

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Laboratoire CRNA

Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie de l'Environnement

Distribution des éléments majeurs, mineurs et traces dans le sol du bassin versant de Béni Chougrane (Mascara) par la technique de fluorescence X à dispersion d'énergie

Présenté par : GRAINE Lyssia et OUANECHE Melissa

Sous la direction de : Promoteur Mr A. AZBOUCHE
Co Promoteur Mme J.ARRAR

Chercheur principal (CRNA)
Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (13/09/2020)

Composition du Jury :

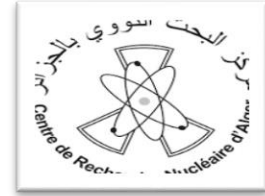
Président	Mr.Abdelkader NAMANE	Professeur. ENP
Promoteur	Mr. Ahmed AZBOUCHE	Chercheur Principal CRNA
Co-Promoteur	Mme. Jazia ARRAR	Professeur. ENP
Examineur	Mr. Yacine KERCHICH	MCA. ENP
Examinatrice	Mme. Louiza BOUNEMIA	Chercheur CRNA

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Laboratoire CRNA

Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie de l'Environnement

Distribution des éléments majeurs, mineurs et traces dans le sol du bassin versant de Béni Chougrane (Mascara) par la technique de fluorescence X à dispersion d'énergie

Présenté par : GRAINE Lyssia et OUANECHE Melissa

Sous la direction de : Promoteur Mr A. AZBOUCHE
Co Promoteur Mme J.ARRAR

Chercheur principal (CRNA)
Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (13/09/2020)

Composition du Jury :

Président	Mr.Abdelkader NAMANE	Professeur. ENP
Promoteur	Mr. Ahmed AZBOUCHE	Chercheur Principal CRNA
Co-Promoteur	Mme. Jazia ARRAR	Professeur. ENP
Examineur	Mr. Yacine KERCHICH	MCA. ENP
Examinatrice	Mme. Louiza BOUNEMIA	Chercheur CRNA

ENP 2020

ملخص

يوجد في الجزائر ندرة في البيانات المتعلقة بتوزيع العناصر الثانوية الرئيسية وآثارها في التربة ، مما يجعل تقدير التلوث وحركته أمراً صعباً للغاية . من أجل المساهمة في إنشاء قاعدة البيانات الوطنية، أجرينا دراسة على تربة مستجمعات المياه في واد فروج في ولاية معسكر

تم أخذ ست (6) عينات من ثلاثة (3) قطاعات مختلفة. في كل مقطع أخذنا عمقين 40-50 و 50-60 سم. تم بعد ذلك هذه العينات وتحضيرها للتحليل باستخدام تقنية الأشعة السينية المشتتة للطاقة. معالجة بعد هذا التحليل حصلنا على كثافة كل عنصر في التربة ، لذلك قمنا لاحقاً بحساب محتواها باستخدام طريقة المعايير وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن موقعنا لا يتعرض لأي تلوث وأنه غني بالعناصر. علاوة على ذلك ، أظهرت المقارنة بين أنواع التربة المختلفة اختلافاً في المحتويات

الكلمات المفتاحية: العناصر الرئيسية، العناصر الثانوية، العناصر النزرة، التربة، تلوث التربة، التألق بالأشعة السينية، الأشعة السينية

Abstract :

In Algeria there is a rarity of data concerning the distribution of major minor and trace elements in the soil which makes the estimation of pollution and its mobility rather difficult.

In order to contribute to the realization of this national database, we have made a study on the soil of the watershed of Oued Fergoug in the Wilaya of Mascara.

Six (6) samples were taken from three (3) different transects; in each transect we took two depths 40-50 and 50-60 cm. These samples were then pre-treated and prepared for analysis by the technique of energy dispersive X-ray fluorescence.

After this analysis we obtained the intensity of each element in the soil, so we then calculated their content by the standards method.

The results thus obtained showed that our site is not exposed to any pollution and that it is rich in elements. In addition, a comparison between different soils showed a difference in the contents.

Keywords: major elements, minor elements, trace elements, soil, soil pollution, X-ray fluorescence.

Résumé :

En Algérie, la rareté de données relative à la distribution des éléments majeurs, mineurs et traces dans le sol rend l'estimation de la pollution et sa mobilité assez difficile.

Afin de contribuer à la réalisation d'une base de données nationale, nous avons mené une étude sur le sol du bassin versant d'Oued Fergoug de la wilaya de Mascara. Six (6) échantillons ont été prélevés dans trois (3) transects différents ; dans chaque transect nous avons pris deux profondeurs 40-50 et 50-60 cm. Ces échantillons ont été ensuite prétraités et préparés pour être analysés par la technique de la fluorescence X à dispersion d'énergie.

Après l'analyse, la détermination de l'intensité de chaque élément dans le sol, nous a permis de calculer par la suite leurs teneurs par la méthode des standards.

Les résultats ainsi obtenu ont montré que notre site n'est pas soumis à aucune pollution et qu'il était riche en éléments. Par ailleurs une comparaison entre différents sols a montré une différence dans les teneurs.

Mot clés : éléments majeurs, éléments mineurs, éléments traces, sol, pollution de sol, fluorescence X, Rayon X.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à ces personnes qui étaient toujours là :

A mes chers PARENTS, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leur prière tout au long de mes études. Que DIEU vous procure bonne santé et longue vie.

A mon frère MASSYL. Que dieu illumine tout ton parcours.

A la mémoire de ma grand-mère paternelle qui aurait été fière de me voir ingénieur aujourd'hui. Que DIEU ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

A ma très chère grand-mère maternelle pour tous ses douaa. Que DIEU te garde pour moi.

A toute ma famille et famille BOURAS pour leur présence, soutien et encouragements.

A mes cher(e)s ami(e)s pour leurs aides et conseils dans les moments difficiles et pour tous les moments agréables que nous avons passés ensemble.

Et à tous ceux qui ont contribué de loin et de près, je vous dis MERCI.

