massoud) est Parmi les zones fonctionnelles, Les concentrations en Ni étaient comparables aux valeurs de fond, tandis que les concentrations en Cu, Mn, Pb et Zn étaient plus élevés que leurs valeurs de base correspondantes et les régions industrielles ont indiqué les concentrations de métaux plus élevés, tandis que les plus faibles se sont trouvés dans le sol rural.

La répartition spatiale de l'IPI a montré que les zones désertiques et rural affichés une contamination par les métaux lourds relativement faible en comparaison avec d'autres zones

#### **I.3.9.1. Contamination des sols par les métaux lourds**

Les métaux se répartissent dans les sols sous des formes variées. On les trouve sous forme échangeable dans les argiles et la matière organique (qui leur permet d'être absorbés par les plantes), sous forme de complexes ou associés à des molécules organiques. Ils peuvent être inclus dans des phases cristallines ou directement adsorbés sur des particules d'oxydes ou d'hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse. Enfin, ils peuvent être retenus dans les restes d'un organisme vivant qui les contenait. La forme des métaux dans les sols dépend de manière dynamique de leur composition minéralogique, des conditions de salinité, de pH, d'oxydo-réduction, de la granulométrie du sol, de sa teneur en eau, de la présence de ligands en solution et de micro-organismes. Tous ces facteurs influencent la solubilisation des métaux ou au contraire, leur précipitation ou leur adsorption (Nowak et al. 2003 ; Laperche et al. 2004). Les interactions entre les différents compartiments du sol ont lieu par l'intermédiaire de la solution du sol qui transporte les métaux sous toutes leurs formes, solubles ou particulaires. La forme

sous laquelle les éléments traces sont présents dans le sol conditionne leur mobilité et leur biodisponibilité, deux paramètres extrêmement importants pour évaluer leur impact toxicologique. La teneur en métaux des sols peut être d'origine naturelle ou d'origine anthropique, c'est-à-dire issue des activités humaines. L'apport en métaux se fait par des voies différentes dans les deux cas.

### I.3.9.2. Sources naturelles de contamination

En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère. L'effritement de celle-ci et l'érosion conduisent à la formation des sols. Ces processus géochimiques associés à d'autres phénomènes, en particulier biologiques, sont désignés sous le terme de différenciation des sols. Elle s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux. Ainsi, une roche-mère riche en arsenic, par exemple, donnera un sol riche en arsenic, bien que cette corrélation soit plus marquée pour certains métaux (Cr, V, Zn) que pour d'autres (Co, Mo, Pb, Se) dont l'abondance dans le sol peut être plus fortement liée au cycle bio-géochimique (**Pansu et Gautheyrou 2003**). Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique.

D'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux sont identifiables, mais leur contribution est relativement faible comparée à l'apport d'origine géologique. Citons (**Baize, 1997 ; Nriagu, 1989**) :

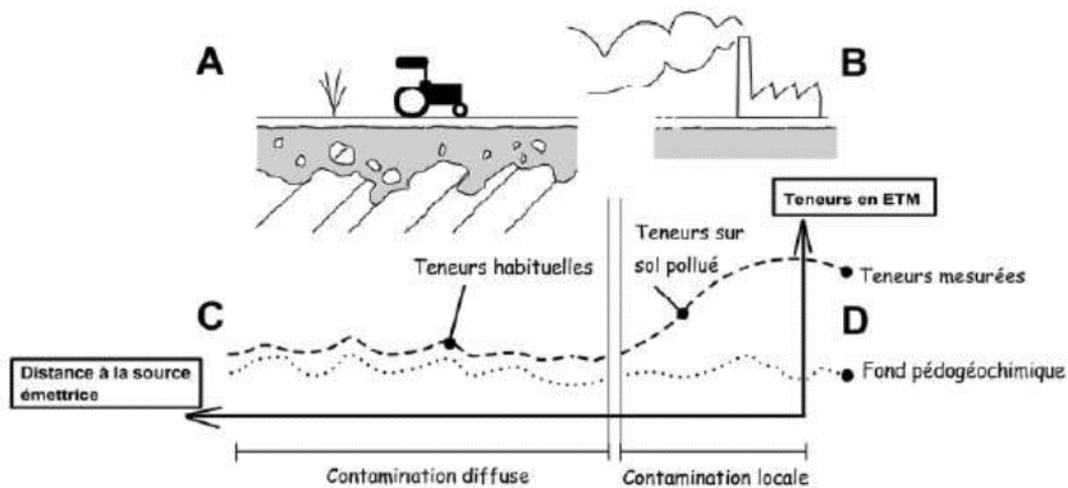
- Le cycle bio-géochimique entre les sols et les plantes. Celles-ci absorbent des métaux dans le sol ou bien par voie atmosphérique, puis les redéposent à la surface (feuilles mortes, décomposition des végétaux...).
- Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- Apport par lessivage du sol et érosion en surface.
- Apports lointains d'origine atmosphérique : volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

### I.3.9.3. Sources anthropiques de contamination

La pollution des sols due à l'activité humaine intervient sur une échelle de temps beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie, voire moins. On distingue deux types de contamination (**Bliefert et Perraud., 2001**) :

- **Les contaminations diffuses**, mettant en jeu un faible nombre de polluants aux concentrations peu variables provenant de sources non stationnaires ou de grande étendue, ou bien d'un grand nombre de sources. Dans ce cas, la pollution se fait par voie atmosphérique sous forme de poussière et d'aérosols issus de l'activité industrielle, des chauffages domestiques, des automobiles, etc., se déposant sur les sols, sur les végétaux et sur les eaux de surface sous forme de précipitations sèches (transport par les vents, sédimentation) ou humides (pluie, neige, grêle), ou par interception de particules en suspension (brouillards). On parlera alors de sol pollué
- **Contaminations locale**, Qui touchent un air relativement faible et sont dues à une ou plusieurs source(s) bien identifiée(s) et souvent très proches(s) (quelques mètres à quelques kilomètres). Il s'agit généralement d'apports massifs, souvent associés aux exploitations minières, aux installations industrielles et à d'autres installations, tant en cours d'exploitation qu'après leur fermeture. (**Pereira et Sonnet ,2007**)

Il faut souligner que dans les deux cas, nous avons essentiellement affaire à des pollutions par voie aérienne. Les métaux sont transportés par les particules (liquides ou solides) constituant les aérosols. Les particules inférieures au micron peuvent être transportées sur de très longues distances alors que les particules plus grosses (10- 100  $\mu\text{m}$ ) contaminent plutôt les zones proches de la source d'émission (**Gombert et al, 2005**).



**Figure I. 4:**Contamination diffuse et locale (Pereira et Sonnet, 2007).

**(A) :** la coupe représente l'exemple d'un sol se formant sur un matériau parental (en grisé), développé sur des roches du substrat géologique.

**(B) :** sur le même sol, présence d'une source d'émission massive de polluants.

**(C) :** en pointillé : fond pédogéochimique naturel qui serait présent en l'absence de contamination diffuse. En tireté, les teneurs mesurées dans le sol, qui sont qualifiées d'habituelle car on ne peut pas déceler l'influence d'une contamination locale.

**(D) :** en tireté, les teneurs mesurées sont qualifiées de teneurs sur sol pollué parce qu'elles ont un niveau élevé résultant d'une contamination locale du sol.

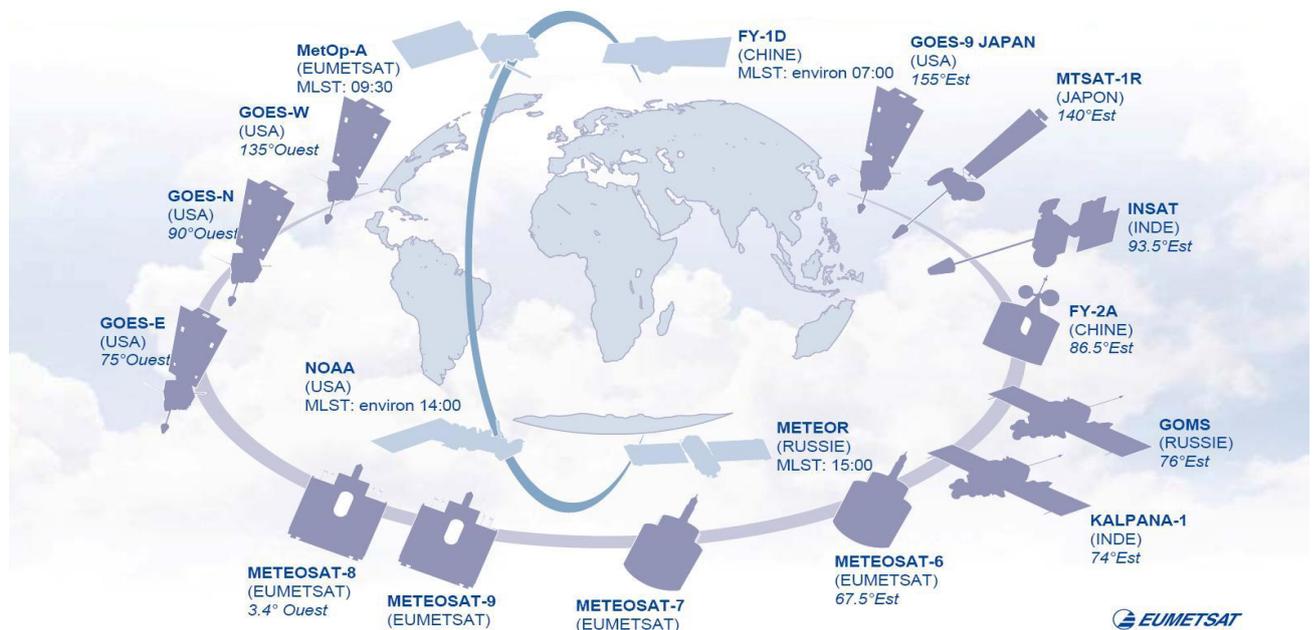
# *Chapitre II*

*La télédétection et  
quantification des métaux  
lourds dans le sol*

### II.1. La télédétection

#### II.1.1. Introduction

Depuis la mise sur orbite du premier satellite d'observation *Tiros*, en 1960, des dizaines de satellites dédiés à la météorologie et à la climatologie ont été lancés, fruit d'une coopération internationale. Les informations qu'ils fournissent sont multiples : *images de l'atmosphère* (des systèmes nuageux, mais aussi des concentrations en éléments chimiques comme le CO<sub>2</sub>, la vapeur d'eau, l'ozone, le SO<sub>2</sub>, etc. Dans diverses gammes de longueur d'ondes, températures de radiance, variation du niveau de la mer, vitesse et direction des vents... Cela dépend de l'orbite du satellite, à **défilement** ou **géostationnaire**, et des **caractéristiques des capteurs embarqués**.



**Figure II. 1:** Le système Mondial d'Observation Météorologique (Copyright 2008 © EUMETSAT)

#### II.1.2. Définition

Pris au sens littéral du mot, la télédétection signifie l'action d'acquérir des informations à distance sur un objet ou un phénomène sans que le détecteur ne soit en contact avec l'objet étudié. En dépit de ce sens étymologique très large, le terme télédétection est actuellement utilisé pour désigner la science dont le but est l'étude de l'environnement terrestre au moyen des capteurs, à bord des plates-formes aériennes ou spatiales, sensibles au rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface de la terre ou par son atmosphère (ABBAS Nassim, USTHB.)

La télédétection est fondée sur le postulat que tout corps, suivant ses propriétés physiques et chimiques, réfléchit ou émet du rayonnement électromagnétique (REM) d'une façon distincte dans les diverses parties du spectre, en fonction du temps et de sa localisation dans l'espace.

([mediadico.com/dictionnaire/télédétection.html](http://mediadico.com/dictionnaire/tel%C3%A9d%C3%A9tection.html), 2010.)

L'observation et l'analyse des variations du REM provenant des objets visés par le capteur en fonction de la longueur d'onde, du ou des moments d'observation et de l'emplacement relatif de ces objets peuvent, en principe, nous permettre :

- 1- d'identifier la nature des objets ;
- 2- d'évaluer leur état ou mesurer leurs propriétés ;
- 3- de surveiller leur comportement dans le temps et dans l'espace ;
- 4- de déduire la présence ou l'absence des objets non directement "visibles" par les capteurs.

([techno-science.net/définition/télédétection.html](http://techno-science.net/d%C3%A9finition/t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection.html), 26-05-11)

### II.1.3. Principe physique de la Télédétection

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte sept étapes que nous allons élaborer ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs ([org/wiki/Télédétection](http://org/wiki/T%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection))

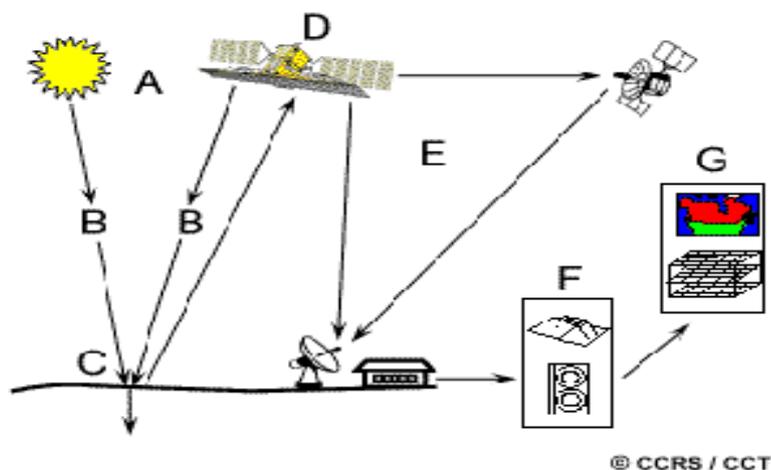


Figure II. 2: Principe physique de la télédétection

**1. Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

**2. Rayonnement et atmosphère (B)** - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

**3. Interaction avec la cible (C)** - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

**4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - L'énergie diffusée ou émise par la cible, doit être captée à distance (Par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

**5. Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

**6. Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

**7. Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier

### (Notion Fondamental de Télédétection)

#### II.1.3.1. Spectre électromagnétique

Les senseurs /capteurs/ instruments d'acquisitions actuels sont basés sur les variations de la distribution de l'énergie électromagnétique, réfléchi ou émise par des objets à la surface de la terre.

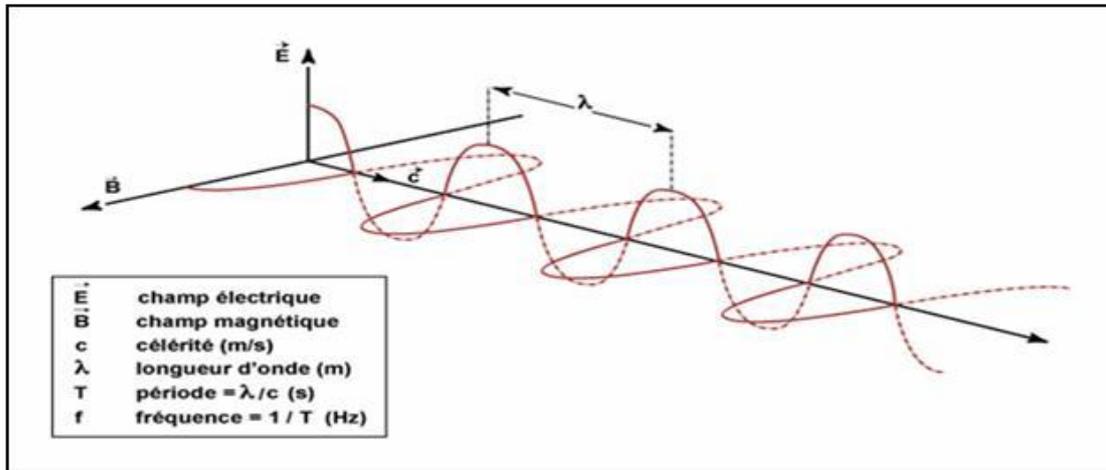


Figure II. 3: Nature et propagation d'une onde électromagnétique

L'énergie électromagnétique se propage sous forme d'ondes (figure 1) à fréquences et longueurs variées, constituant ainsi ce qu'on appelle le spectre électromagnétique (figure 2).

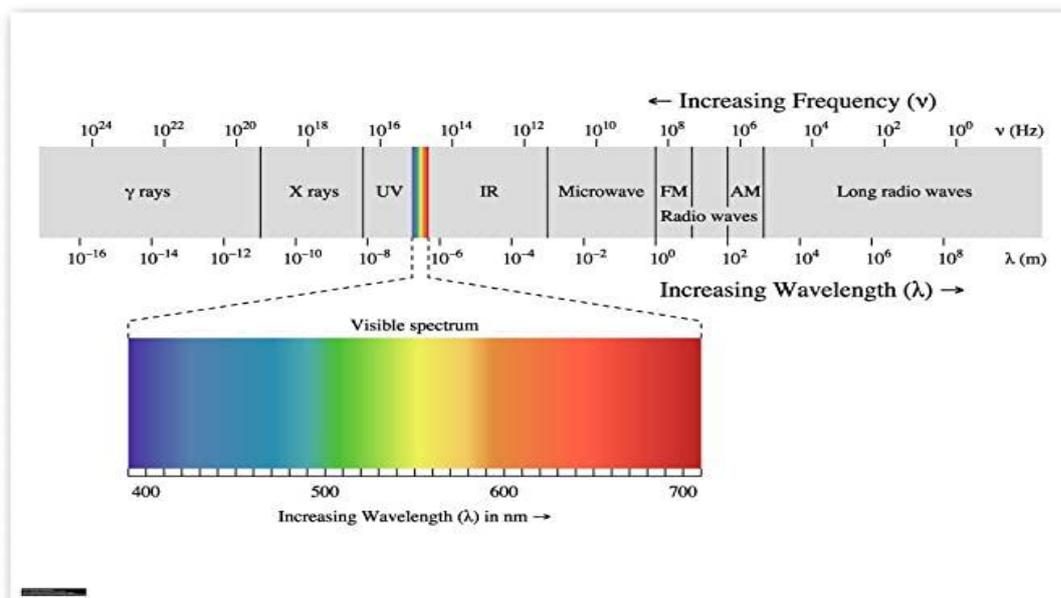


Figure II. 4: Spectre électromagnétique (LILESAD et KIEFER, 1987)

**La propagation et la distribution de l'énergie** électromagnétique obéissent à la théorie des ondes, dont la formule peut s'écrire :

$$c = \lambda \nu$$

Où  $\lambda$  = longueur d'onde,

$c$  = vitesse de la lumière dans le vide =  $3 \times 10^8$  m/s,

$n$  = fréquence de la longueur d'onde.

En télédétection, il est courant de catégoriser les ondes électromagnétiques par la localisation de leur longueur à l'intérieur du spectre électromagnétique.

$$\lambda = c / n$$

### II.1.3.2. Source de l'énergie électromagnétique

Le soleil constitue une source très importante pour les instruments de télédétection. Tout objet ayant une température supérieure à  $-273^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{K}$ ) peut émettre de l'énergie. L'énergie émise par un objet est fonction de sa température et peut être exprimée par la loi de Stéphan - Boltzman :

$$M = sT^4$$

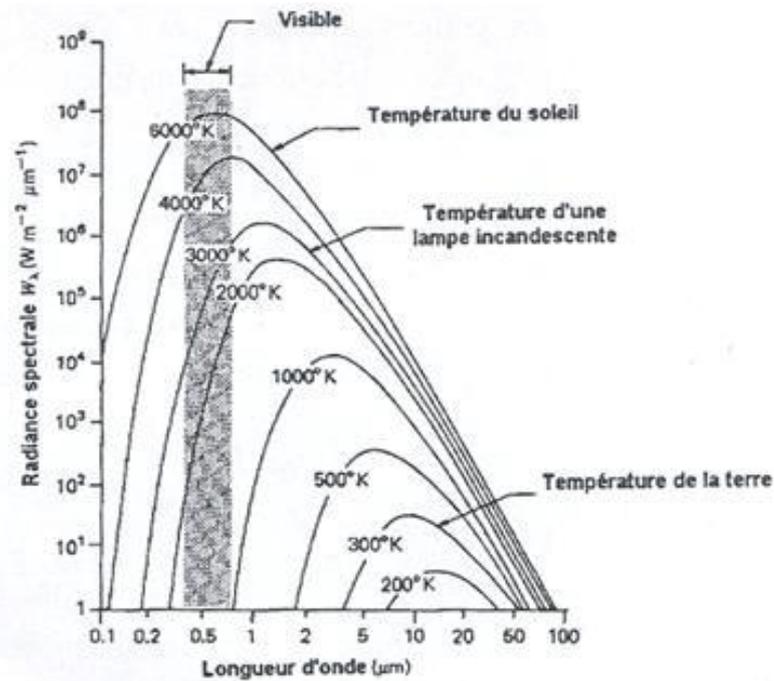
$M$  = la puissance (ou existence) totale d'énergie émise par un corps

$s$  = Constante de Stéphan - Boltzman ( $6.6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^4$ ),

$T$  = température absolue de l'objet (K).

Cette loi suppose que la source d'énergie en question se comporte comme un corps noir. On définit un corps noir comme étant un corps théorique qui absorbe et réémet la totalité de l'énergie qu'il reçoit.

Comme l'énergie totale émise par un corps varie en fonction de sa température, la distribution spectrale de cette énergie varie aussi. La loi de Stéphan - Boltzman montre que plus la température d'un corps n'augmente, plus l'énergie émise par ce corps n'augmente. La figure 4 représente les courbes de la distribution de l'énergie pour un corps noir à des températures variables ( $200 - 6000^{\circ}\text{K}$ ).



**Figure II. 5:** Distribution spectrale de l'énergie émise par un corps noir à des différentes températures (LILESAD et KIEFER, 1987)

### II.1.3.3. Perturbations atmosphériques

L'influence de l'atmosphère sur le rayonnement électromagnétique porte sur la réfraction, l'absorption, la diffusion et l'émission propre.

#### a- Réfraction

C'est la distorsion géométrique du trajet des ondes, due à des variations d'indice de réfraction.

#### b- Absorption

Elle est fortement liée à la longueur d'onde utilisée et dépend du type de molécules et de leurs propriétés. Pour les gaz, dont la répartition est stable, la modélisation de l'absorption est possible. Par contre, pour la vapeur d'eau, dont la concentration varie beaucoup, il faut effectuer des sondages, avant de pouvoir en effectuer la correction.

Les principales bandes d'absorption dans le visible sont dues à l'ozone (O<sub>3</sub>) à 600 nm, à la vapeur d'eau à 718 nm et à l'oxygène (O<sub>2</sub>) à 760 nm.

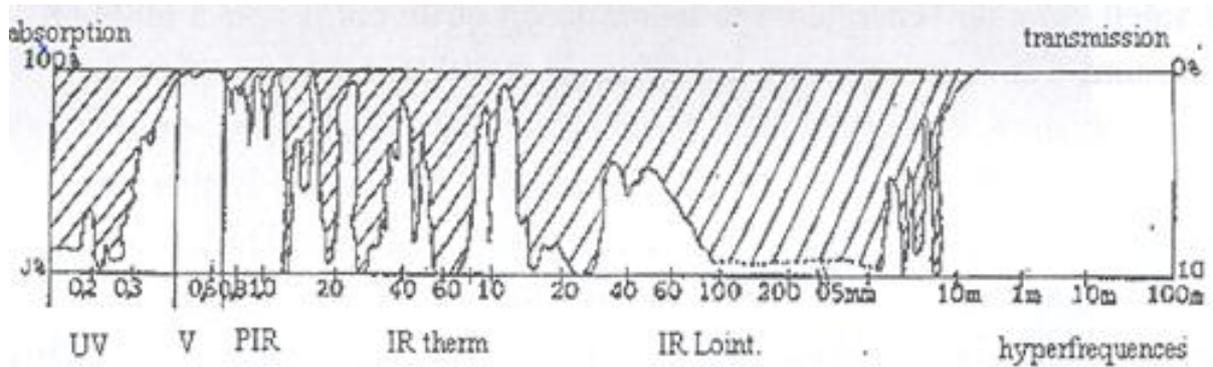


Figure II. 6: Rayonnement solaire et influence de l'atmosphère (BROSSIER R. et LUMMAUX J-C. ,1979)

c- Diffusion

Ce phénomène correspond à l'action des molécules et particules (gouttelettes d'eau, poussières, fumées...) sur les longueurs d'ondes. Soit  $d$  le diamètre des particules :

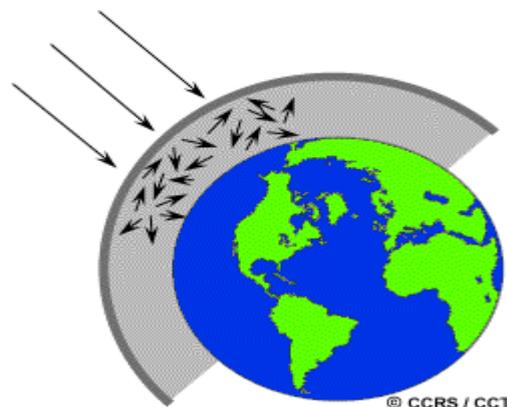


Figure II. 7: Type de diffuse

- Si  $\lambda > d$ , on a la diffusion de **Rayleigh**. Dans le visible, cette diffusion est due à l'action des molécules d'oxygène et d'azote et dans les micro-ondes, à l'action des gouttelettes d'eau (VIEILLEFOSSE, 1979).

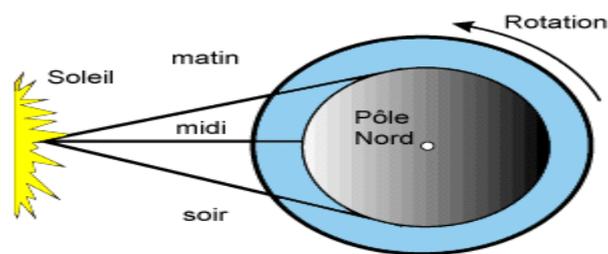


Figure II. 8: Schéma sur la diffuse de Rayleigh

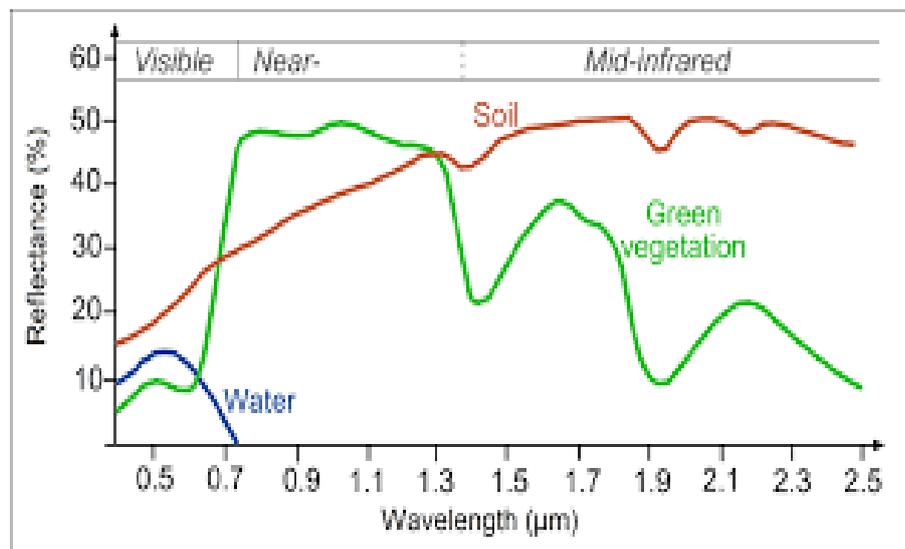
- Si  $d/2 < \lambda < d$ , il s'agit de la diffusion de **Mie**, pour laquelle 95% de l'énergie incidente est diffusée vers l'avant des particules. Suivant la turbidité de l'atmosphère, cette diffusion sera plus ou moins importante.

### d- Emission propre

L'atmosphère réémet une partie du rayonnement reçu, ce qui contribue à augmenter la valeur du flux mesuré par le capteur. Cette luminance atmosphérique s'ajoute à la valeur du flux réfléchi ou émis par la surface terrestre faisant l'objet de l'étude. Il est donc nécessaire de modéliser les effets de l'atmosphère sur les flux mesurés, tout particulièrement par les satellites, pour lesquels ces effets sont très importants

#### II.1.3.4. Réflectance spectrale de la végétation, du sol et de l'eau

La figure 8 présente les courbes de la réflectance spectrale de 3 types de couverture : la végétation, le sol et l'eau. On remarque nettement la distinction entre les 3 types.



**Figure II. 9:** Courbes typiques de la réflectance spectrale de la végétation du sol et de l'eau (LILESAD et KIEFER, 1987)

La réflectance spectrale de la végétation se manifeste souvent par des sommets et des dépressions (vallées). Les dépressions sont contrôlées par les pigments contenus dans les feuilles. Par exemple, la chlorophylle absorbe fortement de l'énergie électromagnétique aux environs de 0,45 et 0,67 mm. Donc, la végétation nous paraît verte dans le visible (œil humain),

parce qu'il y a une forte absorption du bleu et du rouge. La réflectance du sol présente moins de variations.

Les facteurs affectant la réflectance du sol sont l'humidité, la texture, la rugosité, la présence d'oxyde de fer, la présence de matière organique, etc. Ces facteurs sont complexes et interdépendants. Par exemple, la teneur du sol en humidité est très liée à sa texture ; un sol rugueux et sableux draine facilement. Les sols qui ont une texture fine retiennent plus d'eau et donc reflètent moins d'énergie. Cependant, sous des conditions sèches, le contraire se produit, les sols fins reflètent plus d'énergie que les sols rugueux

### II.1.4. Exemples de la télédétection

- ✚ Les cartes topographiques sont souvent produites à l'aide de paires stéréographiques de photos aériennes permettant de recréer une image en trois dimensions.
- ✚ Les tremblements de terre sont localisés a posteriori en comparant des sismogrammes enregistrés en différents lieux ; l'intensité relative et la précision temporelle de l'enregistrement conditionnent la qualité de l'information sur le lieu du tremblement.
- ✚ Les modèles numériques de terrain peuvent être produits par interférométrie (à l'aide du radar à ouverture synthétique), méthode consistant à enregistrer une série de mesures de la cible à partir d'un avion, d'un satellite ou d'une navette spatiale. La combinaison des données issues de ces mesures offre une carte détaillée contenant de l'information sur la couverture du sol, le relief ou encore le mouvement à une échelle centimétrique. Les données couvrent généralement des bandes de plusieurs kilomètres de largeur.

### II.1.5. Les images satellitaires

Applications image réussie des données de télédétection nécessitent une attention particulière à la fois les systèmes de capteurs à distance et les caractéristiques environnementales. Parmi les divers facteurs qui influent sur la qualité du contenu et des informations des données de télédétection, deux concepts sont très importants pour nous de comprendre. Ils déterminent le niveau de détails du processus de modélisation. Il s'agit de la résolution et la fréquence d'échantillonnage. (M'US et al, AUGUST 2008)

#### II.1.5.1. La résolution des images satellitaires

Est une mesure de la capacité d'un système optique de faire la distinction entre les signaux qui sont rapprochés dans l'espace ou dans le spectre.

### **II.1.5.1.1. La résolution spectrale**

Se réfère au nombre et la dimension des intervalles de longueur d'onde spécifique dans le spectre électromagnétique à laquelle un capteur est sensible. Une sélection rigoureuse des bandes spectrales peut améliorer la probabilité qu'une fonctionnalité sera détectée et identifiée et extrait des données biophysiques.

### **II.1.5.1.2. La résolution spatiale**

Est une mesure de la plus petite séparation angulaire ou linéaire entre deux objets qui peuvent être résolus par le capteur. Il existe une relation entre la taille d'une caractéristique d'être identifiés et la résolution spatiale du système de télédétection.

### **II.1.5.1.3. La résolution temporelle**

La résolution temporelle d'un système de capteur de référence à quelle fréquence il enregistre des images d'une zone particulière.

### **II.1.5.1.4. La résolution radiométrique**

Définit la sensibilité d'un détecteur de différences dans l'intensité du signal comme il enregistre le flux énergétique réfléchi ou émis par la région d'intérêt. Amélioration de la résolution augmentent généralement la probabilité que phénomènes peuvent être obtenues par télédétection avec plus de précision.

### **II.1.5.2. Contraintes liées à l'utilisation d'un satellite**

Dans un cas idéal, nous disposerions quotidiennement d'images à haute résolution spatiale acquises dans une bande spectrale relativement étroite. Dans la pratique, ce type de données n'est pas accessible car les capteurs sont soumis à des contraintes

**(MUS, ERREF TURKMEN. AUGUST 2008.)**

### **II.1.5.2.1. Compromis spatial –temporel**

La relation entre la fréquence d'acquisition et la résolution spatiale s'exprime à travers la fauchée du satellite.

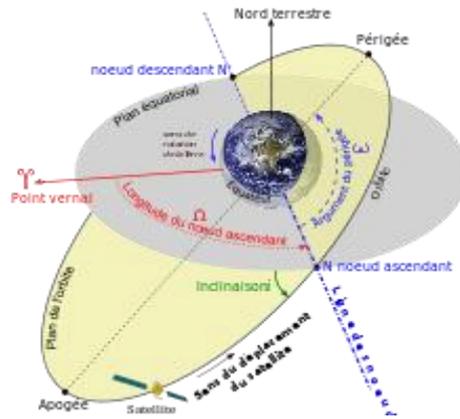


Figure II. 10: Orbites réalisées par les satellites défilants.

### II.1.5.2.2. Compromis spatial-spectral

Le même type de contrainte existe entre la résolution spatiale et la résolution spectrale. Une résolution spatiale élevée correspond au sol à des surfaces minimales observables de petite taille.

### II.1.5.2.3. Volume d'informations

La quantité d'informations recueillie apparaît également comme une contrainte à l'utilisation de données satellites. La manipulation des données implique non seulement le stockage sur la plate-forme satellitaire mais aussi la transmission au sol de ces données.

## II.1.6. Capteurs embarqués à bord des satellites

Les systèmes embarqués à bord des satellites comportent de multiples instruments dont les fonctions sont variées. Toutefois, pour une mission donnée, les instruments de la charge utile ont des fonctions bien particulières.

Deux grandes familles de capteurs sont identifiables : les **capteurs non-imageurs** et les **capteurs-imageurs**, ces derniers restituant sous forme d'images les observations effectuées dans un champ donné.

### II.1.6.1. Les capteurs non-imageurs

Les capteurs non-imageurs sont dédiés à la **mesure de grandeurs physiques** ne donnant pas lieu de façon directe à une image. C'est par exemple le cas d'un radar altimétrique ayant pour vocation de déterminer précisément l'altitude du satellite au-dessus de la surface terrestre, au cours de sa progression.

### II.1.6.2. Les capteurs-imageurs

Parmi les capteurs-imageurs, deux principes de fonctionnement existent.

On parle de **télédétection passive** lorsque le satellite reçoit :

- ✚ Le rayonnement solaire incident réfléchi par la surface terrestre et l'atmosphère dans le domaine du visible et de l'infrarouge proche.
- ✚ Le rayonnement propre de la Terre dans l'infrarouge lointain.

On parle de **télédétection active** lorsqu'une source de rayonnement est embarquée à bord du satellite. Ce rayonnement est émis en direction d'un objet qui le réfléchit. Le rayon réfléchi est capté par le satellite. C'est le principe du **radar**.

Les deux modes de télédétections sont illustrés par la figure 10

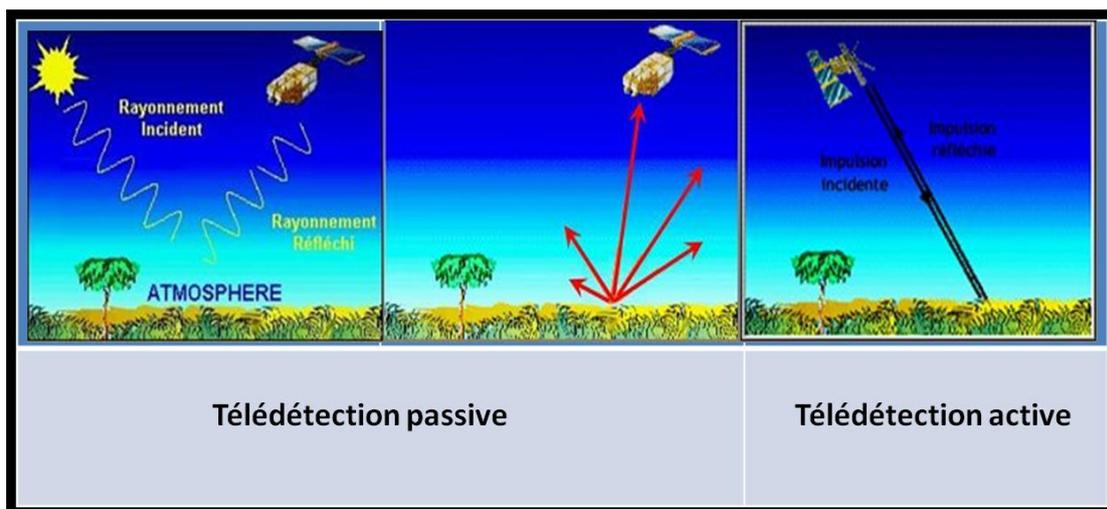


Figure II. 11: Deux modes de télédétections

## II.2. Estimation et quantification des métaux lourds dans le sol

Le sol, milieu environnemental important exposé à un certain nombre de polluants, y compris des polluants lourds métaux par diverses activités naturelles et anthropiques.

Le potentiel de présenter de graves risques et dangers pour les humains ainsi que d'autres créatures vivantes du écosystème par diverses voies d'exposition telles que l'ingestion directe, les sols contaminés l'eau, les cultures vivrières, le contact avec les sols contaminés et par la chaîne alimentaire. Explorer diverses techniques qui pourraient déterminer efficacement la présence de métaux lourds dans le sol.