Lyssia

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers :

*A la mémoire de MON PERE qui m'a toujours soutenue et encouragée, que
DIEU garde son âme dans son vaste paradis.*

*A ma MAMAN chérie source de vie d'amour et d'affection et qui sans elle ma
réussite n'aurait pas eu lieu ; puisse Dieu lui accorder santé, bonheur,
prospérité et longue vie.*

*A ma sœur LYNDA et mon frère LYES a qui je souhaite un avenir radieux plein
de réussites.*

*A ma GRAND MERE qui m'a accompagnée par ses prières, sa douceur, puisse
DIEU lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.*

Melissa

REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, on tient à remercier **DIEU** le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail en ces moments difficiles.*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en premier lieu, à notre promoteur Monsieur AZBOUCHE Ahmed, chercheur au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, pour son accompagnement tout au long de la période de notre stage, pour son aide, et tous les efforts fournis de sa part pour accomplir ce travail.

Nos chaleureux remerciements vont en second lieu, à notre Co-promotrice Mme ARRAR, pour son écoute et ses conseils, qui nous ont été toujours précieux.

Nous remercions le Pr NAMANE Abdelkader qui nous a fait l'honneur de présider ce jury de thèse ainsi que Mr. Yacine KERCHICH et Madame BOUNEMYA en qualité d'examineurs. Merci pour le temps que vous avez consacré à juger notre travail, à vos remarques constructives.

Nos vifs remerciements et notre sincère reconnaissance à Mr Toumert, chercheur au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, pour nous avoir aidées à effectuer nos analyses avec l'ED-XRF ainsi qu'à tout le personnel du laboratoire et en particulier, pour avoir mis en notre disposition le matériel nécessaire à la réalisation de cette étude.

Nous remercions d'une façon très particulière nos parents pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des Matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction	12
Chapitre I : Sol et environnement	14
1. Définition du sol :	15
2. Horizons du sol	15
3. Types de sols :	16
4. Composition des sols :	16
4.1. Constituants minéraux	17
4.2. Constituants organiques.....	17
4.3. Eau	17
4.4. Air.....	17
4.5. Éléments majeurs.....	18
4.6. Éléments mineurs	19
4.7. Éléments traces :	20
5. Propriétés des sols.....	21
5.1. Propriétés chimiques.....	21
5.1.2. Pouvoir tampon des sols.....	21
5.1.3. Le pH.....	22
5.1.4. Conditions d'oxydoréduction.....	22
5.2. Propriétés physiques	22
5.2.1. La texture du sol.....	22
5.2.2. Structure du sol.....	23
5.2.3. Porosité du sol	24
5.2.4. Capacité de rétention en eau.....	24
6. Dégradation des sols :	24
6.1. La dégradation physique.....	25
6.2. La dégradation chimique	25
6.3. La dégradation biologique	26
6.4. Les conséquences de la dégradation des sols sur la santé :	26
Chapitre II : Technique de fluorescence X.....	28

1. Principe de production des rayons X :	29
2. Principe de l'analyse par fluorescence X.....	30
3. Caractéristiques de la technique :	30
Limites de sensibilité :.....	30
Effet matrice :	31
4. Analyse par dispersion d'énergie ED-XRF :	31
4.1. Analyse qualitative :	31
4.2. Analyse quantitative :	31
4.3. Le dispositif expérimental	33
4.4. Avantages de la spectrométrie EDXRF.....	34
5. Méthode d'analyse par dispersion en longueur d'onde WD-XRF :	34
5.1. Principe de la technique :	34
5.2. Le dispositif expérimental :	35
5.3. Analyse qualitative et quantitative	36
5.4. Avantages de la spectrométrie WD-XRF	36
6. Rendement de la fluorescence :	37
7. Limites de l'analyse par fluorescence des rayons X.....	37
8. Comparaison entre la WD-XRF et ED-XRF :	38
9. Domaine d'application de la fluorescence X :	38
Chapitre III : Matériels et Méthodes	39
1. Présentation de la zone d'étude :	40
1.1. Aspects physiques de la zone d'étude :	40
1.2. Synthèse climatique :	43
1.3. Quotient pluviométrique :	45
1.4. Pédologie :	46
1.5. Lithologie :	47
2. Prélèvements et échantillonnages	48
2.1. Choix des sites et méthodologie d'échantillonnage :	48
2.2. Préparation des échantillons :	49
3. Analyse des échantillons de sol	50
3.2. Traitement du spectre X :	52
3.3. Identification et quantifications des éléments.	52
Chapitre IV : Résultats et Discussions	54

1. Présentation des résultats	55
2. Discussion et interprétation des résultats :.....	59
2.1. La distribution des éléments majeurs :	59
2.2. La distribution des éléments mineurs :.....	60
2.3. La distribution des éléments traces.....	61
3. Résultats d'autres régions du monde	65
3.1. Discussion des résultats :.....	72
Conclusion Générale	73
Bibliographie	74

Liste des figures

Figure I-1 : Horizons du sol	15
Figure I-2: Composition du sol.....	17
Figure I-3: Triangle textural (Duchaufour, 1997).....	23
Figure II-1: Principe de la production des rayons X.....	29
Figure II-2 : Dispositif expérimental de l'ED-XRF	33
Figure II-3: Le dispositif expérimental de WD-XRF	35
Figure III-1: Localisation du bassin versant d'Oued Fergoug (Google Map).....	40
Figure III-2: Diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen pour la période de 1998-2008.....	44
Figure III-3: Carte pédologique du bassin versant de Fergoug (Morsli, 1996).....	46
Figure III-4: Carte lithologique du bassin versant de l'oued Fergoug (Bouchetata A., 2006).....	47
Figure III-5 : Schéma d'échantillonnage dans un site de référence	48
Figure III-6 : Schéma d'échantillonnage dans un site d'étude.	49
Figure III-7 : Tamisage.....	50
Figure III-8: Broyage.....	50
Figure III-9 : Séchage à l'étuve	50
Figure III-10 : Caractéristiques de l'ED-XRF (AZBOUCHE, Cours de fluorescence X, 2013)	51
Figure III-11: Spectre de fluorescence X (ED-XRF) d'un échantillon du sol T1C3 (50-60) cm.	52
Figure IV-1 : Concentration des éléments majeurs dans différents profils en fonction de la profondeur.	59
Figure IV-2 : Concentration des éléments mineurs dans différents profils en fonction de la profondeur	60
Figure IV-3 : Concentration des éléments Rb, La et Pb dans différents profils en fonction de la profondeur.	61
Figure IV-4 : Concentration des éléments V, Ni et Zn dans différents profils en fonction de la profondeur.	62
Figure IV-5 : Concentration des éléments Y, Nb et Sc dans différents profils en fonction de la profondeur.	63
Figure IV-6 : Concentration des éléments U, Th et Br dans différents profils en fonction de la profondeur	64
Figure IV-7 : Comparaison des Concentration des éléments majeurs dans différents sols	66
Figure IV-8 : Comparaison des Concentration des éléments mineurs dans différents sols.	68
Figure IV-9: Comparaison des Concentration des éléments traces dans différents sols	70
Figure IV-10: Comparaison des Concentration des éléments traces dans différents sols	70

Liste des tableaux

Tableau I-1: Diamètre et taille approximative de quatre particules de sol (McCauley, 2005)	23
Tableau II-1: Comparaison entre la WD-XRF et ED-XRF	38
Tableau III-1: Précipitations moyennes mensuelles (mm) des stations de Mascara Ghriss	41
Tableau III-2: Moyennes mensuelles des vitesses du vent (m/s) de la station de Mascara allant de 1998 à 2008	42
Tableau III-3: Moyenne mensuelle des températures moyennes (°C) de la station de Mascara allant de 1998 à 2008	43
Tableau III-4: Les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes mensuelles de la station de Mascara pour la période de 1998-2008	44
Tableau III-5 : Quotient pluviométrique calculé pour la région de Fergoug	45
Tableau III-6: Correspondance entre étage de la végétation et variance thermique (Quezel 1979 dans Laribi, 2000) (Thinhinane IGUER, 2017)	45
Tableau IV-1 : Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T1C3	56
Tableau IV-2: Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T2C2	57
Tableau IV-3 : Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T3C1	60
Tableau IV-4 : Tableau comparatif des éléments majeurs	70
Tableau IV-5 : Tableau comparatif des éléments mineurs	68
Tableau IV-6 : Tableau comparatif des éléments traces	69

Liste des abréviations

ADC : Analogique Digital Convertisseur.

AXIL: Analysis of X-Ray Spectre by Iterative Least-Squares Fitting

BV : Bassin versant.

CEA : Capacités d'échange anionique.

CEC : Capacités d'échange cationique.

CRNA : Centre de Recherche Nucléaire d'Alger.

ED-XRF: Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry

keV: kilo electron –Volt

LD : Limite de détection.

MCA: Analyseur multicanaux

MeV : Méga électron- volt.

MO : Matière organique

ONM : Office national de météorologie.

WD-XRF : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry

XRF : X-Ray Fluorescence

INTRODUCTION

Le sol est un milieu fragile et très complexe, trop longtemps considéré comme un simple support de l'agriculture. C'est un milieu vivant, interface entre la biomasse, l'atmosphère et l'hydrosphère. Le sol joue un rôle prépondérant dans le déterminisme de la qualité des eaux, de l'air et de la chaîne alimentaire. C'est aussi un milieu de transit, de stockage et de transport de nombreuses substances, quelle que soit leur nature, organique ou inorganique, résultant de processus naturels ou d'activités domestiques. (CALVET, 2000)

Malheureusement depuis plusieurs années, la pollution du sol qui était trop négligée constitue un sérieux problème pour l'environnement ; surtout que le développement des activités urbaines, industrielles ont entraîné de nombreux problèmes liés notamment à la pollution par les éléments traces et les composés organiques.

La pollution des sols par les éléments traces et mineurs constitue depuis une vingtaine d'années un objectif de recherche et de remédiation. En effet, ces éléments sont issus de l'héritage du fond géochimique (la roche sur laquelle le sol s'est formé et l'apport sédimentaire) d'une part et du cumul des apports anthropiques comme les activités liées aux pratiques agricoles, les activités industrielles ou encore les activités urbaines liées au développement des villes et des réseaux routiers d'autre part. (BOULABRAOUAT, 2010)

Lorsqu'ils sont présents dans le sol, des mécanismes physiques, chimiques et biologiques contribuent à leur transformation. Cela peut avoir pour conséquence l'immobilisation partielle ou totale des métaux dans les sols ou leur entraînement par les eaux vers les nappes souterraines. La pollution des sols est ainsi directement liée à la dégradation de la qualité des sols mais également à la pollution des eaux souterraines: elle présente un danger pour tous les organismes vivants dans le sol comme dans le milieu aquatique (NAILI et al., 2016).

Afin de connaître le degré de contamination d'un sol, il ne suffit pas de confronter les résultats des teneurs du sol à des valeurs seuils d'une réglementation ou de références données. Il est nécessaire de connaître la distribution des métaux cibles dans les différentes fractions du sol afin de pouvoir prédire leurs comportements, leurs mobilités.

Une étude sur la distribution de ces éléments stables et radioactifs dans le fond géochimique dans les profils des sols reste primordiale. Elle aidera à avoir les informations nécessaires sur les facteurs qui régissent cette distribution qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle mais également la possibilité de suivre et contrôler cette pollution et de fait choisir la technique de remédiation appropriée.

Malheureusement, ces études restent assez rares malgré les nombreuses recherches effectuées sur différents sites. En Algérie, et à l'instar des autres pays, cette rareté de données peut être expliquée par le manque des moyens ou la lourdeur de certaines techniques d'analyse.