Un certain nombre de méthodes ont été développées par plusieurs agences de réglementation et laboratoires privés et sont appliqués en routine pour la quantification et le suivi des matrices de sol, initiative de synthétiser les travaux sur les niveaux de pollution de l'écosystème du sol et donc sur diverses procédures d'extraction et de quantification utilisées dans le monde entier pour analyser les métaux lourds dans le sol

### II.2.1. Analyse des métaux lourds dans le sol

L'étude de la littérature a révélé que l'absorption atomique la spectrophotométrie a été la technique la plus largement utilisée pour analyse de la teneur en métaux lourds dans la matrice du sol. Brève introduction de différentes techniques sont données ci-dessous :

#### II.2.1.1. Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

La spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif est démontrée qu'il s'agit de l'une des techniques les plus utilisées pour estimation de la teneur en métaux lourds dans les échantillons de sol (T.B.1963)

Cette technique a la possibilité d'analyser les métaux dans les traces. Cette technique était auparavant considérée comme non économique hélas paré à d'autres techniques et avait ses limites mais les développements technologiques au sein d'ICP-OE en ont fait l'un des outils importants dans le domaine de l'analyse de la pollution par les métaux lourds (**G.H. Morrison et al, 1970**)

L'avantage majeur de cette technique est la demande croissante d'effectuer une détermination simultanée de plusieurs éléments à niveau de gramme/millilitre pour toutes traces constituants et volume limité d'échantillons,

#### II.2.1.2. Spectroscopie d'émission atomique à couplage inductif (ICP-AES)

La spectroscopie ICP-AES a été offerte pour l'analyse d'échantillons de roche de Govindaraju and Mevelle. L'utilisation de l'AES pour l'analyse des roches a été réalisée sur des techniques couramment utilisées comme l'atomique spectrométrie d'absorption et spectrométrie de fluorescence X due au fait que l'instrument était capable de déterminer plusieurs éléments simultanément Knasmuller et al

(**S. Knasmuller, 1998**) ont également examiné métaux à savoir. Cu, Ni, Cr, Cd, Hg, S et As dans les sols contaminés (rizicole), Sols des terres agricoles et sol des plantes ont également

rapporté l'utilisation de cette technique pour analyser les sols des zones urbaines (résidentielles, commerciales et zones industrielles) et points chauds (régions volcaniques) pour Cd, Co, Cr, Cu, Ni. Ont utilisé la technique ICP-AES pour l'estimation de Pb, Zn, Arables et Pâturages (sols pollués) à proximité de Zone minière de Pb-Zn), à travers le monde ont utilisé des émissions atomiques à couplage inductif spectromètre pour estimer le contenu en métaux lourds con-mélanges de sols aminés de différentes régions (X. Li, S, 2004)

### II.2.1.3. Spectroscopie de masse à couplage inductif (ICP-MS)

La capacité de détection multi élémentaire des ultra-tracés la spectrométrie de masse à plasma à couplage actif (ICP-MS) Technique la plus puissante .Analyse de spéciation utilisant l'induction la spectrométrie de masse à plasma à couplage actif (ICPMS) est devenue pratique courante ces dernières années pour la détection ultra-sensible de composés contenant des oligo-métaux et des métalloïdes .C'était proéminent d'une enquête sur la littérature que cet instrument a été utilisé pour l'analyse industrielle des métaux, des produits chimiques et des matériaux de synthèse, Cette technique a remplacé d'autres techniques de spéciation comme spectrométrie optique, émission atomique à plasma à couplage inductif, la spectroscopie d'absorption atomique qui sont moins sensible et ne fournit pas de détection simultanée de plusieurs éléments la quantification de différents métaux lourds dans les mélanges de sol a été reconnu par divers chercheurs à travers le monde utilisant l'ICP-MS pour ses capacités analytiques uniques (Y.Kuang et al, 2013)

### II.2.1.4. Spectrométrie de fluorescence atomique (AFS)

Cette technique a été utilisée de nombreuses fois Des groupes de travailleurs, des techniques complémentaires qui peuvent leur permettre Sensibilité analytique plus élevée (AAS) pour l'analyse de divers produits chimiques (G.F.Kirkbright, 1971) Elle utilise pour Analyse des métaux lourds As, Hg, Cu, Zn, Pb, Cr

### II.2.1.5. Spectromètre à fluorescence X (XRF)

La spectroscopie de fluorescence X (XRF) est basée sur une relation de la physique fondamentale atome-rayonnement Interaction. C'est un outil d'analyse très sensible utilisé pour analyse des métaux lourds, également estimés métaux lourds Cu, Ni et Zn in sédiments sols de la zone agricole de Taïwan contaminé par les déchets la pollution des installations industrielles, telles que le galvano plastie, la métallurgie, textile, élevage, teinture pharmaceutique, chimie plantes, les séries et la fabrication du papier. Peu d'études ont examiné

l'utilité de cette technique d'estimation des métaux lourds dans les mélanges d'huiles (X. Chen et al, 2012)

### II.2.1.6. Analyse de l'activation des neutrons (NAA)

L'analyse par activation neutronique (ANA) est quantitative et qualitative le mécanisme de la NAA a été découvert en 1936 par Heves lorsqu'il a observé que les échantillons contenant certaines espèces rares les éléments terrestres sont devenus radioactifs lors de l'exposition à la source de neutrons.

NAA utilisé pour l'estimation de Fe, Ti, As, Sb, Zn, As, Au, Br, Co, Cr, Cu, Cd, Hg, Dy, Hf, In, Mn, Mo, Ni, Cd, Cu, Hg, In, Pb, Rb, Sb, Se, Sm, Sr, Tb, Th, U, V, W, Y et Z zone urbaine, zone industrielle, terres cultivables, terres incultivable, ville polluée de la région de Veles connue pour son plomb et son zinc activité industrielle Peu d'études scientifiques ont rapporté l'utilisation de cette technique d'analyse pour la détermination des métaux lourds dans le sol (D. De Soete et al, 1972)

### II.2.1.7. D.C. argon plasma spectromètre d'émission atomique multi élémentaire (DCP-MAES)

Il s'agit d'une méthode d'analyse validée pour la détermination de plusieurs éléments simultanément. Le système DCP-MAES offre des niveaux de sélectivité, de sensibilité, de rapidité et d'économie pour l'analyse de nombreux oligo-éléments déterminé la trace éléments dans l'eau naturelle utilisant D.C. Argon plasma multi élément spectromètre d'émission atomique. Holmgren et al. Estiment également Couplés Cd, Pb, Zn, Cu, et Ni dans des sols agricoles au moins 8km (G.W.Johnson et al, 1978)

### II.2.1.8. Spectromètre d'absorption atomique (AAS)

La spectrométrie d'absorption atomique (AAS) est la plus courante technique utilisée pour analyser les métaux et certains métalloïdes présents dans des matrices environnementales complexes. Siècle, quand dans les années 1950, Alan Wals et son équipe ont développé ce Technique de détermination d'une concentration particulière de métaux dans l'échantillon à tester. Cette technique chimique peut analyser 62 métaux différents en solution et s'est avéré être moins chronophage, précis et plus pratique que les autres techniques spectroscopiques pour les analyses élémentaires. (K. Szopka et al, 2013)

### II.2.1.9. Microscopie électronique à balayage à rayons X à dispersion d'énergie (SEM-EDX).

Bien que SEM-EDX soit une autre technique pour détecter les métaux lourds. Pourtant il est rarement autorisé ou utilisé pour détecter les métaux lourds ou rares les métaux de la terre dans la matrice du sol. Cependant, les minéraux riches en métaux lourds peuvent être identifiés par SEM-EDX à condition que toutes les sous-parties du sol contiennent uniformément la teneur en métaux lourds (**F. Scarciglia et al, 2011**)

Le sol peut être analysé avec SEM-EDX, il ne peut pas détecter l'élément, s'il est distribué de manière incohérente sur un pédoncule.

# *Chapitre III*

*Synthèse et évaluation des  
méthodes de télédétection  
pour l'étude de la  
contamination des métaux  
lourds dans le sol*

### III.1. Distributions spatiales des métaux lourds dans les sols

#### III.1.1. Distributions spatiales des métaux lourds

Le sol est non seulement une ressource naturelle importante, mais aussi un environnement dont dépendent les êtres humains. Avec le développement rapide de l'économie, les activités humaines telles que l'exploitation des ressources minérales, le traitement des métaux, la fusion, la production chimique, le drainage des usines et l'irrigation des eaux usées, la teneur en métaux lourds du sol a augmenté et a exercé une forte pression sur la production humaine, la vie et les ressources du sol (Xu et al, 2014, Yang et al, 2018) Une teneur excessive en métaux lourds dans le sol peut causer des dommages irréparables à la santé humaine. Par exemple, une exposition aiguë et chronique à l'As peut entraîner des troubles cardiovasculaires, tandis qu'un excès de Pb peut endommager le système nerveux central, provoquant des maux de tête, des insomnies et des pertes de mémoire (Castelli et al, 2005, Jiang et al, 2020) La pollution par les métaux lourds est exacerbée par les activités industrielles basées sur les métaux, et les métaux lourds peuvent pénétrer dans le corps humain par le biais d'aliments contaminés, inhalés dans l'atmosphère, bus par de l'eau contaminée, par contact cutané dans l'agriculture, etc.

La toxicité des métaux lourds peut augmenter l'incidence de nombreux cancers chez l'homme. Il est donc urgent de surveiller la teneur du sol en métaux lourds. À l'heure actuelle, la surveillance traditionnelle des métaux lourds dans le sol est une méthode d'analyse chimique, dont la précision d'observation est élevée, mais qui ne convient qu'aux zones locales à petite échelle. La surveillance à grande échelle de la teneur en métaux lourds des sols nécessite beaucoup de ressources humaines et matérielle (Kemper, T ; Sommer, S. 2002) La technologie de la télédétection présente les caractéristiques suivantes : vitesse de surveillance rapide, grande portée, cycle court, non-destructivité, etc. Elle permet de combler les lacunes des méthodes de surveillance traditionnelles et a été largement utilisée dans le domaine de la surveillance des sols Kemper et Sommer (2002) ont prédit la teneur de six métaux lourds à l'aide de modèles de régression linéaire multiple et de modèles de réseaux neuronaux artificiels. L'étude a prouvé la faisabilité de l'utilisation de modèles de régression linéaire multiple et de modèles de réseaux neuronaux artificiels pour établir des modèles météorologiques chimiques fiables, Luce et al. (2017) ont démontré qu'il était possible de prédire un degré plus faible de métaux lourds solubles dans l'eau dans le sol en utilisant le modèle partiel des moindres carrés (PLSR) en spectroscopie visible dans le proche infrarouge (Luce et al, 2017)

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

---

Les méthodes de régression univariable et d'analyse en composantes principales ont été utilisées pour prédire la concentration de Hg et le meilleur modèle ( $R = 0,69$ ,  $RMSE = 0,15$ ) a prouvé qu'il était possible de prédire le Hg dans l'agriculture par spectroscopie de réflexion (**Wu et al, 2005**)

Ont effectué une transformation différentielle, une correction de la ligne de base et d'autres prétraitements des données hyperspectrales pour établir un PLSR des éléments de métaux lourds et ont sélectionné le meilleur modèle pour inverser la teneur des éléments As, Fe et Cu (**Yang et al 2009**), Pyo et al. (2020) ont utilisé le CNN (réseau neuronal convolutif) pour prédire les concentrations de Cu et de Pb, et ont utilisé des données spectrales pour établir des modèles d'apprentissage automatique afin d'inverser les concentrations de métaux lourds (**Pyo et al, 2020**). Liu et al. (2019) ont établi le modèle PSO-BPNN pour inverser la teneur en éléments Cd, Hg et As, ce qui a considérablement amélioré la précision de prédiction du modèle d'inversion des métaux lourds, et a indiqué que les méthodes d'apprentissage automatique avaient un grand potentiel pour estimer avec précision la teneur en métaux lourds du sol (**Liu et al, 2019**) Choe et al. (2009) ont utilisé les métaux lourds pour établir des modèles de prédiction EMLR (stepwise multiple linear regression) et SMLR (enter multiple linear regression) basés sur la réponse spectrale des métaux lourds aux bandes visibles du proche infrarouge et ont prédit la possibilité des bandes visibles du proche infrarouge dans la prédiction de la distribution spatiale des métaux lourds (**Choe et al, 2009**). Shi et al. (2007) ont utilisé la méthode d'interpolation de Kriging pour décrire la distribution spatiale de six métaux lourds dans le comté de Changxing dans la province de Zhejiang, et ont évalué le risque de pollution par les métaux lourds (**Shi et al, 2009**). La cartographie de la distribution des concentrations de métaux lourds dans la zone d'étude permet une compréhension plus visuelle et plus détaillée de la distribution spatiale entre les concentrations de métaux lourds et les activités industrielles, ce qui peut être appliqué pour prévenir la contamination du sol et, dans certains cas, pour utiliser des micro-organismes afin de nettoyer le sol des métaux lourds et restaurer scientifiquement la santé du sol (**Rogozan G.C.; Micle, V.2009**)

#### III.1.2. Méthode du modèle

La méthode de régression partielle des moindres carrés a été utilisée pour établir la relation entre les spectres et les variables du sol, La méthode des moindres carrés partiels est la méthode la plus largement la plus utilisée dans la correction multivariée et est basée sur une

décomposition en variables latentes de deux blocs de variables, contenant les données spectrales et les variables du sol.

Le but de la méthode est d'identifier un petit nombre de facteurs latents qui peuvent être prédits et utilisés efficacement, Le modèle PLSR (partial least square regression) présente les avantages suivants de l'analyse des composantes principales, de l'analyse de corrélation typique et de la régression linéaire multivariée ordinaire, ce qui permet de surmonter les corrélations linéaires multiples entre les variables indépendantes et rend le modèle plus stable et plus efficace **(Zhang et al, 2010)**

Le BPNN (back propagation neural network) est un type de réseau neuronal artificiel. Il est basé sur l'algorithme de propagation inverse des erreurs. Le processus d'apprentissage se compose de la propagation en avant du signal d'entrée et de la propagation inverse de l'erreur. Le processus d'apprentissage comprend l'ajustement constant du poids de la connexion jusqu'à ce que l'erreur de sortie atteigne la norme requise **(Zhou, Z.H. 2004)** Pour construire le modèle, un réseau neuronal à 3 couches est utilisé, comprenant la couche d'entrée, la couche cachée et la couche de sortie ; la fonction de transfert Sigmoidale est utilisée pour les neurones de la couche cachée et la fonction Purelin est utilisée pour la couche de sortie. Dans ce document, les facteurs de modélisation sélectionnés précédemment ont été utilisés comme échantillons d'entrée d'apprentissage du modèle de réseau, et la teneur en métaux lourds correspondante a été utilisée comme la sortie attendue de la matrice d'apprentissage. En apprenant et en entraînant de manière répétée la correspondance entre les séquences d'entrée et de sortie, et en ajustant continuellement les couches d'entrée et cachées du modèle de réseau, la relation de cartographie entre la réflectance de la télédétection et la teneur en métaux lourds peut être établie **(Mouazen et al, 2010)**

#### III.1.3. Évaluation de la précision du modèle

Un total de 649 échantillons de sol ont été extraits aléatoirement de 971 échantillons de sol à une échelle de 2:1 comme ensembles de modélisation. Des modèles PLSR et BPNN ont été établis avec les métaux lourds cibles et les facteurs spectraux comme variables d'entrée du modèle. Comme indiqué dans le tableau 01, les résultats ont montré que pour l'ensemble de modélisation des éléments As basé sur le modèle PLSR, R était entre 0,431 et 0,462, et RMSE était entre 1,943 et 1,976 (voir tableau 1) ; l'ensemble de vérification était entre 0,498~0,526, et RMSE était entre 2,007 à 2,045. La différence de coefficient de corrélation basée sur la

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

modélisation originale de la bande et l'ajout du modèle de facteur NDVI n'était que de 0,001, ce qui était très faible : le facteur NDVI ne peut pas améliorer la précision de manière significative. Pour l'ensemble de modélisation de l'élément Hg, R était entre 0,257 et 0,268, et RMSE entre 0,062 et 0,066 ; l'ensemble de vérification était compris entre 0,149 et 0,161, et RMSE était compris entre 0,105 et 0,191. De même, le NDVI ne peut pas améliorer significativement la précision des éléments de mercure. Pour les modèles de prédiction PLSR des éléments As et Hg, les deux sont calculés logarithmiquement par les facteurs spectraux, comme variables d'entrée avec une plus grande précision du modèle que les bandes spectrales.

Le modèle de prédiction des métaux lourds métaux lourds cibles établi par les facteurs spectraux LnB1~LnB4 et le NDVI a eu la plus grande précision la plus élevée.

**Tableau III. 1:** Résultats de la régression partielle par les moindres carrés (PLSR) entre les concentrations de métaux lourds et les indicateurs de spectre

	Facteurs de modélisation	Ensemble de modélisation		Set de vérification	
		R	RMSE	R	RMSE
AS	B1–B4	0.431	1.976	0.502	2.045
	B1–B4 & NDVI	0.432	1.976	0.498	2.048
	LnB1–LnB4	0.460	1.945	0.524	2.009
	LnB1–LnB4 & NDVI	0.462	1.943	0.526	2.007
	B1–B4 & LnB1–LnB4	0.446	1.961	0.536	1.999
Hg	B1–B4	0.257	0.062	0.155	0.105
	B1–B4 & NDVI	0.263	0.062	0.149	0.125
	LnB1–LnB4	0.259	0.062	0.155	0.191
	LnB1–LnB4 & NDVI	0.268	0.066	0.161	0.105
	B1–B4 & LnB1–LnB4	0.260	0.062	0.152	0.105

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

Comme le montre le tableau 02, sur la base du modèle BP, pour l'ensemble de modélisation de l'As, R était compris entre 0,482 et 0,530, et RMSE était de 1,860~1,909 ; pour l'ensemble de vérification, R était de 0,467~0,532, et RMSE était de 1,999 à 2,094. Pour l'ensemble de modélisation de l'élément Hg, R était compris entre 0,263 et 0,318, et la RMSE était comprise entre 0,061 et 0,062 ; l'ensemble de vérification était compris entre 0,149 et 0,186, et la RMSE était comprise entre 0,105 et 0,288. Par rapport aux cinq modèles PLSR, la corrélation entre le modèle BP et la teneur en métaux lourds cible a été améliorée de manière correspondante, et la précision était relativement élevée.

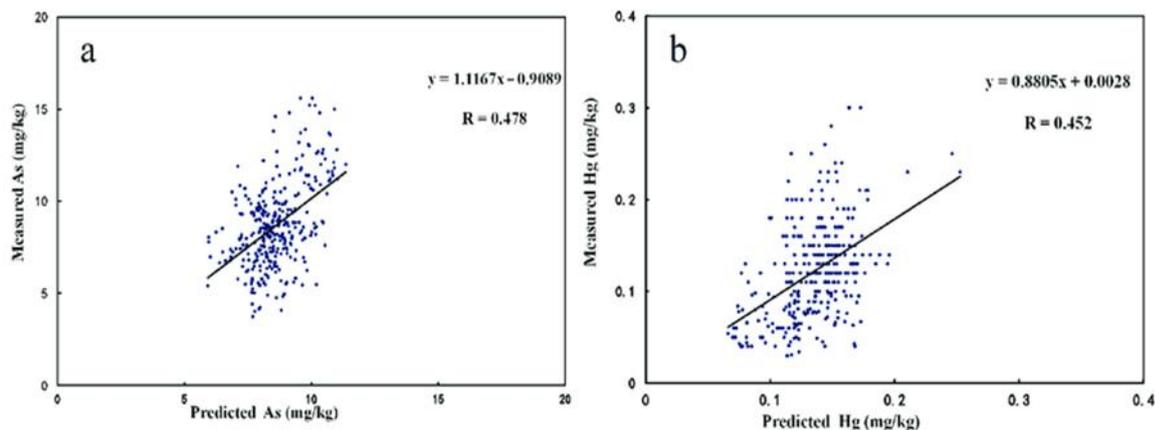
**Tableau III. 2:** Résultats du réseau neuronal à rétropropagation (BPNN) entre les concentrations de métaux lourds et les indicateurs de spectre.