Par ailleurs, au fil du temps, de nombreux chercheurs ont développé des techniques nucléaires qualifiées non destructives permettant d'avoir des données sur la distribution des éléments majeurs, mineurs et de traces et qui présentent un intérêt particulier dans l'étude du sol. A cet effet, plusieurs techniques d'analyses sont employées dont la spectrométrie de

fluorescence à savoir la technique ED-XRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence), WD-XRF (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence).

Ces techniques sont multi élémentaires, rapides et non destructives permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon, du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis, et surtout reproductibles (THIRION-MERLE, 2016).

L'objectif de ce travail est donc d'étudier la distribution des éléments mineurs et traces du sol d'un site agricole dans le sous bassin versant de Oued Fergoug dans la Wilaya de Mascara par la technique de ED-XRF. Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre concerne les généralités sur le sol et la pollution du sol.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la technique de fluorescence X en général et des deux techniques d'analyse nucléaires ED-XRF et WD-XRF en donnant les principes, les caractéristiques et les avantages de chaque méthodes d'analyses.
- le troisième chapitre concerne d'une part, la présentation du site d'étude et ses caractéristiques et d'autre part, les méthodes d'échantillonnage et de préparation avant analyse et enfin la méthodologie d'analyse et le traitement des spectres obtenus.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus ainsi qu'une comparaison avec d'autres résultats relatifs à d'autres sols rapportés dans la littérature.

Enfin ce travail sera achevé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I : Sol et environnement

1. Définition du sol :

Le sol est la couche la plus externe de la croûte terrestre résultant de l'interaction entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, dégradée et enrichie en apports organiques par les processus vivants de pédogenèse (GOBAT, 2010).

Le sol se forme à raison de seulement 1cm tous les 100 à 400 ans et il faut 3000 à 12000 ans pour construire suffisamment de sol et former des terres productives. Cela signifie que le sol est une ressource non renouvelable (Course of Agriculture département)

De nombreux facteurs interfèrent dans la formation des sols, ce qui explique la grande diversité des types de sols rencontrés. Les facteurs les plus importants sont la nature de la roche mère ou matériau d'origine, le climat, le temps, la végétation. D'autres facteurs comme le relief, la topologie du terrain et l'intervention de l'homme ont également leur importance (IGUER et SEKHANE, 2017).

2. Horizons du sol

On peut définir le sol comme la couche de quelques centimètres à plusieurs mètres de matière organiques et inorganiques, accumulée au-dessus de la roche mère, capable de porter une végétation (KOLLER, 2009). Il est subdivisé en plusieurs couches (horizons) dénommés par des lettres: O, A, B, C,... selon une nomenclature internationale. La Figure montre la position de chaque horizon.

Horizon O : c'est la partie superficielle résultant de la transformation en matière organique des débris végétaux qui s'accumulent à la surface du sol dont la couleur s'assombrit du haut vers le bas.

Horizon A : appelé aussi terre arable, cet horizon est composé d'humus et de morceaux de roches de différentes grosseurs. C'est la couche la plus sensible aux transformations biologiques et à l'érosion. Elle est riche en matières organiques et minérales lui conférant une couleur brun sombre.

Horizon B : Il est souvent de couleur plus pâle ou rouille ; très riche en minéraux et possède de gros morceaux de roches mais pauvre en humus. Beaucoup de particules des autres strates s'y accumulent.

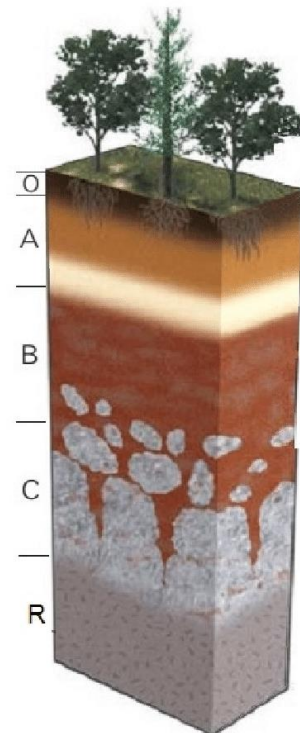


Figure I-1 : Horizons du sol (IGUER et SEKHANE, 2017)

Horizon C: Cet horizon, composé de fragments de la roche mère sous-jacente plus ou moins altérée, ne contient pas de matières organiques. Cet horizon est sur le substratum rocheux qui peut être sableux, rocheux ou dur.

3. Types de sols :

SOL ARGILEUX

Un sol argileux est composé d'une grande quantité de particules fines de roches de diamètre inférieur à 2 microns. La finesse de ces particules en fait un sol lourd et compact qui laisse difficilement passer l'eau ; ce qui lui permet de garder la fraîcheur et l'humidité.

SOL CALCAIRE

Il est facile à travailler, sec et friable. Le sol calcaire se reconnaît à sa couleur blanchâtre due à la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) provenant de l'accumulation de dépôts marins lors des périodes géologiques. Il est donc fréquent dans ce type de sol de découvrir toutes sortes de fossiles.

SOL HUMIFÈRE

Il est riche en matières organiques, de couleur brune à noire, vite chauffé, facile à travailler. Il est spongieux, ne colle pas, s'aère facilement, et dégage une odeur de sous-bois après la pluie (CHARLES, 2019). Ce type de sol est connu par son excès d'acidité ou d'humidité.

SOL LIMONEUX

Un sol limoneux est un sol riche en limons. Ses grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables. Il s'est constitué par dépôts sédimentaires le long d'un cours d'eau. Ce type de sol est doux au toucher, poudreux, poussiéreux en période de sécheresse, léger et facile à travailler (CHARLES, 2019).

SOL SABLEUX

Les sols sableux sont en général de couleur claire et coule entre les doigts. Ils sont souvent secs, pauvres en matières organiques, aérés et très drainants. Ils ne sont pas aptes à transporter l'eau par capillarité jusqu'aux couches profondes ce qui les rend instables (CHARLES, 2019).

4. Composition des sols :

Le sol est constitué d'une fraction solide ; composée de constituants minéraux et organiques ; et d'une fraction fluide (fraction liquide et fraction gazeuse) qui jouent un rôle primordial au niveau de l'agrégation des constituants du sol, de la stabilité de la structure du sol et des propriétés physiques qui en découlent (porosité, aération...). La formation et la proportion de ces fractions sont influencées par des facteurs climatiques, physico-chimiques, ou encore biologiques (MIRSAL, 2008).

4.1. Constituants minéraux

Ils représentent l'ensemble des produits issus de l'altération de la roche mère et de l'atmosphère tels les ions, les composés ioniques, les argiles, les limons, et les sables fins ou les sables grossiers.

La fraction minérale est composée d'une :

Fraction grossière, avec des particules d'un diamètre supérieur à deux micromètres : les graviers et cailloux, les sables, les limons qui constitue le squelette du sol. Son rôle est de garder l'eau en réserve dans le sol.

Fraction fine : les particules sont inférieures à $2\mu\text{m}$. Cette fraction est biologiquement et chimiquement active et est composée de colloïdes minéraux.

4.2. Constituants organiques

Provenant de la décomposition et du métabolisme d'êtres vivants végétaux, animaux et microbiens (fongiques, bactériens) (PARKER, 2009). Elle regroupe azote, hydrates de carbone, oxygène et hydrogène. Selon sa composition, le sol peut avoir une couleur plus ou moins foncée.

4.3. Eau

Elle est indispensable pour la croissance des végétaux et permet également la décomposition de la matière végétale. L'eau alimente le sol en oxygène, en sels minéraux et en gaz carbonique, mais aussi en éléments polluants.

4.4. Air

Un ensemble de gaz circulent dans les interstices du sol, constitué de dioxyde de carbone (CO_2), oxygène (O_2), azote (N_2) et vapeur d'eau (H_2O). C'est la faune du sol qui se charge de l'aérer.

La Figure représente le pourcentage de chaque constituant du sol, la matière minérale constitue la moitié de la composition du sol.

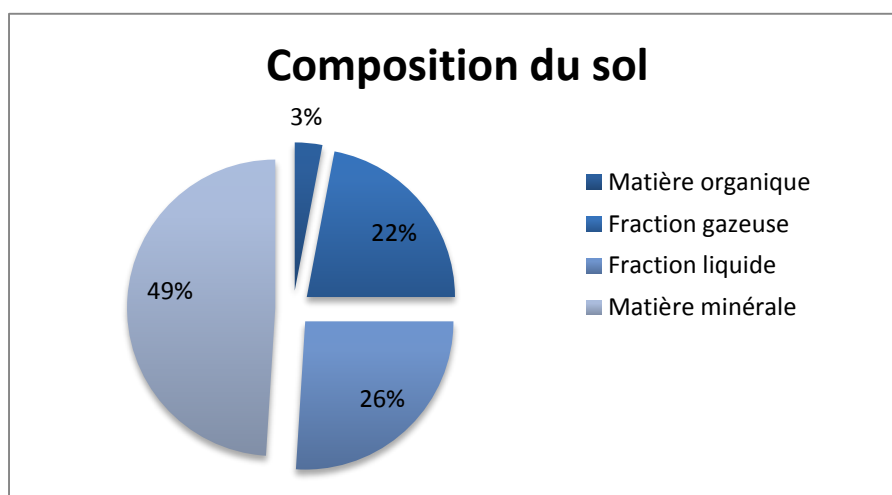


Figure I-2: Composition du sol

4.5. Eléments majeurs

Les principaux éléments majeurs présents dans les sols sont le fer (Fe), l'aluminium (Al), le manganèse (Mn), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K) et le sodium (Na). Ils sont présents en grandes quantités.

Connaître leurs teneurs dans les différents horizons du sol permet de comprendre comment le sol s'est formé et de comparer les sols entre eux. (TEMGOUA, 2015)

Le phosphore (P) : existe dans le sol sous les formes inorganique ; associée à des composés amorphes ou cristallins ; et organique associée à la matière organique du sol. La quantité de phosphore présente dans un sol est liée directement de la richesse de la roche mère. Des échanges continus ont lieu entre les différentes formes de phosphore dans le sol. Les plantes absorbent du phosphore dissous dans la solution du sol. La diminution du phosphore est entraînée par les processus d'érosion du sol et de lessivage (KAREMANGINGO et al., 2004)

Le fer (Fe) : est très abondant dans les sols, ses composés fortement colorés sont de bons indicateurs de l'excès d'eau dans les sols (couleur gris-bleu à gris-vert). Assez facilement mobilisable, il peut migrer dans le sol et se reconcentrer ailleurs. Son effet peut augmenter l'absorption du manganèse (Mn) jusqu'à des seuils toxiques. Fer joue un rôle important dans la genèse et les caractéristiques d'un grand nombre de sols, en particulier les sols hydromorphes, podzoliques et ferralitiques. (SEGALEN, 1963)

Le calcium (Ca) : favorise l'action des micro-organismes et intervient dans les propriétés physico-chimiques du sol contribuant ainsi au maintien de leur structure et l'amélioration de leur qualité comme les rendre plus favorable à la culture et l'aération. Il se trouve sous forme de calcaire ou calcium échangeable lié au complexe argilo-humique. (GUERIN, 2016).

Le potassium (K) : se trouve uniquement sous forme minérale. Il provient soit de la décomposition de la matière organique et des minéraux du sol, soit des engrais (worldpress, 2012) Les sols des régions tropicales ne contiennent presque pas de potassium.

Le sodium (Na) : se trouve dans l'état lié principalement sous forme de sels. Le sodium est facilement lessivé dans des climats humide ou semi-humide par les eaux de pluie ce qui rend sa fixation difficile engendrant une pauvreté de cet élément dans le sol.

Une accumulation du sodium peut avoir lieu dans des zones arides ou semi-arides à cause de l'évaporation des eaux dans les couches superficielles Cela se répercute négativement sur le bilan hydrique et l'aération du sol. En plus, le pH s'élève de plus en plus lorsque la teneur en Na augmente.