	Facteurs de modélisation	Ensemble de modélisation		Set de vérification	
		R	RMSE	R	RMSE
As	B1–B4	0.530	1.860	0.507	2.048
	B1–B4 & NDVI	0.513	1.865	0.532	1.999
	LnB1–LnB4	0.519	1.874	0.467	2.079
	LnB1–LnB4 & NDVI	0.482	1.870	0.499	2.054
	B1–B4 & LnB1–LnB4	0.497	1.909	0.525	2.006
Hg	B1–B4	0.273	0.062	0.149	0.105
	B1–B4 & NDVI	0.318	0.062	0.177	0.105
	LnB1–LnB4	0.263	0.061	0.163	0.105
	LnB1–LnB4 & NDVI	0.269	0.062	0.156	0.288
	B1–B4 & LnB1–LnB4	0.292	0.061	0.186	0.105

Plus le coefficient de décision est grand et plus l'erreur quadratique moyenne est petite, plus le modèle est stable et précis. On peut conclure que le modèle ayant la plus grande précision

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

pour l'As était le modèle BP établi par le facteur spectral B1~B4,  $R = 0.530$  ; le modèle ayant la plus grande précision pour le Hg était le modèle BP basé sur B1~B4 et NDVI caractéristique spectrale,  $R = 0,318$ . Pour l'élément As, l'erreur relative de la modélisation était de 0,201, et pour l'élément Hg, l'erreur relative était de 0,498. Le modèle PLSR et le modèle BP peuvent établir le contenu métallique cible et le facteur de réflexion spectrale pour prédire le contenu métallique de la zone d'étude, Il peut être montré à partir des paramètres d'évaluation du modèle que la capacité de modélisation et de prédiction du modèle BP était élevée, et qu'il avait une bonne capacité d'interprétation des métaux lourds du sol cible. Sur la base de l'ensemble de vérification, les deux modèles ont été vérifiés avec précision. Le modèle a été inversé et la valeur prédite du métal lourd cible a été obtenue. Le diagramme de dispersion a été dessiné par les valeurs mesurées et prédites de l'ensemble de vérification. Comme le montre la figure 01 suivante, les éléments As étaient généralement distribués près de la ligne de tendance 1:1 (0,478), tandis que pour les éléments Hg, les distributions des valeurs mesurées et prédites étaient discrètes (0.452) par rapport à la distribution de l'élément As. Cela montre que le modèle de réseau neuronal BP avait une bonne capacité d'interprétation pour la valeur prédite des métaux lourds. Le modèle peut inverser et étudier la teneur en métaux lourds dans la zone cible



**Figure III. 1:** Comparaison de la valeur prédite par le modèle BP et des valeurs mesurées pour As (a) et Hg (b).

### III.2. Détection de la contamination des sols par les métaux lourds à l'aide de spectroradiométrie de terrain

La présente recherche a clairement mis en évidence le rôle potentiel de la combinaison des données hyperspectrales de terrain et de laboratoire avec les données géochimiques de Pb, Zn, Cu et Cd afin de quantifier et de modéliser la contamination par les métaux lourds en considérant

### **Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol**

---

un site de plaine inondable hautement contaminé du Pays de Galles dans l'ouest du Royaume-Uni. Les résultats confirment les hypothèses prédéfinies de l'étude :

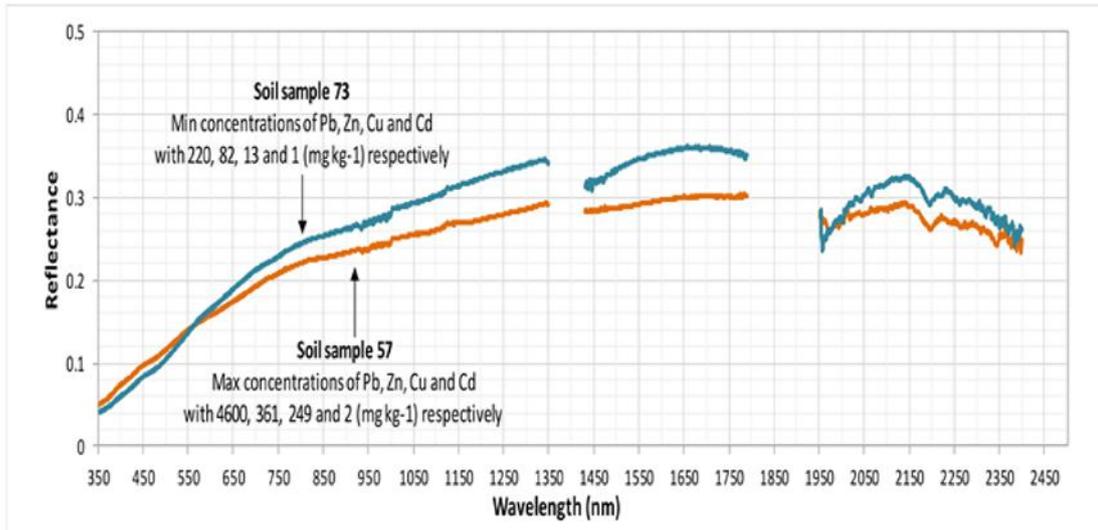
Premièrement, les signatures spectrales du sol présentent des différences dans des longueurs d'onde spécifiques du spectre, ce qui renforce leur discrimination spectrale ;

Deuxièmement, les concentrations de métaux lourds peuvent être récupérées à partir des données de réflectance spectrale avec une précision raisonnable, en utilisant un spectroradiomètre de terrain couvrant la plage spectrale de 350-2500 nm ; et troisièmement, les échantillons présentant les concentrations de métaux lourds les plus élevées auraient la réflectance la plus faible et la réflectance augmenterait avec la diminution des concentrations de métaux lourds.

#### **III.2.1. Statistiques descriptives du sol**

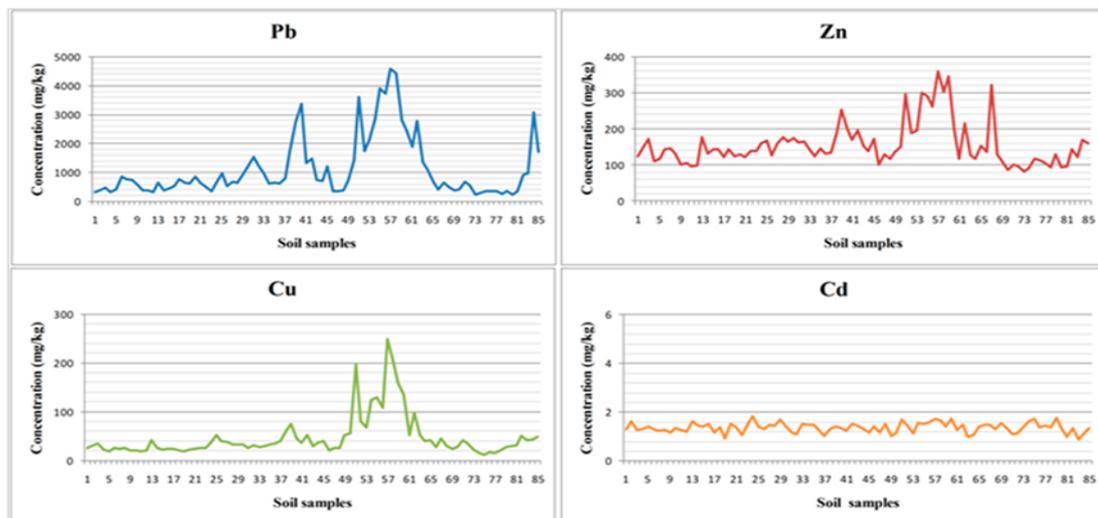
Pb, Zn, Cu et Cd sont les principaux métaux lourds dans la zone d'étude (**Yang et al, 2018**), ils ont donc été sélectionnés comme contaminants potentiels.

Les statistiques descriptives des analyses géochimiques sont résumées dans le tableau 1, L'écart-type (Stdev) du Pb et du Zn était très élevé (1037,96 et 59,85, respectivement), ce qui indique une grande variabilité spatiale de ces deux métaux et l'existence de " points chauds " (c'est-à-dire de petites zones localisées avec leur très forte concentration ; Figure 02). Les concentrations de Cu et surtout de Cd ont montré une magnitude et une variation plus faibles. Comme le Pb a été trouvé dans la plus haute concentration comparée aux autres métaux lourds, sa concentration pourrait être significativement responsable de la variation de la réflectance du sol.



**Figure III. 2:** Spectres moyens pour les échantillons de sol caractérisés par des concentrations faibles (échantillon 57) et élevées (échantillon 73) de métaux lourds sur le site d'étude

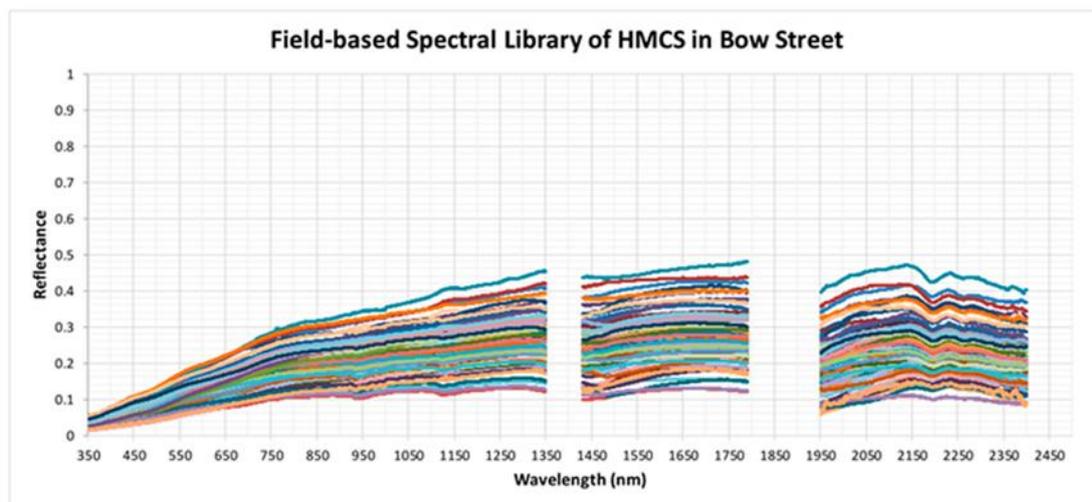
Figure III.2 ci-dessous tend à soutenir la troisième hypothèse en montrant une réflectance plus faible de l'échantillon de sol fortement contaminé (échantillon 57) par rapport à la réflectance de l'échantillon de sol faiblement contaminé (échantillon 73), bien que d'autres études soient nécessaires pour étayer davantage cette hypothèse. Ici, il peut être clairement noté que la réflectance était gouvernée par la concentration de métaux lourds dans chaque échantillon. Pour l'échantillon 57, qui avait la concentration maximale des quatre métaux lourds, la réflectance était plus basse que l'échantillon 73, qui avait la concentration minimale (Figure 03).



**Figure III. 3:** Variation moyenne ( $n = 85$ ) des concentrations des quatre métaux lourds trouvés sur le site d'étude.

### III.2.2. Développement de bibliothèques spectrales sur le terrain et en laboratoire

Les bibliothèques spectrales du sol sur le terrain et en laboratoire, composées de 85 spectres chacune, sont présentées respectivement sur la Figure 6 et la Figure 04. Dans l'ensemble, les spectres du sol ressemblent à la forme typique d'une augmentation dans le VIS et relativement constante dans le NIR et le SWIR, avec quelques creux locaux autour de 1400, 1900 et 2200 nm dus à l'absorption de l'eau et de l'argile. Cependant, une variation importante de la réflectance du sol pour les deux bibliothèques a pu être observée dans le NIR et surtout le SWIR, probablement en raison de la variation des propriétés du sol telles que l'humidité, l'argile et la teneur en matière organique, mais aussi en raison de la teneur en métaux lourds. Les deux bibliothèques spectrales enrichissent la base de données spectrale et peuvent servir de spectres de "référence" pour les sols contaminés par des métaux lourds au Royaume-Uni. Elles autorisent donc une validation appropriée des informations de réflectance extraites des données de radiance acquises à partir de plates-formes distantes et peuvent jouer un rôle important dans le suivi des changements temporels des spectres du sol sur les sites d'échantillonnage.



**Figure III. 4:** Bibliothèque spectrale sur le terrain de la contamination des sols par les métaux lourds (HMCS) sur le site de la rue Bow. Les régions spectrales liées à l'absorption de la vapeur d'eau (1350-1430, 1790-1950 et 2400-2500 nm) ont été supprimées

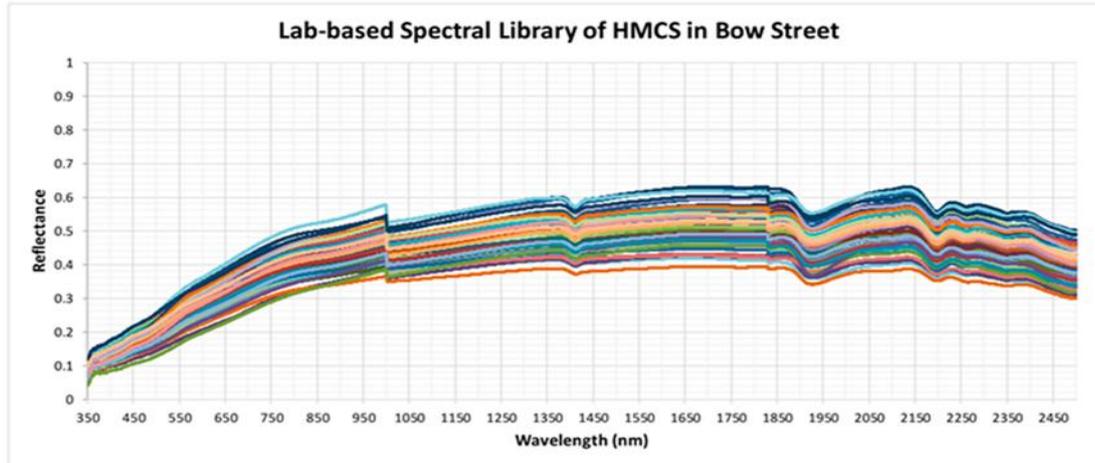


Figure III. 5: Bibliothèque spectrale en laboratoire de la contamination des sols par les métaux lourds (HMCS) sur le site de la rue Bow.

### III.2.3. Analyse de discrimination statistique

Les résultats de l'ANOVA sur la réflectance sans continuum à chaque longueur d'onde, de 350 à 2500 nm, sont présentés à la Figure 06 et à la Figure 07, pour les bibliothèques spectrales de terrain et de laboratoire, respectivement. Les résultats sont basés sur les spectres des sols dont le continuum a été supprimé et la ligne pointillée rouge sur les figures indique la valeur P critique (0,05), en dessous de laquelle des résultats statistiquement significatifs sont obtenus (en gris sur les figures, c'est-à-dire les régions spectrales qui contiennent au moins un spectre de sol significativement différent des autres).

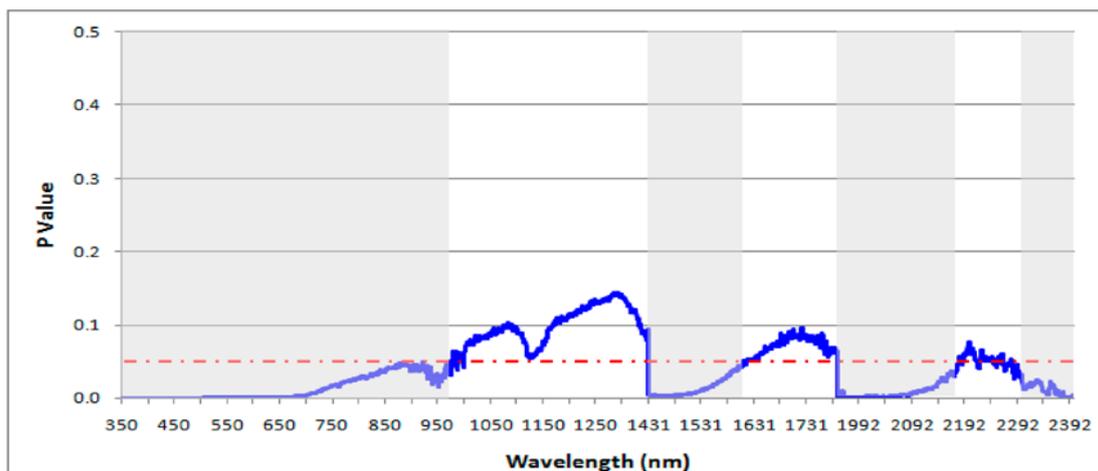
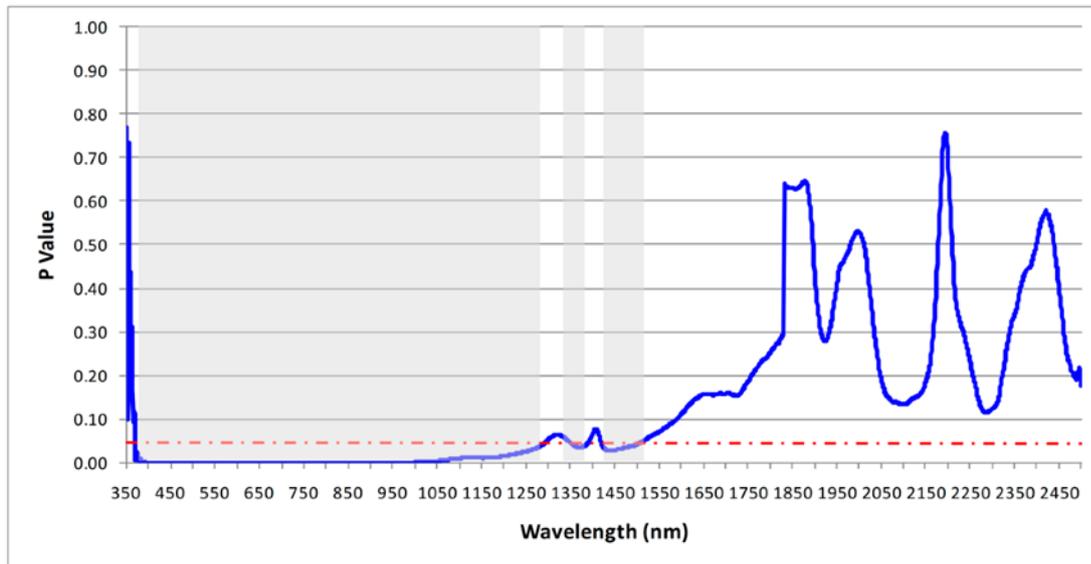


Figure III. 6: Les intervalles de longueur d'onde ombragés en gris indiquent les différences statistiquement significatives entre les spectres obtenus sur le terrain. La ligne pointillée rouge indique la limite de la signification statistique (niveau de confiance de 95%).



**Figure III. 7:** Les intervalles de longueur d'onde ombragés en gris indiquent les différences statistiquement significatives entre les spectres obtenus sur le terrain. La ligne pointillée rouge indique la limite de la signification statistique (niveau de confiance de 95 %).