Le silicium (Si) : est le deuxième élément chimique le plus abondant de la croûte terrestre (partie superficielle de l'enveloppe terrestre rigide). Dans la croûte terrestre continentale, soit le sous sol des terres utilisées en agriculture, le silicium est souvent associé à l'oxygène appelé silice (SiO₂). La silice compose de nombreux minéraux (matériau solide naturel entrant dans la composition de la roche) sous formes libre ou combinée. Si les molécules de silice sont combinées entre elles, cela devient des silicates (WALGRAFFE, 2018).

Le magnésium (Mg) : provient en grande partie de la décomposition des minéraux. Les sols situés dans les climats tempérés ont des concentrations allant de 5 à 50ppm et dans les sols des climats arides, elles varient de 120 à 2400 ppm. (BOYER, 1978).

L'absorption de Mg est influencée par la quantité d'élément chimique disponible dans la solution de sol, le pH du sol, le pourcentage de saturation en Mg de la capacité totale d'échange de cations et le type de sol.

Le titane (Ti) : est le 9^{ème} élément chimique métallique le plus présent dans la croûte terrestre. Il se trouve sous forme de minéraux stables (LIDE et al., 2005). La concentration dans les sols varie en fonction de la pédologie des sites étudiés entre 1 à 5 g/kg de titane selon Connor and Shacklette (1975) (BOURDOISEAU et DELOLME, 2016). Dans certains sols, la concentration peut aller de 10 à 100g/kg. Le titane est très peu mobile dans les sols (CHOWDHURY et al. 2012). Les principales sources sont liées à la combustion de combustibles fossiles, l'incinération de déchets contenant du titane, l'utilisation et la dégradation de produits industriels et domestiques (INRS, 2013).

4.6. Éléments mineurs

Les éléments mineurs ou oligo-éléments sont présents dans le sol qu'en petites quantités. Ils sont nécessaires pour une bonne croissance du métabolisme (ESTEVEZ, 2006) et contribuent à différentes fonctions physiologiques des plantes à de faibles concentrations (PARENT, 2003). Leur disponibilité potentielle dépend des types de sols et particulièrement leurs caractéristiques physico-chimiques. Selon Tran et al. (1995) les facteurs les plus importants sont la texture du sol, le pH, la teneur en matière organique, l'humidité du sol, le potentiel d'oxydoréduction (aération et humidité du sol) (ESTEVEZ, 2006).

La disponibilité potentielle des éléments mineurs est également influencée par des facteurs anthropiques, notamment par les pratiques agricoles de fertilisation et le chaulage. Si les teneurs sont trop élevées, des mécanismes de toxicité peuvent être développés.

Parmi les éléments mineurs on peut citer le manganèse (Mn), le baryum (Ba), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le zirconium (Zr), le strontium (Sr), le molybdène (Mo)... Certains éléments mineurs sont des métaux lourds (Cu, Zn, Mo) qui font aussi partie des éléments traces métalliques (ETM).

Le manganèse (Mn): est nécessaire comme cofacteur de nombreux enzymes d'oxydoréduction et surtout dans le photo système II de la photosynthèse. Le pH du sol a un effet marqué sur la disponibilité du manganèse. Les autres facteurs reconnus pour favoriser les carences sont les températures froides de même qu'un sol sec. Bien que les niveaux foliaires puissent être très variables, aucun effet significatif sur l'état sanitaire ou la production n'a pu être observé.

Le chrome (Cr) : se lie aux particules du sol et ne se déplace pas jusqu'à l'eau souterraine. Il évolue avec la position dans la topo séquence et la profondeur du sol. La majorité du chrome est associée aux oxydes de fer bien cristallisés qui constituent la matrice solide des sols. Il est également présent au sein des chromites, et de phases mineures silicatées. Les sols de des

régions arides et semi arides sont souvent riches et même très riches en chrome. La teneur en chrome varie aussi en fonction de la texture du sol. Elle est plus forte dans les sols argileux que dans les sols sableux facilement lessivés

Le strontium (Sr) : sous sa forme élémentaire, est présent naturellement dans l'environnement (les roches, le sol, l'eau, l'air). Les composés du strontium peuvent se déplacer dans l'environnement assez facilement car beaucoup d'entre eux sont solubles. Le strontium dans le sol se dissout dans l'eau, par conséquent, il est susceptible de se déplacer plus profondément dans le sol et de rejoindre les eaux souterraines. Une partie du strontium introduit par l'homme ne rejoint pas les eaux de surface et peut rester dans le sol pendant des décennies.

Le zirconium (Zr) : présente quelquefois sous forme d'une pierre précieuse l'hyacinthe (minerai) se. Il est généralement associé au titane et à l'hafnium. Comparativement au cuivre, Il est trois fois plus abondant dans la croûte terrestre, dont il compose 0,0165 % jusqu'à une profondeur de 16 km. Le zirconium et ses sels ont généralement une basse toxicité systémique.

Le baryum (Ba) : c'est un métal blanc argenté présent naturellement dans l'environnement. Il peut être présent en combinaison avec d'autres produits chimiques tels que le soufre, le carbone et l'oxygène. En général, les taux de baryum dans les sols sont faibles, ces niveaux peuvent être plus élevés dans les sites de déchets dangereux.