Les résultats ont montré qu'il y avait des différences statistiquement significatives dans les spectres moyens de sol sur le terrain avec suppression du continuum dans la majeure partie du spectre VIS, de 350 à 800 nm, et des fenêtres plus étroites dans le NIR et le SWIR. Pour les spectres du sol obtenus en laboratoire, la majorité des résultats statistiquement significatifs ont été observés dans le VNIR, de 360 à 1270 nm, avec quelques fenêtres étroites à la fin du NIR. Pourtant, l'ANOVA ne peut pas réduire le nombre de longueurs d'onde à celles qui sont les plus influentes pour discriminer les sols, mais elle peut servir d'entrée pour une modélisation statistique plus poussée de l'HMSC.

### III.3. Évaluation des risques des métaux lourds dans les sols pour la santé

Les risques sanitaires des métaux lourds dans les sols pour la population par inhalation, contact cutané et ingestion de sol ont indiqué que les risques non cancérigènes et cancérigènes se situaient à un niveau inacceptable. Chaque voie d'exposition est plus élevée pour les adultes que pour les enfants, alors qu'il y a un risque de cancer relativement élevé pour les adultes que pour les enfants.

Risque de cancer relativement élevé pour les adultes que pour les enfants. Par conséquent, une attention accrue doit être accordée pour surveiller la pollution des sols par les métaux lourds dans les

zones de développement économique spectaculaire, par exemple dans le sud de la Chine on voit les résultats pour ces analyses.

### III.3.1. Risque pour la santé humaine

Le modèle d'évaluation des risques pour la santé humaine proposé par l'USEPA a été utilisé, qui est à la fois non cancérigène et cancérigène (USEPA, 1996 ; USEPA, 1997 ; USEPA, 2002) et il établit une relation entre les niveaux de contaminants dans l'environnement et la probabilité d'effets toxiques sur une population humaine.

Les personnes ont été soumis aux métaux lourds à partir du sol, principalement par contact par la peau, l'inhalation de particules de poussière, l'ingestion directement par le sol, et indirectement par la consommation de produits cultivés sur place (Jiang et al. 2017). Le risque d'exposition peut être calculé par dose journalière, avec différentes doses journalières pour chaque métal lourd le quotient de danger (QD) a été utilisé pour calculer l'impact des métaux lourds dans le sol sur le risque non cancérigène pour l'homme (Zhao et al, 2012).

La sommation du HQ sur plusieurs voies donne un indice de danger (HI) correspondant (USEPA, 2009 ; Zhao et al.2014). Le risque cancérigène (CR) a été utilisé pour estimer la probabilité supplémentaire d'une exposition personnelle à des dangers cancérigènes (Zhao et al. 2021). D'ailleurs, Le RC des trois voies différentes s'additionne pour former le risque total de cancer (RCT) total (TCR)

### III.3.2. Évaluation des risques sanitaires des métaux lourds dans les sols

Les risques pour la santé (risques non cancérigènes et cancérigènes) ont été calculés pour les adultes et les enfants à partir des métaux lourds présents dans les sols de ces sols de cette zone par différentes voies d'exposition, notamment le contact cutané, l'inhalation et l'ingestion.

Les valeurs de l'indice de danger total (THI) et du TCR ont été présentées dans la Figure 1. Leurs indices de risque cancérigène n'ont pas été évalués en raison de l'absence de valeurs SF correspondantes pour Hg, Pb, Cu, et Zn. Les valeurs du THI étaient de 2,63 et 2,09, le TCR de  $1,70E-03$  et  $1,63E-03$  pour les adultes et les enfants, respectivement. Lorsque  $1,00E-06 < CR \leq 1,00E-04$ , cela signifie que le risque est acceptable,  $CR > 1,00E-04$  signifie que le inacceptable, tandis que  $CR \leq 1,00E-06$  ne représente aucun risque significatif.

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

---

Tous les indices de danger (ID) sont supérieurs à 1, ce qui indique le potentiel d'effets non cancérogènes importants pour les risques de santé publique associés aux métaux lourds (**Ma et al. 2018**).

Valeurs HI et CR du Cd sont présentées dans la figure 1.

Les valeurs HI étaient de 2,54E-02 et 2,41E-02, le CR était de 3,56E-06 et 3,03E-06 pour les adultes et les enfants, respectivement les valeurs d'IC étaient dans l'ordre suivant : As > Pb > Cr > Cd > Ni > Cu > Hg > Zn Ni > Cu > Hg > Zn, ce qui montre que l'As est potentiellement très nocif pour la santé.

Les valeurs HI de l'exposition totale à l'As pour différents groupes de population (adultes et enfants) étaient de 1,52E+00 et 1,51E+00, ce qui indique que le public peut être exposé à des risques sanitaires non cancérogènes importants. Il est bien connu que l'As dans l'environnement ambiant a été principalement attribué aux activités industrielles. De plus, les risques non cancérogènes des métaux lourds dans cette zone étaient tous inférieurs à 1, sauf pour l'As. L'As a donné lieu aux valeurs les plus élevées de QD par voie cutanée pour les enfants et les adultes.

Les valeurs HQ supérieures à 1 suggéraient que l'As présentait le risque non cancérogène le plus élevé. Parmi le Ni, le Zn et le Cu, seul le Zn présente les plus faibles valeurs de QD par inhalation pour les enfants et les adultes.

Les valeurs de QD par inhalation les plus faibles pour les enfants (2,61E-06) et les adultes (1,91E-06) HINi et HICu pour les enfants et les adultes, basés sur les teneurs totales en métaux, étaient inférieurs aux seuils de sécurité. Contenu du métal étaient inférieurs aux niveaux de sécurité ( $HI \leq 1$ ) Les HQ pour tous les métaux lourds chez les humains exposés au sol ont diminué dans l'ordre suivant : contact cutané, ingestion et inhalation. Cela a suggéré que le contact cutané du sol était la voie d'exposition la plus importante, ce qui était en accord avec une étude récente (**Li et al. 2017 ; Li et al. 2020**).

D'après les facteurs de pente du cancer actuels de l'USEPA, l'As, le Ni, le Cr, et le Cd (en tenant compte de l'ingestion, des voies d'inhalation et de l'absorption cutanée) ont été estimés profondément.

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

Le CR envers les adultes et les enfants était dans l'ordre suivant : Ni > Cr > As > Cd, et l'absorption cutanée est plus élevée que l'ingestion et l'inhalation. Le CR par inhalation était inférieur à la valeur de référence

L'USEPA ( $1,00E-04$ ) (US EPA, 2002). Cependant, les résultats du CR pour un seul métal ont montré que l'exposition par ingestion était principalement attribuée au Cr, Ni et As, même supérieure au niveau acceptable. Le site CR du Cd ( $3,03E-06$  pour les enfants et  $3,56E-06$  pour les adultes) était généralement supérieur à  $1,00E-06$  (US EPA, 2002). Supérieur à  $1,00E-06$  (niveau acceptable), mais inférieur à  $1,00E-04$ , Ce qui implique que les risques cancérigènes peuvent être considérés comme acceptables.

Le CR total était plusieurs fois supérieur au niveau acceptable ( $1,00E-06 < CR \leq 1,00E-04$ ) atteignant  $1,70E-03$  pour les adultes et  $1,63E-03$  pour les enfants. Par conséquent, les personnes vivant dans la zone d'étude étaient probablement soumises à des risques cancérigènes plus élevés.

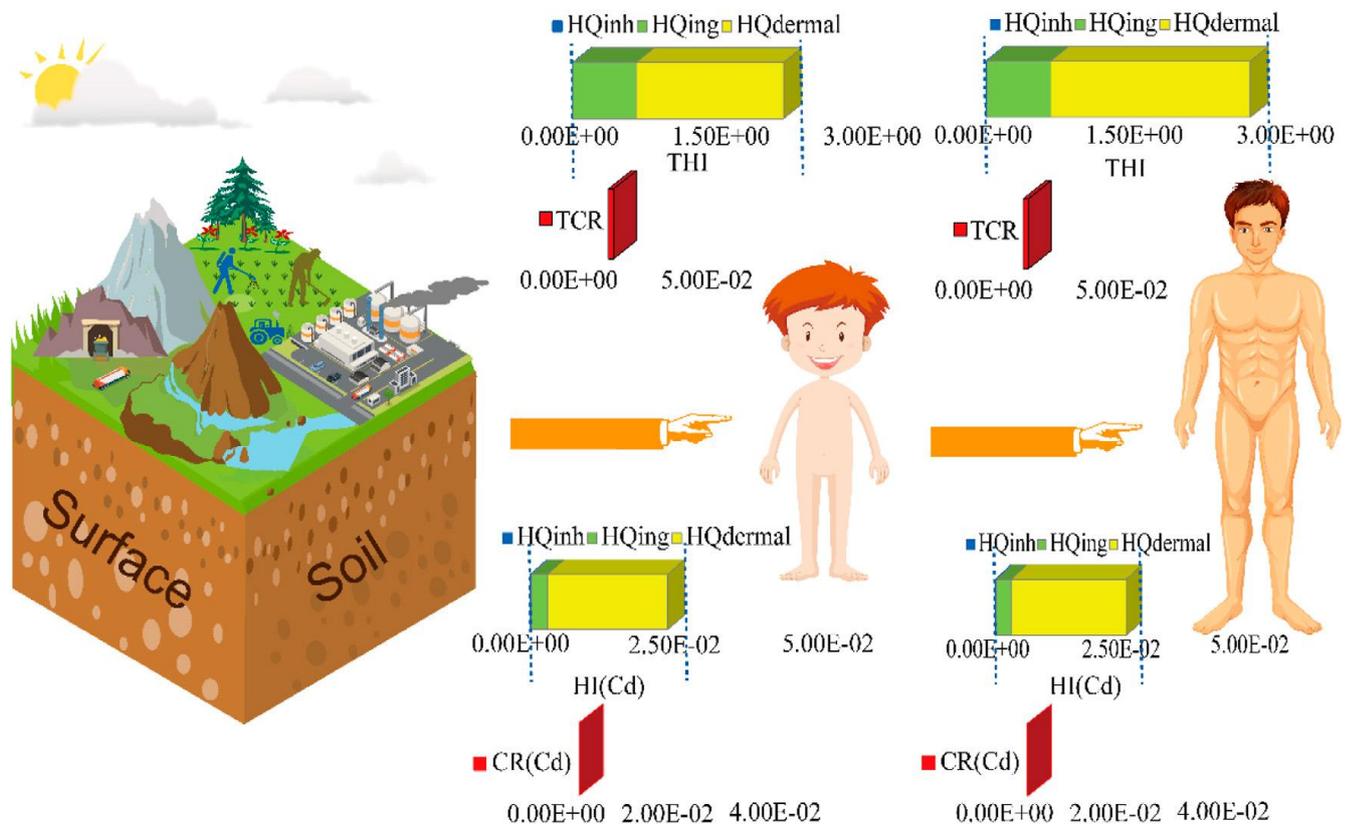


Figure III. 8: Les risques sanitaires des métaux lourds dans les sols de surface.

### III.4. Évaluation des risques écologiques des métaux lourds dans les sols

La problématique de gestion des sols contaminés par des métaux lourds, repose sur une diminution des risques et donc le plus souvent sur les moyens de bloquer les transferts entre la source polluante et les cibles potentielles. Une des voies de transfert est le mode éolien, notamment du fait de l'envol des particules fines dans des sols contaminés (**Biodisponibilité** : proportion d'une substance assimilable par un organisme vivant)

Ce transfert éolien peut également se faire sur des poussières présentes dans différents environnements, et notamment en milieu urbain où elles se rencontrent en grandes quantités du fait du transport routier (**Spéciation** : distribution d'un élément donné au sein des différentes espèces chimiques qu'il peut présenter en solution ou en phase solide)

Arriver à estimer à la fois les teneurs en métaux lourds présentes dans ces particules, mais également la spéciation de ces métaux au travers de la détermination des phases porteuses s'avère déterminant pour une meilleure gestion des risques associés et une aide à la décision pour les organismes gestionnaires (**Lu XW, Wang LJ, Huang J, et al. Hazard Mater 2009**). Les deux publications étudiant soit des poussières en milieu urbain, soit des fractions fines de sols contaminés s'inscrivent dans cette démarche en permettant d'accéder à des informations géochimiques primordiales. Et en conséquence, nous prendrons quelques résultats des expériences de même endroit sud de la chine.

#### III.4.1. Risque écologique potentiel

L'indice de risque écologique potentiel (RI), qui a été proposé par Håkanson (1980), a été utilisé pour évaluer l'état général de la pollution des sédiments. Pollution des sédiments et a été utilisé pour évaluer le risque écologique dans différents domaines de recherche des effets sur l'environnement en matière de toxicologie (**Wang et al. 2018**).

N est une valeur de référence pour un métal lourd correspondant donné, déterminé par la valeur de fond du métal dans le sol local.

Les valeurs de fond pour les métaux correspondants peuvent être obtenues dans des livres et des articles connexes (**CNEMC, 1990 ; Liu et al, 2020**).

### **III.4.2. Risque écologiques potentiels des métaux lourds dans les sols**

L'évaluation des risques écologiques potentiels a été réalisée en comparant les valeurs de fond régionales pertinentes des sols comme référence d'évaluation pour l'indice de risque écologique RI et le métal unique (Eir) L'IR pour Cr, Ni, Cu, Pb, et Zn dans les sols de surface a montré que le risque écologique n'était pas élevé. Les valeurs Eir pour le Cd dans les sols de surface variaient de 12,01 à 490,72, avec environ 69% des échantillons à haut risque. En outre, l'As a montré une large gamme de variations des valeurs Eir (4,83-101,03) dans les sols de surface, la plupart des échantillons présentant un risque écologique faible. Les valeurs Eir du Hg variaient de 3,31 à 208,12, où environ 2,8% des échantillons étaient considérés comme à haut risque, et 73,3% des échantillons présentaient un risque modéré à considérable.

Le Cd présentait également un risque élevé dans les 62 % de sols de subsurface, tandis que le risque écologique était faible pour le Cr, le Ni, le Cu, le Pb et le Zn ; l'Eir dérivant de l'As allé de 3,88 à 73,78, montrant un faible risque écologique.

Les résultats indiquent que les autres métaux sont probablement exempts de risques écologiques, à l'exception du Cd.

L'IR représente la sensibilité de divers biomes aux substances toxiques et démontre les risques écologiques que peuvent poser les métaux lourds. En termes de distribution spatiale de l'IR, les sites présentant des valeurs d'IR modérées ou considérables occupaient la plupart de la surface des sols de surface, tandis que les sites C03, C04, C05 et C06 présentaient des risques très élevés. D'autre part, par rapport aux sols de surface, des risques écologiques élevés ont été observés dans les zones C09 et C10 des sols de subsurface. Les valeurs de l'IR étaient associées au degré de perturbation anthropique et différaient de manière significative à travers les sites d'échantillonnage.

### **III.5. Le développement d'indices spectraux pour la quantification des métaux lourds**

La contamination des sols par les métaux lourds est un problème de plus en plus important dans le monde. Un accès rapide et fiable aux données de concentration de métaux lourds est crucial pour la surveillance et l'assainissement des sols. La spectroscopie de réflectance visible et proche infrarouge, qui est connue comme une technique non invasive, rentable et respectueuse de l'environnement, a un potentiel pour l'estimation simultanée des diverses concentrations de

métaux lourds dans le sol. De plus, il fournit une méthode alternative valable pour l'estimation des concentrations de métaux lourds sur de grandes surfaces et de longues périodes de temps d'ailleurs. Les technologies de télédétection peuvent rapidement conduire à des estimations spatialement explicites de la teneur en métaux lourds du sol et surveiller leur dynamique à l'échelle régionale à faible coût. Actuellement, étant donné que la réflectance spectrale du sol est une propriété cumulative qui découle des comportements spectraux inhérents à la combinaison hétérogène des propriétés physiques et chimiques du sol.

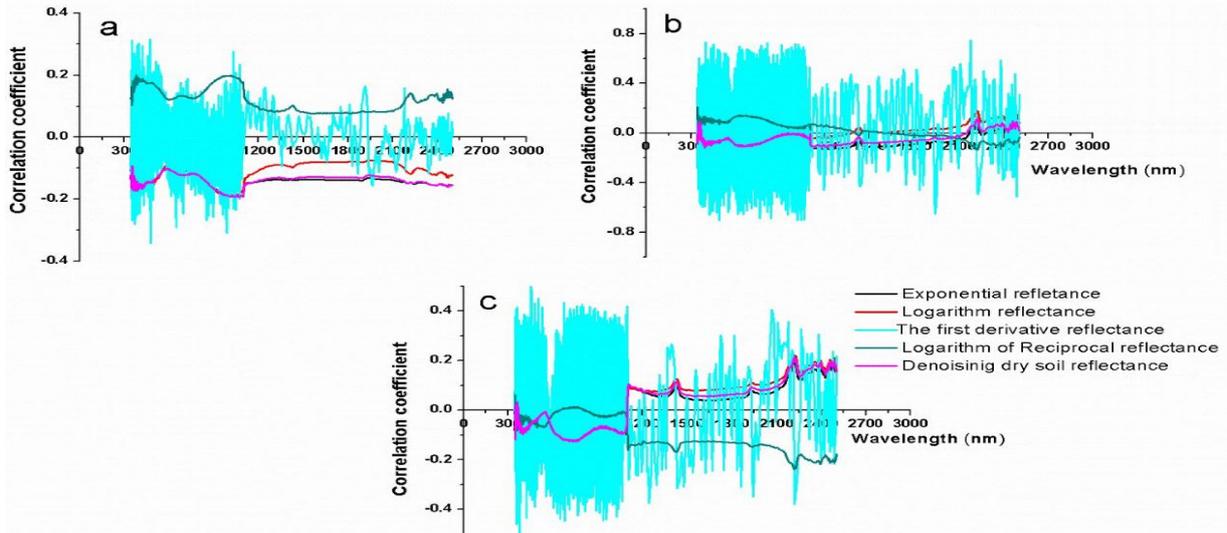
La spectroscopie hyperspectrale de réflectance dans le visible et le proche infrarouge (VNIR) couplée à des techniques de calibration a été développée pour prédire diverses propriétés du sol et sa teneur en métaux lourds.

#### **III.5.1. L'estimation de la teneur en métaux lourds**

L'estimation de la teneur en métaux lourds dans les sols à l'aide de données hyperspectrales est une méthode rentable mais difficile en raison des effets de la complexité des paysages et des propriétés des sols. L'un des défis consiste à rendre un modèle de laboratoire basé sur des échantillons de sol applicable à la cartographie des teneurs en métaux lourds dans le sol à l'aide d'images hyperspectrales aériennes ou spatiales à l'échelle régionale donc, un groupe dans la Chine, et le district de Conghua de la ville de Guangzhou a proposé une nouvelle étude utilisant des données hyperspectrales d'échantillons de sol et l'imageur hyperspectral (HSI) HuanJing-1A (HJ-1A).