4.7. Eléments traces :

Ils regroupent 80 éléments chimiques constituant de la croûte terrestre, dont les ETM. La majorité des éléments traces présents dans les sols appartiennent à la famille chimique des métaux et métalloïdes, mais seulement une partie d'entre eux présente un intérêt écologique, biologique ou économique. Ils sont considérés comme toxiques pour l'homme et l'environnement dans divers documents (MIQUEL, 2001). Les ETM sont réputés pour être toxiques et dont la teneur moyenne dans les sols est inférieure à 1g.kg^{-1} . Parmi les éléments traces on cite : Zn, V, La, Rb, As, Cu, Ni, Nb, Nd, Y

Le zinc (Zn) : est facilement adsorbé par les minéraux argileux, les carbonates ou hydroxydes. En tant que métal cationique, l'adsorption de Zn augmente avec le pH. Le zinc s'hydrolyse à $\text{pH} > 7,7$ et peut également former des complexes avec les ligands organiques et inorganiques ce qui diminue les réactions d'adsorption. Les teneurs en Zn dans les sols non contaminés sont généralement les plus élevées de tous les ETM. Si la concentration en Zn dépasse $300\mu\text{g/g}$, un effet toxique sur différentes espèces de micro-organismes du sol apparaît, réduisant leur capacité de dégradation des débris végétaux et la fixation de l'azote atmosphérique (BURNOL et al., 2006).

Le nickel (Ni) : de couleur grise, est ferromagnétique et présente plusieurs propriétés communes avec le fer. Le nickel peut se présenter sous des formes diverses, Le comportement des composés de Ni dans les sols dépend des propriétés des différents composés, mais aussi du type de sol. La désorption et la teneur en Ni dans la solution du sol tend à croître à mesure que

le pH diminue. Les teneurs sont comprises entre des traces et 500ppm. Les sols des régions semi-arides et arides ont souvent des concentrations plus fortes que les sols des zones tempérées et tropicales. (LENNTECH, 2011).

Le vanadium (V) : est un métal blanc, brillant, mou et ductile. Il possède une bonne résistance à la corrosion. Selon Aubert (1995) le vanadium est un cofacteur enzymatique. La teneur du sol en V dépend de la roche mère ; elle est comprise entre des traces et 300ppm, la concentration moyenne étant de l'ordre de 100ppm (BUR, 2008) .

Le plomb (Pb) : est réputé comme « très peu mobile » car fortement fixé par les matières organiques et/ou par les oxy-hydroxydes de fer. Qu'il soit apporté par voie atmosphérique ou comme impureté indésirable dans divers épandages, le plomb « exogène » a donc tendance à s'accumuler progressivement dans les horizons de surface des sols.

Les sols sont souvent plus riches en plomb que les roches dont ils dérivent. Les concentrations dosées dans les différents types de sols étudiés sont comprises en moyenne entre 15 et 25ppm.

5. Propriétés des sols

Les constituants du sol interagissent entre eux pour lui conférer ses propriétés (GOBAT, 2010) dont les principales propriétés :

5.1. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux nutritifs pour les plantes et aux paramètres chimiques du sol en lien avec leur restitution ou disponibilité (INRAE, 2011).

5.1.1. Capacité d'échange

Les surfaces colloïdales chargées peuvent absorber ou attirer des ions dans la solution du sol. En fonction de la charge, la taille et la concentration de l'ion dans le sol, il peut être absorbé et maintenu sur la surface colloïdale ou échangé avec d'autres ions et libéré dans la solution du sol. La capacité du sol à absorber et à échanger des ions est sa « capacité d'échange » (MCCAULEY et al., 2005)

On distingue la capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol correspondant à la quantité maximale de cations qu'un sol peut absorber qui est utilisée comme mesure de la fertilité d'un sol. (KESSEL, 2015).

La capacité d'échange anionique (CEA) : quantité d'anions retenus par les constituants solides du sol et susceptibles d'être échangés avec d'autres anions (LAROUSSE, 2002).

5.1.2. Pouvoir tampon des sols

C'est la capacité d'un sol à résister aux variations du pH. Il est lié à la capacité d'échange du complexe absorbant, qui est due à la matière organique et à l'argile. Selon Combeau (1970) un sol très sableux dépourvu de matière organique et d'argile est donc pratiquement sans pouvoir

tampon. La mesure du pH revient alors en fait à mesurer celle de l'eau (DAMAY et JULIEN, 2009).

5.1.3. Le pH

Le pH d'un sol est une mesure de l'acidité et l'alcalinité du sol, il est important pour plusieurs raisons : La disponibilité des éléments nutritifs ; Les problèmes de toxicité.

Le pH du sol peut affecter la CEC et la CEA en modifiant la charge de surface des colloïdes. Une concentration plus élevée de H⁺ (pH inférieur) neutralise la charge négative sur les colloïdes, ce qui réduit la CEC et augmente la CEA (MCCAULEY et al., 2005).

5.1.4. Conditions d'oxydoréduction

Elles ont un rôle très important en déterminant le comportement des éléments chimiques (fer, manganèse, chrome, soufre, azote), mais surtout le fonctionnement biologique des racines, des micro-organismes en présence ou absence d'oxygène.

Les conditions d'oxydoréduction des sols se définissent dans un diagramme Eh-pH où le Eh mesure l'aptitude d'un milieu à fournir les électrons à un agent oxydant ou à retirer des électrons à un agent réducteur.

Les sols, comme les autres environnements naturels, sont placés dans un domaine d'oxydoréduction qui se trouve limité par la stabilité de l'eau liquide selon (IGUER et SEKHANE, 2017).

5.2. Propriétés physiques

Elles sont déterminées par la taille des particules du sol (texture), leurs organisations (Structure) et de leurs porosité (IGUER et SEKHANE, 2017).

5.2.1. La texture du sol

Elle correspond à la répartition de la fraction minérale solide du sol par catégorie de grosseur indépendamment de la composition de ces minéraux Elle est intimement liée à l'analyse granulométrique du sol, puisqu'elle permet d'en définir la nature à partir des proportions respectives des classes granulométriques (BAIZE et JBIOL, 2011)

On utilise couramment, pour synthétiser les résultats de l'analyse granulométrique, des représentations graphiques en coordonnées triangulaires permettant de qualifier la texture du sol. La notion de texture d'un sol présente une importance pratique considérable: elle détermine dans une large mesure les caractéristiques principales de ce sol dans les domaines de la rétention d'eau, de la capacité d'échange d'ions et de la structure (COMBEAU et al., 1970).