##### **III.5.1.1. Sélection des indices spectraux du sol sec**

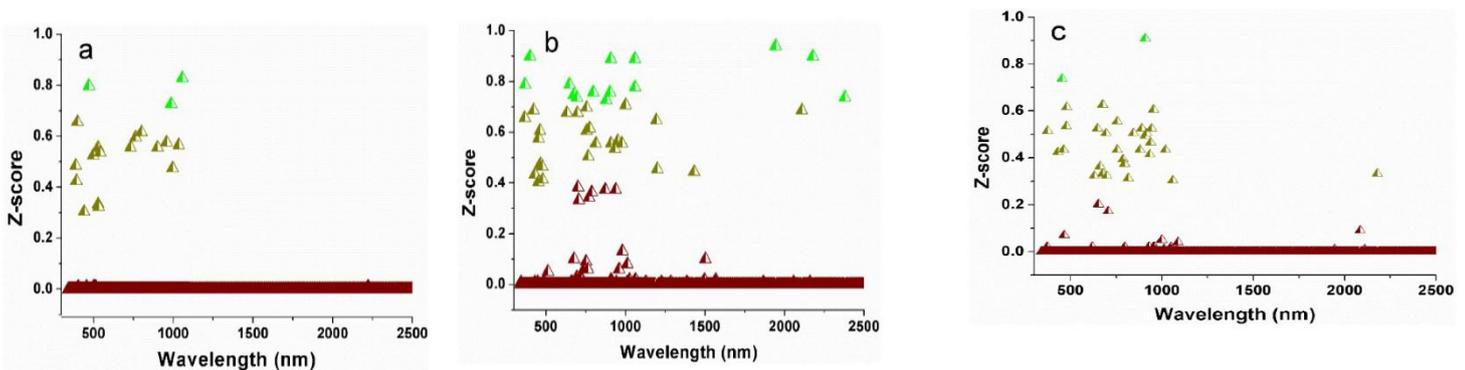
Les coefficients de corrélation de Pearson entre la teneur du sol en métaux lourds (As, Cd et Hg) et les indices spectraux, y compris les variables spectrales brutes débarrassées de leur bruit et les indices spectraux transformés, sont présentés dans la figure 5. L'analyse de corrélation a révélé que les transformations spectrales pouvaient mettre en évidence les caractéristiques de réflectance cachées dans les données de réflectance spectrale du sol par rapport aux variables spectrales brutes. Les indices spectraux FD avaient des corrélations plus élevées avec les trois teneurs en métaux lourds du sol que les autres indices spectraux. Par conséquent, les indices spectraux FD ont été sélectionnés comme variables spectrales dans cette étude.



**Figure III. 9:** Pearson correlation coefficients between the soil heavy metal content and spectral indices for (a) As; (b) Cd; and (c) Hg ( $p = 0.01$ ).

### III.5.1.2. Sélection des variables spectrales optimales pertinentes

Sur la base des indices spectraux FD, l'algorithme de Boruta a été appliqué pour identifier les variables spectrales pertinentes optimales pour la prédiction de la teneur en métaux lourds du sol (Hg, As, et Cd). Les Z-Scores importants de toutes les variables spectrales utilisées pour estimer les trois teneurs en métaux lourds du sol sont présentés dans la Figure 6, où le violet, le jaune et le vert représentent respectivement les variables spectrales non importantes, provisoires et importantes. Les trois groupes de variables spectrales pour chacune des trois teneurs en métaux lourds du sol ont été automatiquement créés et générés par l'algorithme de Boruta.



**Figure III. 10:** Scores Z montrant la capacité de prédiction des bandes spectrales individuelles de la première dérivée pour trois teneurs en métaux lourds du sol obtenues à l'aide de l'algorithme de Boruta, où les symboles verts, jaunes et violets représentent les variables spectrales importantes, provisoires et non importantes, respectivement, pour : (a) As ; (b) Cd ; et (c) Hg ( $p = 0,01$ ).

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

Dans la Figure III.10(a), sur la base des scores Z pour prédire la teneur en As du sol, trois variables spectrales, la bande 470 nm, la bande 987 nm et la bande 1056 nm, ont été confirmées comme étant importantes, 16 variables spectrales étaient provisoires et les 1543 autres variables spectrales ont été confirmées comme étant sans importance.

La figure III.10(b) montre que 15 variables spectrales, dont la bande 1000 nm, la bande 1059 nm, la bande 2379 nm, la bande 1943 nm et la bande 2178 nm, sont importantes pour le Cd, 30 variables spectrales sont provisoires et les 1522 autres variables spectrales sont sans importance.

La figure III.10(c) montre que seules deux variables spectrales, la bande 453 nm et la bande 907 nm, étaient importantes pour la prédiction du Hg du sol, 29 variables spectrales étaient provisoires et les 1536 autres attributs spectraux pouvaient être ignorés. Une régression par étapes avec analyse VIF a été utilisée pour éliminer la colinéarité entre les variables spectrales sélectionnées par l'algorithme de Boruta. Les variables spectrales optimales pertinentes qui en résultent pour les trois teneurs en métaux lourds du sol (As, Cd et Hg) sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III. 3:** Les variables spectrales pertinentes optimales pour l'estimation de trois teneurs en métaux lourds dans le sol.

Métauxlourds du sol	Variables spectrales de la première dérivée
As	FD 470 nm FD 987 nm FD 1056 nm
Cd	FD 1059 nm FD 2178 nm FD 2379 nm
Hg	FD 453 nm FD 907 nm

#### III.5.1.3. Modèles d'estimation de la teneur en métaux lourds du sol et évaluation de la précision

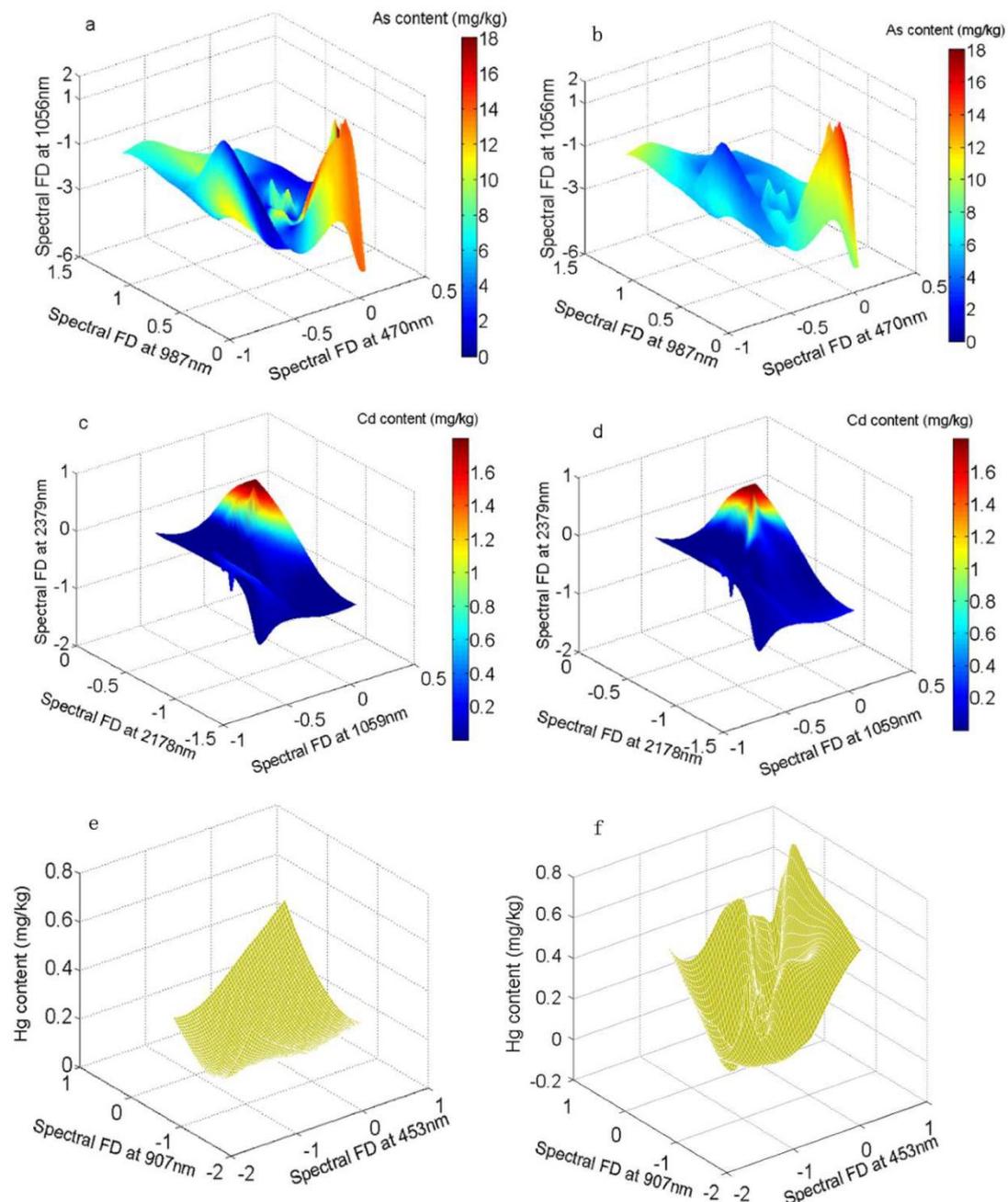
Les modèles d'estimation de la teneur en métaux lourds du sol ont été développés sur la base des variables spectrales FD sélectionnées à partir du DSSR. Pour améliorer la précision des modèles, la transformation exponentielle et logarithmique de la teneur originale en métaux lourds du sol a été effectuée. Les résultats montrent que les résultats de la transformation exponentielle des teneurs en Cd et Hg étaient plus corrélés avec les variables spectrales FD que la teneur en métaux lourds du sol original et leur transformation logarithmique. Pour l'As, la

### **Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol**

---

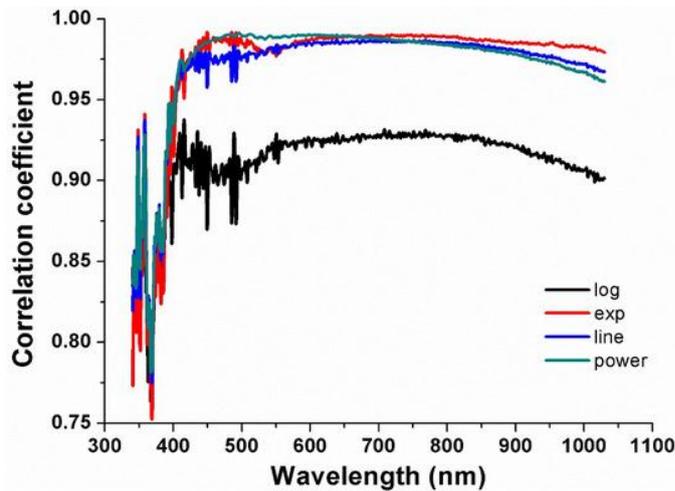
teneur en métaux lourds du sol original était plus corrélée avec les variables spectrales FD. Le modèle d'estimation de l'As a donc été construit en utilisant trois variables spectrales pertinentes optimales, FD 470 nm, FD 987 nm, et FD 1056 nm (Tableau 1).

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) a été défini comme le rapport de la somme des carrés dus à la régression, la somme totale des carrés étant de 0,91, 0,60, et 0,65 pour Cd, As, et Hg, respectivement, et donc le modèle d'estimation pour Cd était potentiellement plus fiable que les modèles pour Hg et As. Les estimations de la teneur en métaux lourds du sol provenant des modèles ont été comparées aux observations de terrain correspondantes des 65 échantillons de sol d'entraînement en générant leurs surfaces à l'aide d'une interpolation par spline cubique. De toute évidence, la surface de la teneur en Cd prédite était très proche de celle des mesures, tandis que de grandes différences entre les surfaces estimées et mesurées de l'As et de l'Hg ont été trouvées.

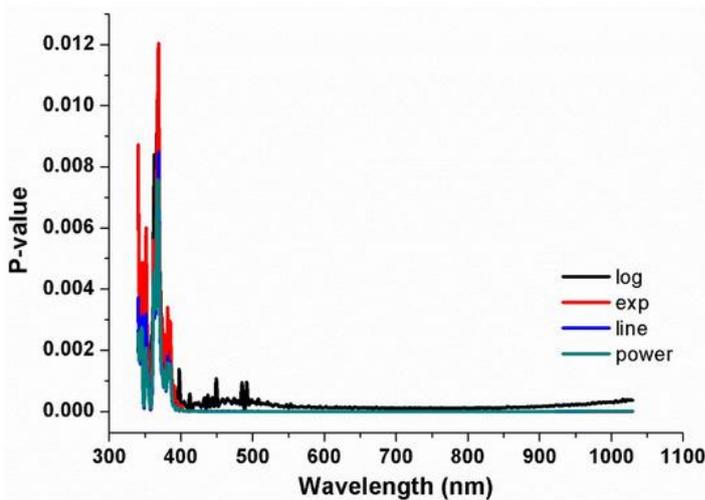


**Figure III. 11:** Comparaison de la teneur en métaux lourds du sol entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs mesurées sur le terrain en termes de surfaces par interpolation spline cubique basée sur : (a) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (b) valeurs prédites par le modèle pour As ; (c) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (d) valeurs prédites par le modèle pour Cd ; et (e) les données mesurées sur le terrain par rapport aux (f) valeurs prédites par le modèle pour Hg.

pour obtenir les valeurs MSSR, nous avons exploré la relation entre la teneur en humidité du sol et le rapport spectral (SR) de DSSR à MSSR en comparant un modèle linéaire, un modèle logarithmique, un modèle de puissance et un modèle exponentiel. Le coefficient de corrélation et le niveau de signification ont été utilisés pour sélectionner le meilleur modèle et les résultats sont présentés dans la Figure 4 et la Figure 5.



**Figure III. 12:** Les changements des coefficients de corrélation du rapport spectral avec la teneur en humidité du sol sur la longueur d'onde.



**Figure III. 13:** Les changements des valeurs p pour les corrélations du rapport spectral de DSSR à MSSR avec la teneur en humidité du sol sur la longueur d'onde.

### III.5.1.4. Modèles d'estimation des teneurs en métaux lourds

Le développement de modèles d'estimation des teneurs en métaux lourds du sol basés sur des données de réflectance spectrale d'échantillons de sol, puis leur application à la cartographie à l'échelle régionale basée sur des images hyperspectrales, c'est-à-dire la génération d'estimations spatiales explicites, est un processus complexe. Sa précision varie grandement en fonction de nombreux facteurs, notamment la complexité du paysage, le type de métaux lourds du sol et leur état/forme chimique, les conditions environnementales lorsque les mesures sont recueillies, les variables spectrales sélectionnées et utilisées pour élaborer les modèles, les résolutions spectrales et spatiales des données hyperspectrales, les méthodes de modélisation et la taille des échantillons.

Tout d'abord, les métaux purs n'absorbent pas les rayonnements VNIR et mid-IR. Lorsque les métaux lourds du sol possèdent des caractéristiques de réflectance et d'absorption, ils peuvent être estimés sur la base de leurs relations avec les caractéristiques spectrales (**Choe, E. et al .2008**), Les métaux lourds du sol à faible teneur sont souvent difficiles à estimer directement à l'aide des caractéristiques spectrales du sol. Cependant, les métaux lourds du sol, souvent absorbés ou liés, sont caractérisés par des constituants spectralement actifs en fonction des conditions environnementales, ce qui permet d'estimer leurs teneurs et de dériver leurs distributions spatiales en utilisant les variables spectrales des données de télédétection, en particulier les données hyperspectrales Des études précédentes ont montré la possibilité de prédire la teneur en métaux lourds du sol par réflectance spectroscopique (**Wang, F.; Gao, J.; Zha, Y.2018**). Cependant, la façon de sélectionner les variables spectrales qui contribuent de manière significative à la réduction des erreurs d'ajustement du modèle et à l'augmentation de la précision de l'estimation, mais qui ne sont pas corrélées entre elle, est d'une importance cruciale (**Zhang, X. ; Wen, J. Band, 2010**)

### III.5.2 Estimation de métaux lourds dans un sol agricole en utilisant Vis-NIR Spectroscopie

Avec le développement de l'industrialisation et de l'urbanisation, la contamination par les métaux lourds des sols agricoles tend à s'accumuler rapidement et à nuire à la santé humaine.

La spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge (Vis-NIR) permet de surveiller rapidement la variation des métaux lourds.

### **Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol**

---

Cette étude a exploré le potentiel de la dérivée d'ordre fractionnaire (FOD), de l'algorithme de combinaison optimale de bandes et de différents modèles mathématiques dans la surveillance des métaux lourds. Cette étude a exploré le potentiel de la dérivée d'ordre fractionnaire (FOD), de l'algorithme de combinaison optimale de bandes et de différents modèles mathématiques dans l'estimation des métaux lourds du sol avec la spectroscopie Vis-NIR, La contamination des sols a augmenté de manière significative dans le monde entier avec le développement rapide de l'industrialisation et de l'urbanisation (**Horta et al, 2015**). En raison de leur contamination cachée, persistante et irréversible, les métaux lourds sont parmi les types de contamination les plus dangereux qui menacent la santé des animaux et des êtres humains tout au long de la chaîne alimentaire (**Dong et al, 2018, Ali et al, 2020**)

Les métaux lourds du sol, en particulier le mercure (Hg), le chrome (Cr), le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et le cuivre (Cu), tendent à s'accumuler dans les sols en raison des activités anthropogéniques et de leurs propriétés de migration facile en tant que polluants industriels courants (**Fang et al, 2011 ; Shi et al, 2021**) Ainsi, il est crucial de surveiller de près la concentration de métaux lourds. Cependant, les mécanismes d'évolution des sols complexes et difficiles à comprendre (**Morellos et al, 2016**), et les propriétés du sol peuvent varier considérablement à petite échelle (**Xu et al, 2018**)

L'échantillonnage traditionnel sur le terrain s'accompagne toujours de la préparation des échantillons et d'une analyse chimique, ce qui est difficile à appliquer à grande échelle (**Liu et al, 2018**)

Autre solution, En raison de son faible coût et de son respect de l'environnement, l'analyse dans le visible et le proche infrarouge (Vis-NIR) peut être utilisée pour déterminer les propriétés du sol spectroscopie a été utilisée comme une alternative viable aux méthodes d'analyse en laboratoire pour l'évaluation de la qualité des sols (**Stenberg et al, 2010 ; Xu,X et al, 2020**)

#### **III.5.2.1. Réduction des caractéristiques spectrales**

Les données de spectroscopie Vis-NIR contiennent beaucoup d'informations redondantes lorsqu'il s'agit de prédire un certain élément métallique dans les sols (**Wang et al, 2018**) Pour éviter la situation de "désastre de dimensionnalité", éduction de la dimensionnalité et la combinaison optimale des bandes ont été largement utilisées pour prédire divers éléments dans les sols (**Jin, X et al, 2016 ; Hong et al, 2019 ; Wang et al, 2018**) Dans cette étude, cinq types

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

---

d'indice spectral à deux bandes sont utilisés pour explorer la combinaison de bandes appropriée pour Hg, Cr, et Cu. Les indices spectraux comprennent l'indice de rapport (RI), l'indice de différence normalisée (NDI), l'indice de différence (DI), l'indice de produit (PI) et l'indice de somme (SI).

Dans les analyses suivantes, les cinq indices spectraux ont été calculés dans l'ensemble de formation pour l'indice optimal. Calculés dans l'ensemble d'entraînement pour l'algorithme de combinaison optimale des bandes. En outre, les cinq indices spectraux ont été calculés à la fois dans l'ensemble d'entraînement et l'ensemble de validation comme l'entrée du modèle. Les détails du calcul des indices sont indiqués dans les cinq équations, Toutes les combinaisons de ont été calculées à partir de la longueur d'onde comprise entre 400 et 2400 nm.

Coefficients de corrélation avec différents éléments de métaux lourds ont également été obtenus. Pour certains métaux lourds la combinaison avec la plus grande valeur absolue du coefficient de corrélation a été sélectionnée comme l'indice optimal de l'indice spectral correspondant

$$RI (B_m, B_n) = B_m/B_n$$

$$DI (B_m, B_n) = B_m - B_n$$

$$NDI (B_m, B_n) = (B_m - B_n) / (B_m + B_n)$$

$$PI (B_m, B_n) = B_m * B_n$$

$$SI (B_m, B_n) = B_m + B_n$$

Où  $B_m$  et  $B_n$  sont les valeurs spectrales aux bandes  $m$  et  $n$  dans la gamme de 400-2400 nm, respectivement.

#### III.5.2.2. Les méthodes de modélisation

À titre de comparaison, quatre méthodes de modélisation (**PLSR**, **RF**, **GRNN**, **ANFIS**) utilisées pour développer des modèles d'estimation quantitative pour Hg, Cr, et Cu. La méthode PLSR intègre les caractéristiques de l'analyse des composantes principales, de l'analyse de la corrélation canonique et de l'analyse de régression linéaire.

En raison de cet avantage, la PLSR joue un rôle de plus en plus important dans l'analyse de la viscosité des sols du spectre Vis-NIR du sol (Dotto et al, 2018 ; Rossel,R.V, 2010)

Avant d'établir modèles, PLSR a effectué une décomposition en composantes principales de la matrice spectrale X et de la matrice de concentration Y, selon les équations suivantes la matrice de concentration Y, comme les équations :

$$X = TP + E$$

$$Y = UQ + F$$

Où T et P sont la matrice de notation et la matrice de chargement de X, respectivement ; U et Q sont la matrice de notation et la matrice de chargement de X, respectivement ; E est la matrice d'erreur de X et F est la matrice d'erreur de Y

Ensuite, une régression linéaire est établie pour T et U, selon l'équation suivante :  $U = TB$

#### III.5.2.3. Corrélation entre les métaux lourds et les indices spectraux optimaux

Afin de réduire les informations redondantes du spectre avec l'algorithme de combinaison de bandes optimale, le coefficient de corrélation entre la concentration en métaux lourds et les indices spectraux a été utilisé.

L'Hg est présenté à titre d'exemple dans les figures A1-A5. Lorsque l'ordre de FOD augmente, les coefficients de corrélation de tous les indices augmentent de manière significative et le modèle de distribution du coefficient de corrélation s'améliore,

Les bandes et les coefficients de corrélation des meilleurs indices spectraux pour différents spectres d'ordre fractionnel sont répertoriés dans les tableaux 2 à 4.

On constate que le schéma de corrélation entre les différents spectres d'ordre fractionnaire varie d'un cas à l'autre Pour trois métaux lourds meilleurs coefficients de corrélation sont obtenus avec un spectre d'ordre élevé (c'est-à-dire de l'ordre 1 à l'ordre 2). Par conséquent,

Les bandes optimales du spectre d'ordre élevé sont analysées statistiquement. Les longueurs d'onde à 1011 nm, 1173 nm, 1295 nm, 1710 nm, 1969 nm, et 2087 nm ont été sélectionnées par de multiples spectres d'ordre élevé.

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

Et sont donc particulièrement importantes pour l'estimation de l'Hg. Les longueurs d'onde 547 nm, 714 nm, 866 nm, 955 nm, 1137 nm, 2346 nm et 2342 nm ont été sélectionnées par des spectres d'ordre élevé multiples et sont donc particulièrement importantes pour l'estimation de l'Hg.

De multiples spectres d'ordre élevé et sont donc particulièrement importantes pour l'estimation du Cr, Les longueurs d'onde à 667 nm, 923 nm, 980 nm, 1015 nm, 1129 nm, et 1562 nm ont été sélectionnées par des spectres multiples d'ordre élevé et sont donc particulièrement importantes pour l'estimation du Cu

**Tableau III. 4:** Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour l'Hg.

Ordre des DOM	Indices spectraux optimaux	Coefficients de corrélation a
	RI475, 473,DI1279,1278,NDI475,473,PI1912,1912,SI1912,1912	0.34,0.36,0.34,0.21,0.20
0.2	RI1022,1021,DI1011,1010,NDI1022,1021,PI1904,1904,SI1905,1905	0.36,0.41,0.36,0.21,0.21
0.4	RI1683,1682,DI1012,1009,NDI1683,1682,PI1897,1891,SI1897,1891	0.40,0.43,0.40,0.22,0.22
0.6	RI1024,1018,DI1012,1008,NDI1024,1018,PI1407,1407,SI1407,1407	0.41,0.42,0.41,0.24,0.24
0.8	RI1374,2147,DI2147,1374,NDI2162,1902,PI2321,1364,SI2321,1370	0.43,0.43,0.57,0.36,0.36
1	RI1377,2286,DI2146,1375,NDI1583,1410,PI1364,475,SI1364,475	0.46,0.44,0.51,0.43,0.43
1.2	RI1961,1978,DI1841,1011,NDI1522,677,PI733,707,SI2139,1430	0.54,0.45,0.55,0.43,0.43
1.4	RI925,944,DI1642,1011,NDI1649,495,PI896,609,SI2255,1459	0.55,0.45,0.55,0.44,0.46
1.6	RI1683,1826,DI2138,1011,NDI2228,722,PI1710,1173,SI1710,1173	0.51,0.45,0.57,0.47,0.45
1.8	RI1022,1325,DI2087,1295,NDI1520,658,PI1969,1173,SI1710,1173	0.58,0.49,0.64,0.49,0.47
2	RI1396,1458,DI2087,1295,NDI2357,864,PI1969,1173,SI1710,1173	0.56,0.49,0.58,0.49,0.47

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

**Tableau III. 5:** Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour le Cr.

Ordre des DOM	Indices spectraux optimaux	Coefficients de corrélation a
0	RI2259,2262,DI955,954,NDI2262,2259,PI1008,1008,SI1020,1020	0.39,0.40,0.39,0.11,0.10
0.2	RI2258,2262,DI955,954,NDI2262,2258,PI955,955,SI979,979	0.39,0.39,0.39,0.11,0.11
0.4	RI2242,2266,DI1004,985,NDI2266,2242,PI955,955,SI955,955	0.41,0.41,0.41,0.12,0.12
0.6	RI841,849,DI849,841,NDI849,841,PI893,893,SI955,955	0.45,0.43,0.45,0.15,0.14
0.8	RI1211,1135,DI1211,1135,NDI1211,1135,PI2321,2319,SI2320,2320	0.47,0.46,0.47,0.27,0.26
1	RI464,2261,DI713,464,NDI2261,464,PI2089,955,SI955,2089	0.51,0.51,0.51,0.45,0.46
1.2	RI505,1368,DI1137,866,NDI1368,497,PI2259,2231,SI2346,2262	0.50,0.49,0.49,0.46,0.46
1.4	RI972,2390,DI1137,866,NDI1142,714,PI2334,843,SI866,813	0.47,0.49,0.46,0.46,0.48
1.6	RI2345,1847,DI2249,1312,NDI1047,714,PI2342,1831,SI2346,547	0.48,0.48,0.52,0.50,0.48
1.8	RI2228,2087,DI2152,693,NDI2224,955,PI2342,1565,SI2346,547	0.49,0.47,0.47,0.51,0.48
2	RI981,1821,DI814,626,NDI1629,1017,PI2342,1967,SI2346,547	0.48,0.46,0.51,0.50,0.47

**Tableau III. 6:** Les bandes et le coefficient de corrélation des indices spectraux optimaux pour le Cu.

Ordre des DOM	Indices spectraux optimaux	Coefficients de corrélation a
0	RI2261,2266,DI2266,2264,NDI2266,2261,PI998,403,SI403,998	0.44,0.39,0.44,0.08,0.01
0.2	RI980,979,DI980,979,NDI980,979,PI955,955,SI979,979	0.49,0.45,0.49,0.08,0.08
0.4	RI2245,2266,DI980,979,NDI2266,2245,PI939,939,SI939,939	0.49,0.46,0.49,0.09,0.10
0.6	RI2238,2263,DI2262,2227,NDI2263,2238,PI403,403,SI900,403	0.54,0.49,0.54,0.12,0.13
0.8	RI980,932,DI1106,1028,NDI980,932,PI2281,862,SI862,403	0.55,0.54,0.55,0.23,0.24
1	RI1084,890,DI1084,890,NDI1084,890,PI1779,1743,SI2347,2253	0.59,0.58,0.58,0.49,0.49

### Chapitre III Synthèse et évaluation des télédétection pour l'étude de la contamination des métaux lourds dans le sol

1.2	RI980,1093,DI2248,980,NDI2263,656,PI980,842,SI2300,980	0.57,0.56,0.60,0.59,0.56
1.4	RI667,1030,DI980,558,NDI667,631,PI2294,980,SI980,868	0.58,0.54,0.58,0.60,0.54
1.6	RI667,1628,DI1129,1015,NDI1428,1304,PI1562,667,SI693,564	0.58,0.54,0.59,0.62,0.53
1.8	RI2070,2103,DI1129,1015,NDI1047,544,PI1562,1554,SI923,667	0.59,0.53,0.62,0.61,0.52
2	RI667,1880,DI1129,1015,NDI1815,1616,PI1966,1936,SI923,667	0.57,0.52,0.58,0.68,0.55

Dans l'étude des dérivées spectrales, certains chercheurs ont rapporté que la dérivée première produisait une plus grande précision du modèle que la seconde dérivée lors de l'estimation des métaux lourds et de la matière organique du sol (**Chakraborty et al, 2018 ; Nawar et al, 2016**) Ce phénomène est lié au fait que la dérivée première peut améliorer les informations spectrales tout en maintenant la continuité et l'intégrité des continuités et l'intégrité de l'information spectrale, alors que la dérivée seconde introduit un bruit spectral supplémentaire (**Chakraborty et al, 2017 ; Gao et al, 2014 ; Khosravi et al ; 2018**) le spectre de la dérivée seconde fluctue trop fréquemment, ce qui indique que le spectre est trop faible. Indiquant que l'information spectrale était perturbée par le bruit spectral. Cependant, dans cette étude, la précision des modèles utilisant la dérivée première était similaire à ceux utilisant la dérivée seconde pour l'estimation du Cr et du Cu, et la précision des modèles utilisant la dérivée seconde était supérieure à celle modèles utilisant la dérivée seconde était supérieure à ceux utilisant la dérivée première pour l'estimation du Hg.

*Conclusion*

*Générale*

# Conclusion générale

---

## Conclusion général

Au cours de notre travail, nous avons eu comme objectif de faire une synthèse bibliographique sur l'application de la télédétection dans la connaissance des métaux lourds dans le sol à partir des résultats qui concluent dans la chine

Dans un premier temps nous avons conclus Distributions spatiales des métaux lourds dans les sols d'ailleurs que La loi de distribution des métaux lourds en valeur métaux lourds avait une relation élevée avec la distribution spatiale réelle des usines, ce qui suggère que les activités humaines étaient peut-être la source principale de métaux lourds

En conséquence La pollution des métaux lourds provenant de diverses activités industrielles a suscité des inquiétudes au niveau mondial ont été détectés pour étudier leur distribution spatial La répartition des sources et les risques ont été analysés à l'aide du système d'information géographique et d'une approche combinée donc Le site concentrations de Cd, As, Hg, Cu, Ni, Pb et Zn (à l'exception du Cr) étaient supérieures aux niveaux de fond pertinents tout en présentant différents degrés de pollution dans les sols de surface et de subsurface ;

Et en fin Les cartes prédictives peuvent être utilisées par les autorités environnementales et les gestionnaires des terres lors du choix des mesures de remédiation (préventives, protectrices et restauratrices) dans les paysages arides urbanisés et industrialisés, en fonction de la cause environnementale dominante. Les cartes peuvent être considérées comme des systèmes précieux d'aide à la décision (outils prédictifs) pour tous les types d'utilisateurs lorsque des technologies et des ensembles de données plus sophistiqués ne sont pas disponibles et que leur utilisation ne nécessite pas de compétences particulières. En outre, elles peuvent être appliquées à l'évaluation, la planification et la gestion des terres, ainsi qu'aux stratégies de protection de l'environnement.

Les précisions globales des modèles spatiaux peuvent être augmentées en : (i) en améliorant les échelles et les résolutions des paramètres environnementaux considérés pour mieux refléter la variation de la pollution des sols ou (ii) en ajoutant d'autres paramètres environnementaux, tels qu'une carte d'utilisation des sols ou des données climatiques et de végétation, si elles sont disponibles.

La poursuite du travail actuel repose sur le test de la capacité des images multi-spectrales à prédire d'autres métaux toxiques (cadmium, Cd, mercure, Hg, uranium, U) présents dans les paysages arides urbanisés et industrialisés. De plus, il sera intéressant de comparer l'utilisation

## Conclusion générale

---

d'images à plus haute résolution spatiale ou de tester la fusion d'images provenant de différents capteurs pour la modélisation spatiale.

*Références*

*bibliographies*

## Références bibliographiques

---

**Abbas Nassim**, Développement de modèles de fusion et de classification contextuelle d'images satellitaires par la théorie de l'évidence et la théorie du raisonnement plausible et paradoxal, USTHB.)

**Adriano d.c., 2001.** Trace elements in terrestrial environments: Biochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York

**Ait Ziane k, et Bouyahia N**, (cycle biogéochimique de quelques métaux lourds dans les eaux côtières du golfe Bejaia), mémoire de master environnement et santé publique, université Abderrahmane Mira de Bejaia (2013), p9.

**Ali, S.; Abbas, Z.;** Seleiman, M.F.; Rizwan, M.; Yava, S. I.; Alhammad, B.A.; Shami, A.; Hasanuzzaman, M.; Kalderis, D. Glycine Betaine Accumulation, Significance and Interests for Heavy Metal Tolerance in Plants. *Plants* 2020, 9, 896.

**B.J. Alloway and A.P. Jackson.** The Behaviour Of Heavy Metals In Sewage Sludgeamended Soils, *J. Sci. Total Environ.* 100 1991 ,151-76.

**Bachari Nour-El-Islam, Lamine Salim, and Meharrar.Khaled, 2021.** Geometric-Optical Modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function for Trees and Forest Stands. In: Prem C. Pandey, Laxmi K. Sharma. *Advances in Remote Sensing for Natural Resource Monitoring.* WILEY 2021: <https://doi.org/10.1002/9781119616016.ch3>

**Baize, d. (1997)** - Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France). Paris : INRA, 401p.

**Behanzin g. J., adjoue.s., yessoufoua.g., dahouenona.e. et SEZAN A., 2014.** Effet des sels de métaux lourds (chlorure de Cobalt et chlorure de Mercure) sur l'activité des hépatocytes, *Journal Applied Biosciences*, Vol 83, pp 7499-7505.

**Belabed B**, « la pollution par les métaux lourds dans la région d'Annaba (sources de contamination des écosystèmes aquatiques) » Thèse de doctorat en Biologie et physiologie des organismes Marins, Université Badji Mokhtar – Annaba. (2010), p7.

**Ben Saha S**, « la décontamination des eaux usées sur un support naturel ». Mémoire de magister en chimie, univ Abou bekrBelkaid- Tlemcen, (2010). P15

**Bert v., deram a. (1999)**, Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternatif.

**Bliefert, C ; Perraud,R. 2001.** Chimie de l'environnement air, eau, sol, déchets. De boeck édition. P 369-389.

## Références bibliographiques

---

**Boulaine, J.** Histoire Des Pédologues Et De La Science Du Sol. Ed. INRA. 285 P. 1989

**Bourelrier, p. h. berthelin, j.** « Contamination Des Sols Par Les Eléments En Traces : Les Risques Et Leur Gestion ». Rapport N°42 A l'Académie Des Sciences. Paris, France : Lavoisier Tec & Doc, P440. 2008

**Brossier r. et lummaux j-c. ,1979**

**Calvet, R.** Le Sol : Propriétés Et Fonctions. Tome 1 : Constitution Et Structure, Phénomènes Aux Interfaces. Ed. France Agricole. 456 P. 2003

**Calvet, R.** Le Sol : Propriétés Et Fonctions. Tome 1 : Constitution Et Structure, Phénomènes Aux Interfaces. Ed. France Agricole. 456 P. 2003

**Capot-Rey Robert.** Les sols d'Algérie d'après Mr J. H. Durand. In :Annales de Géographie, t. 64, n°341, 1955. pp. 56-58 ;

**Castelli, M.; Rossi, B.; Corsetti, F.; Mantovani, A.; Spera, G.; Lubrano, C.; Silvestroni, L.; Patriarca, M.; Chiodo, F.; Menditto, A.** Levels of cadmium and lead in blood: An application of validated methods in a group of patients with endocrine/metabolic disorders from the Rome area. *Microchem. J.* 2005, 79, 349–355.

**Chakraborty, S.; Weindorf, D.C.; Deb, S.; Li, B.; Paul, S.; Choudhury, A.; Ray, D.P.** Rapid assessment of regional soil arsenic pollution risk via diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 2017, 289, 72–81.

**Choe, E.; Kim, K.-W.; Bang, S.; Yoon, I.-H.; Lee, K.-Y.** Qualitative analysis and mapping of heavy metals in an abandoned Au–Ag mine area using NIR spectroscopy. *Environ. Earth Sci.* 2009, 58, 477–482

**Choe, E.; van derMeer, F.; van Ruitenbeek, F.; van derWerff,H.; de Smeth, B.; Kim, K.W.** Mapping of heavymetal pollution in streamsediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilarmining area, SE Spain. *Remote Sens. Environ* (2008) 112, 3222–3233.

**CNEMC (China National Environmental Monitoring Centre) (1990).** The Backgrounds of Soil Environment in China. Beijing, China: China Environmental Science Press.

Colinet G. 2003, Eléments traces métalliques dans les sols : Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge, These de Gembloux.

**D. De Soete, R. Gijbels, J. Hoste,** Neutron Activation Analysis, John Wiley and Sons, New York, NY, 1972.

## Références bibliographiques

---

**Deng Khidir Abdalla Kwal, Lamine Salim, Pavlides Andrew, Petropoulos George P., Srivastava Prashant K., Yansong Bao, Hristopoulos Dionissios, Anagnostopoulos Vasileios.** Operational Soil Moisture from ASCAT in Support of Water Resources Management. MDPI. *Remote Sensing 2019a*, 11(5), 579: 1-25 <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/5/579>

**Deng Khidir Abdalla Kwal, Lamine Salim, Pavlides Andrew, Petropoulos George P., Bao Yansong, Srivastava Prashant K., Guan Yuanhong.** Large Scale Operational Soil Moisture Mapping from Passive MW Radiometry: SMOS product evaluation in Europe & USA. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation - Elsevier*, 2019b, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.015>

**DIKE VICTOR NNAMDI, ADDI MARTIN, ANDANG'O HEZRONAWITI, ATTIGBAHARFATEN, BARIMALALA RONDROTIANA, DU PLESSIS, MARCEL, LAMINE SALIM, MONGWE N. PRECIOUS, ZAROUG MAH10, OCHANDA, K.VALENTINE, DIASSO ULRICH JACQUES.** 2018. Obstacles facing Africa's young climate scientists. *Nature Climate Change*. Volume 8, pages 447–449 (2018). <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0178-x>

**Dong, W.Q.Y.; Cui, Y.; Liu, X.** Instances of soil and crop heavy metal contamination in China. *Soil Sediment Contam.* 2001, 10,497–510.

**Dotto, A.C.; Dalmolin, R.S.D.; ten Caten, A.; Grunwald, S.** A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma* 2018, 314, 262–274.

**Duchaufour, P.** *Abrégés De Pédologie*. Ed. Masson. Paris, 220 P. 1984

**Duchaufour, P.** *Abrégés De Pédologie*. Ed. Masson. Paris, 220 P. 1984

**Evans Aaron; Lamine Salim; Kalivas Dionissios; Petropoulos George.** Exploring the Potential of EO data and GIS For Ecosystem Health Modelling in Response to Wildfire: a case Study In Central Greece, *Environmental Engineering and Management Journal, September 2018, vol.17, No. 9, 2165-2178.* <http://www.eemj.eu/index.php/EEMJ/article/view/3679>

**F. Scarciglia, D. Barca,** *Geophys. Res. Abstr.* 13 (2011) 1627.

**Fang, F.; Wang, H.; Lin, Y.** Spatial distribution, bioavailability, and health risk assessment of soil Hg in Wuhu urban area, China. *Environ. Monit.* 2011, 179, 255–265.

File:Algeria\_soil.png | frame | Carte du sol de l'Algérie, du Centre Joint de Recherche de la Commission Européenne : Portail Européen du Sol, 2019

**Foulds, S.A.; Brewer, P.A.; Macklin, M.G.; Haresign, W.; Betson, R.E.; Rassner, S.M.E.** Flood-related contamination in catchments affected by historical metal mining: An unexpected and emerging hazard of climate change. *Sci. Total Environ.* 2014, 476, 165–180.

**G.F.Kirkbright,** *Analyst*96 (1971)610–623.

## Références bibliographiques

---

**G.H. Morrison, Y. Talmi**, Anal. Chem. 42 (1970) 809

**G.W.Johnson, H.E.Taylor., R.K.Skogerboe**, Spectrochimica 34 (1978)

**Gao, Y.; Cui, L.; Lei, B.; Zhai, Y.; Shi, T.; Wang, J.; Chen, Y.; He, H.; Wu, G.** Estimating soil organic carbon content with visible-near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy. Appl. Spectrosc. 2014, 68, 712–722.

**Ge, et al, 2000** ; Hund-Rinke et Kördel, 2003 ; Peakall et Burger, 2003 ; Peijnenburg

**Gerardm. 2000** - les effets des métaux lourds sur l'environnement et la sante. Rapport : 365 p.

Glossary of Soil Science Terms. Ed. Soil Science Society of America. Am. J. Potato Res. 42, 346. 1965

**Hillel, D.** Introduction to Soil Physics. Ed. Academic Press. New York, USA, 364P. 1982

**Hong, Y.; Liu, Y.; Chen, Y.; Liu, Y.; Yu, L.; Liu, Y.; Cheng, H.** Application of fractional-order derivative in the quantitative estimation of soil organic matter content through visible and near-infrared spectroscopy. Geoderma 2019, 337, 758–769.

**Horta, A.; Malone, B.; Stockmann, U.; Minasny, B.; Bishop, T.; McBratney, A.; Pallasser, R.; Pozza, L.** Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. Geoderma 2015, 241, 180–209.

Http : //www.mediadico.com/dictionnaire/téledetection.html, 2010.

Https://Www.Soils.Org/Publications/Soils-Glossary

**Huynh, Th.2009**, impact des métaux lourds sur l'interaction plante /ver de terre/ microflore tellurique thèse de doctorat en écologie microbienne, univ Paris Est, pp 8-9.

**Jiang, H.-H.; Cai, L.-M.; Wen, H.-H.; Hu, G.-C.; Chen, L.-G.; Luo, J.** An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals. Sci. Total Environ. 2020, 701, 134466

**Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., et al. (2017).** Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil for a Township in Jiangsu Province, China. Chemosphere 168, 1658–1668. Doi: 10 1016/j.chemosphere.2016.11.088

**Jin, X.; Du, J.; Liu, H.; Wang, Z.; Song, K.** Remote estimation of soil organic matter content in the Sanjiang Plain, Northeast China: The optimal band algorithm versus the GRA-ANN model. Agric. For. Meteorol. 2016, 218, 250–260

**Juste C. (1988)**, « Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol », Science du sol, Vol. 26, n°2, pp. 103-112.

## Références bibliographiques

---

K. Szopka, A.Karczewska,P.Jezierski,C.Kabala, *Geoderma*192(2013) 259–268.

**KABATA-PENDIAS A., et PENDIAS H., 2001.** Trace elements in soils and plants. Third CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.

**Kadem, D.E.D.2005,** Evaluation et comportement des métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn et Mn) dans les soles à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique, (El Hadjar –Annaba –Est Algérien), influence de la végétation sur la dynamique des métaux, thèse de doctorat en Ecologie, Université Mentouri Constantine, pp 9-19.

**Kemper, T.; Sommer, S.** Estimate of Heavy Metal Contamination in Soils after a Mining Accident Using Reflectance Spectroscopy.*Environ. Sci. Technol.* 2002, 36, 2742–2747.

**Khosravi, V.; Ardejani, F.D.; Yousefi, S.; Aryafar, A.** Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods. *Geoderma* 2018, 318, 29–41.

**Kribi S,** « décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage ». Thèse de doctorat en science et technique du déchet, institut national des sciences appliquées de lyon. (2005).

**Lamine Salim, George P. Petropoulos, Paul A. Brewer, Prashant K. Srivastava, Nour-El-islam Bachari, Kiril Manevski, Chariton Kalaitzidis & Mark G. Macklin.** Heavy Metal Soil Contamination Detection Using Combined Geochemistry and Field Spectroradiometry in the United Kingdom. *MDPI. Sensors* 2019, 19(4), 762: <https://doi.org/10.3390/s19040762>

**Lamine Salim, Manish Kumar Pandey, George P. Petropoulos, Paul A. Brewer, Prashant K. Srivastava, Kiril Manevski, Leonidas Toullos, Nour-El-Islam Bachari, and Mark G. Macklin.** Spectroradiometry as a tool for monitoring soil contamination by heavy metals in a floodplain site. In: Prashant K. Srivastava, Prem Chandra Pandey, Heiko Balzter, Bimal Bhattacharya, George Petropoulos. *Hyperspectral remote sensing: theory and applications.* Elsevier 2020. Section IV, chapter 13, 249-268.

**Lamine Salim; Petropoulos George P.; Singh Sudhir Kumar; Szabó Szilárd; Bachari Nour-el-islam; Srivastava Prashant K.; Suman Swati.** Quantifying Land Use/Land Cover Spatio-Temporal Landscape Pattern Dynamics From Hyperion Using SVMs Classifier and FRAGSTATS®, *Geocarto International*, 2018, 33 (8), 862-878. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2017.1307460>

**Lamine, Salim, and Ian Saunders. 2022.** "Phytoremediation of Heavy-Metals-Contaminated Soils: A Short-Term Trial Involving Two Willow Species from Gloucester WillowBank in the UK" *Minerals* 12, no. 5: 519. <https://doi.org/10.3390/min12050519>

## Références bibliographiques

---

**Legros, J.P.** Les Grands Sols Du Monde. Ed. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes. Lausanne, 574 P. 2007.

**Li, H.-H., Chen, L.-J., Yu, L., Guo, Z.-B., Shan, C.-Q., Lin, J.-Q., et al. (2017).** Pollution Characteristics and Risk Assessment of Human Exposure to Oral Bioaccessibility of Heavy Metals via Urban Street Dusts from Different Functional Areas in Chengdu, China. *Sci. Total Environ.* 586, 1076–1084. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.

**Li, Y., Yuan, Y., Sun, C., Sun, T., Liu, X., Li, J., et al. (2020).** Heavy Metals in Soil of an Urban Industrial Zone in a metropolis: Risk Assessment and Source Apportionment. *Stoch Environ. Res. Risk Assess.* 34 (2), 435–446. Doi: 10.1007/s00477-020-01779-z

**Lilesadetkiefner, 1987**

**Liu, J.; Zhang, Y.; Wang, H.; Du, Y.** Study on the prediction of soil heavy metal elements content based on visible near-infrared spectroscopy. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2018, 199, 43–49.

**Liu, P.; Liu, Z.; Hu, Y.; Shi, Z.; Pan, Y.; Wang, L.; Wang, G.** Integrating a Hybrid Back Propagation Neural Network and Particle Swarm Optimization for Estimating Soil Heavy Metal Contents Using Hyperspectral Data. *Sustainability* 2019, 11, 419.

**Loue A.1993.** obligéoléments en agriculture, Edition Nathan, 557 p

**Lu XW, Wang LJ, Huang J, et al.** Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *J Hazard Mater* 2009.

**Luce, M.S.; Ziadi, N.; Gagnon, B.; Karam, A.** Visible near infrared reflectance spectroscopy prediction of soil heavy metal concentrations in paper mill biosolid- and liming by-product-amended agricultural soils. *Geoderma* 2017.

**Luo, X.-s., Yu, S., Zhu, Y.-g., and Li, X.-d. (2012).** Trace Metal Contamination in Urban Soils of China. *Sci. Total Environ.* 421-422, 17–30. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.04.020

**M`US\_erreff`urkmen.** Digital image processing of remotely sensed oceanographic data, august 2008

**Ma, W., Tai, L., Qiao, Z., Zhong, L., Wang, Z., Fu, K., et al. (2018).** Contamination Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil around Municipal Solid Waste Incinerator: A Case Study in North China. *Sci. Total Environ.* 631-632, 348–357. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.011

**Morellos, A.; Pantazi, X.-E.; Moshou, D.; Alexandridis, T.; Whetton, R.; Tziotzios, G.; Wiebensohn, J.; Bill, R.; Mouazen, A.M.** Machine learning based prediction of soil total

## Références bibliographiques

---

nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. *Biosyst. Eng.* 2016, 152, 104–116.

**Mouazen, A.; Kuang, B.; De Baerdemaeker, J.; Ramon, H.** Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy. *Geoderma* 2010, 158, 23–31

**Nawar, S.; Buddenbaum, H.; Hill, J.; Kozak, J.; Mouazen, A.M.** Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Tillage Res.* 2016, 155, 510–522.

**Nortcliff.S. (2002).**Standardisation Of Soil Quality Attribuets griculture Ecosystems & Environment 88(2) P 161-168.

**Nowak C., Mossmann J.R. & Saada A.,** Etat Des Connaissances Sur L'atténuation Naturelle : Mécanismes Et Mise En Oeuvre. Bureau De Recherches Géologiques Et Minières, 101 Pp. 2003.

**O'neill, P. Alloway, B.J.** « Arsenic Heavy Metals in Soils », Editor: Blackie Academic and Professional, P 105-121. London. 2005

**Pansu, M. And Gautheyrou, J.,** L'analyse Du Sol Minéralogique, Organique Et Minérale. Edition Springer. 2001

**Pereira B., Sonnet P. (mars 2007),** « La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en Région wallonne : Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon »

**Perrono,P. 1999.** Les micropolluants métalliques des boues des stations d'épurations urbaines et l'épandage agricole. Mem D.U.E.S.S. D.E.P, Univ Picardie, Amiens.

**Petropoulos George P; Gareth Ireland; Salim Lamine ; Hywel M. Griffiths; Nicholas Ghilain; Vasilieios Anagnostopoulos; Matthew R. North; Prashant K. Srivastava; Hro Georgopoulou.** Operational evapotranspiration estimates from SEVIRI in support of sustainable water management, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 49. 2016. 175–187 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.006>

**Pyo, J.; Hong, S.; Kwon, Y.; Kim, M.; Cho, K.** Estimation of heavy metals using deep neural network with visible and infrared spectroscopy of soil. *Sci. Total Environ.* 2020, 741, 140162.

## Références bibliographiques

**Rodier J, Bazin C, Broutin J.P., Champsaur H. ET Rodi L.,** « l'analyse de l'eau, Eaux résiduaires, Eaux de mer », 8ème édition, DUNO D, Paris. (2005), 1383p

## Références bibliographiques

---

**Rogozan, G.C.; Micle, V.; Sur, I.M.** Maps of Heavy Metals in CLUJ Country Soils Developed using the research-kriging method. *Env. Eng. Manag. J.* 2016, 15, 1035–1039.

**Rossel, R.V.; Behrens, T.** Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 2010, 158, 46–54.

**Shi, J.; Wang, H.; Xu, J.; Wu, J.; Liu, X.; Zhu, H.; Yu, C.** Spatial distribution of heavy metals in soils: A case study of Chang-xing, China. *Environ. Geol.* 2007, 52, 1–10.

**Shi, T.; Yang, C.; Liu, H.; Wu, C.; Wang, Z.; Li, H.; Zhang, H.; Guo, L.; Wu, G.; Su, F.** Mapping lead concentrations in urban topsoil using proximal and remote sensing data and hybrid statistical approaches. *Environ. Pollut.* 2021, 272, 116041.

**Sissaoui, N et Mehidi, A. 2001,** Evaluation de la contamination des sols agricoles par les éléments traces métalliques (Cd et Zn) dans la région de Beni- Belard (wilaya de Jijel). Mémoire de master en phytopharmacie et gestion agro-système, Univ de Jijel, pp 5-8.

**Soumaoro I,** « Contribution à l'évaluation de la qualité physicochimique et la contamination métallique des eaux du bassin versant KebirRhumel » Mémoire de mastter en pollution des écosystèmes et écotoxicologie, univ Des Frères Mentouri Constantine (2010).

**Sposito, G.,** the Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York. 2008.

**Sposito. G. 1997.**The Chemical Composition of Soils. The Chemestery of Soils. Oxford University Press.New-York: P3-27

**Stenberg, B.; Rossel, R.A.V.; Mouazen, A.M.; Wetterlind, J.** Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Adv. Agron.*2010, 107, 163–215.

**Sur, I.M.; Micle, V.; Avram, S.; Marin, S. Oros, V.** Bioleaching of some Heavy Metals from Polluted soils. *Env. Eng. Manag. J.* 2012, 11, 1389–1393

T.B. Reed, *Proc. Nat. Electron. Conf.* 19 (1963) 654.

Thèse BenmostefaMajda Amina, Télédétection de la végétation maritime par Radiomètres Optiques Passifs : Cas du littoral Algérien ; Univ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE U-S-T-O MB ; 2012.

**Touze S, Chartier. R, Gaboriau .H,** « Etat De L'art Sur Les Barrières Perméables Réactives (BPR) ». Réalisations,Expériences, Critères Décisionnels Et Perspectives.BRGM/RP 52973-FR, P131.2004

USEPA (2002). Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Washington, DC: Environmental Protection Agency.

## Références bibliographiques

---

USEPA (2009). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I. Washington, D.C: Human Health Evaluation Manual.

**Viard, B. 2004.** Mise au point et validation, sur sites contaminés, (ETM- HAP) d'un test de biosurveillance en microcosme : croissance et bioaccumulation par le gastropode terrestre hélix aspersa. Thèse de doctorat en Toxicologie de l'environnement, Univ de Metz, pp 6-280

**Wang, F.; GAO, J.; Zha, Y.** Hyperspectral sensing of heavy metals in soil and vegetation: Feasibility and challenges. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2018, 136, 73–84.

**Wang, H., Wu, Q., Hu, W., Huang, B., Dong, L., and Liu, G. (2018).** Using Multi-Medium Factors Analysis to Assess Heavy Metal Health Risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China. *Environ. Pollut.* 243 (Pt B), 1047–1056. doi:10.1016/j.envpol.2018.09.036

**Wang, X.; Zhang, F.; Ding, J.; Latif, A.; Johnson, V.C.** Estimation of soil salt content (SSC) in the EbinurLakeWetland National Nature Reserve (ELWNNR), Northwest China, based on a Bootstrap-BP neural network model and optimal spectral indices. *Sci.Total Environ.* 2018, 615, 918–930.

**Wu, Y.Z.; Chen, J.; Ji, J.; Tian, Q.; Wu, X.** Feasibility of Reflectance Spectroscopy for the Assessment of Soil Mercury Contamination. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 873–878.

**X. Chen, X.Lu, G.Yang,** *Catena*98 (2012)73–78.

**X. Li, S.Lee, S.Wong, W.Shi, I.Thornton,** *Environ.Pollut.*129 (2004)113–124.

**Xu, S.; Zhao, Y.; Wang, M.; Shi, X.** Comparison of multivariate methods for estimating selected soil properties from intact soil cores of paddy fields by Vis–NIR spectroscopy. *Geoderma* 2018, 310, 29–43.

**Xu, X.; Chen, S.; Xu, Z.; Yu, Y.; Zhang, S.; Dai, R.** Exploring Appropriate Preprocessing Techniques for Hyperspectral Soil Organic Matter Content Estimation in Black Soil Area. *Remote Sens.* 2020, 12, 3765.

**Xu, X.; Zhao, Y.; Zhao, X.; Wang, Y.; Deng, W.** Sources of heavy metal pollution in agricultural soils of a rapidly industrializing area in the Yangtze Delta of China. *Ecotoxicol. Environ.* 2014, 108, 161–167. [CrossRef]

**Y.Kuang, X.Zhu, D.Xi, J.Li, J.** *SoilSediment.*13 (2013)394–402.

**Yan, R.; Fang, Z.; Singh, A.; Jun, P.; Sheng, Q.; He, S.** Estimation of As and Cu Contamination in Agricultural Soils around a Mining Area by Reflectance Spectroscopy: A Case Study. *Pedosphere* 2009, 19, 719–726.

## Références bibliographies

---

**Yang, Q.; Li, Z.; Lu, X.; Duan, Q.; Huang, L.; Bi, J.** A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural re-gions in China: Pollution and risk assessment. *Sci. Total Env.* 2018, 642, 690–700. [CrossRef] [PubMed]

**Zhang, X.; Wen, J.; Zhao, N.** Band selection method for retrieving soil lead content with hyperspectral remote sensing data. *Remote Sens.* 2010, 7831, 78311.

**Zhang,X.;Wen, J.;Zhao,D.**SPIEProceedings [SPIERemoteSensing—Toulouse, France (Monday 20 September 2010)]Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications—Band selectionmethod for retrieving soil lead contentwith hyperspectral remote sensing data. SPIE 2010, 7831, 78311K.

**Zhao, L., Xu, Y., Hou, H., Shangguan, Y., and Li, F. (2014).** Source Identification and Health Risk Assessment of Metals in Urban Soils around the Tanggu Chemical Industrial District, Tianjin, China. *Sci. Total Environ.* 468, 654–662. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.08.094

**Zhao, X., Li, Z., Wang, D., Tao, Y., Qiao, F., Lei, L., et al. (2021).** Characteristics, Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals Exposure via Household Dust from Six Cities in China. *Sci. Total Environ.* 762, 143126.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143126

**Zhou, Z.H.** *Neural Network and Its Application*; Tsinghua University Press: Beijing, China, 2004.

**Zorrig, W. 2011.** Recherche et caractérisation de déterminants contrôlant l'accumulation de cadmium chez la laitue 'LacutaSativa'. Thse de doctorat en biologie intégrative des plantes, Univ El Manar Tunis, pp 15.