Tableau I-1: Diamètre et taille approximative de quatre particules de sol (MCCAULEY et al., 2005)

Particule de sol	Diamètre (mm)
Gravier	>2.0
Sable	0.05 – 2.0
Limon	0.002- 0.05
Argile	< 0.002

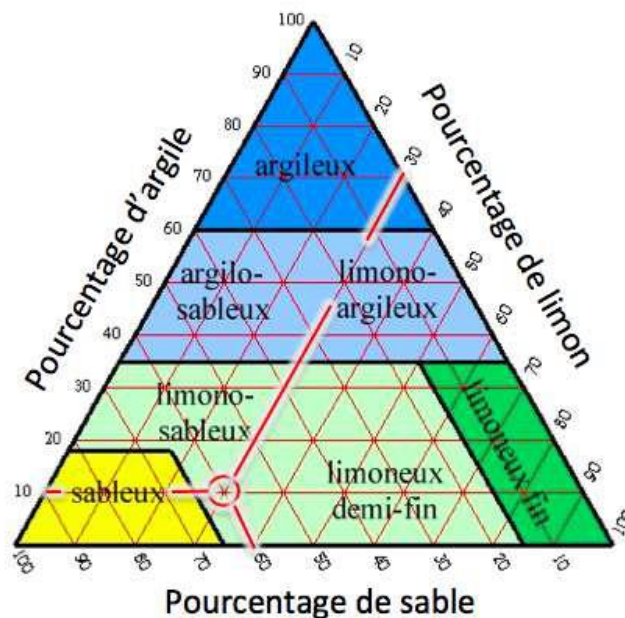


Figure I-3: Triangle textural (DUCHAUFOR, 1997)

5.2.2. Structure du sol

La structure du sol se définit comme un mode d'assemblage des particules solides du sol (sable, limon et d'argile) les unes par rapport aux autres. Elle est étroitement liée à la texture du sol (la porosité) mais également de l'état des colloïdes, de la teneur en eau ou en matière organique et, dans une large mesure, de l'activité de la faune.

Les éléments structuraux peuvent être classés par taille, mais aussi en fonction de leur forme. Selon ce dernier critère, trois classes de structures peuvent être distinguées:

a) **Structure particulière** : Le sol est alors constitué par des éléments du squelette, non agrégés. Exemple: structures cendreuse, fibreuse, feuilletée.

b) **Structure massive ou continue** : Le sol forme alors un bloc unique. Sous-classes: types ciment, grès, poudingue.

c) **Structure fragmentaire** : Les constituants élémentaires sont associés en agrégats ou en mottes. (COMBEAU et al., 2014)

Contrairement à la texture, la structure peut évoluer avec le climat, l'aération, la matière organique, ou encore avec l'activité biologique dans le sol.

C'est une propriété essentielle du sol car elle affecte la porosité, et donc la circulation des phases fluides à l'intérieur du sol, et par là même, la perméabilité et la teneur en eau (Mirsal, 2008).

5.2.3. Porosité du sol

Le sol est un milieu discontinu plus ou moins poreux. La porosité est le volume du sol qui n'est pas occupé par la matière solide. Elle donne une bonne idée de l'état structural du sol. (GOBAT, 2010). Elle joue un rôle important dans les échanges hydriques et gazeux, ainsi que dans le développement racinaire. Généralement, la compaction affecte la qualité physique du sol, elle réduit la porosité, ce qui entraîne une mauvaise aération du sol, un mauvais drainage et augmente la résistance à la pénétration des racines, par conséquent réduit la croissance et le rendement de la récolte (MCBRIDE et al., 1989).

5.2.4. Capacité de rétention en eau

La capacité de rétention est la quantité d'eau retenue par unité de poids ou de volume de sol, après que celui-ci a été complètement saturé par l'eau et s'est convenablement drainé pendant quelques jours (BRUAND et COQUET, 2006).

6. Dégradation des sols :

La dégradation des sols est un processus qui réduit ou détruit la capacité des terres pour la production agricole, végétale et animale, et pour la production forestière. Elle résulte des activités humaines: agriculture intensive, irrigation, déforestation, surpâturage, pollutions industrielles, ou de phénomènes naturels aggravés par l'effet des activités humaines. Des dégradations légères aux plus graves, ce phénomène atteint environ 20 millions de km² soit près de 60 % des sols cultivables. Des sols non cultivés sont déjà dégradés par l'érosion hydrique ou éolienne, la salinisation ou la déforestation. Aujourd'hui, des millions de personnes en subissent les conséquences. Elles seront près de deux milliards en 2020 si rien ne change (CLEMENT, 2020).

Pour l'Europe par exemple, l'Agence européenne pour l'environnement (2015) identifie les principales menaces suivantes :

- l'érosion hydrique (25 % des surfaces) ;

- le morcellement des surfaces (30 % des surfaces) ;
- l'intensification de la production agricole ;
- l'artificialisation

La dégradation peut être sous trois formes :

6.1. La dégradation physique

Elle correspond principalement à une désorganisation de leur structure, induisant :

Le tassement : qui est un mouvement d'enfoncement du sol non uniforme sous l'action d'une charge. Ce phénomène peut provoquer de graves désordres dans la structure des constructions se traduisant par l'apparition de fissures pouvant atteindre plusieurs mètres.

L'érosion : est un phénomène naturel qui affecte la croûte terrestre en entraînant sa transformation par le déplacement de matière. La mise en mouvement de la matière est possible lorsque les forces appliquées des agents de l'érosion (eau) sont supérieures à celles qui assurent la cohésion de la matière (IGHER et SEKHANE, 2017).

On peut distinguer deux types d'érosion :

L'érosion éolienne est provoquée par le vent, lorsque des particules de sol ou de roche se détachent et sont emportées. Elle ne provoque pas de phénomène violent et dangereux, mais elle participe à la perte de sols et peut accentuer les autres formes d'érosion.

L'érosion hydrique est provoquée par l'eau, lorsqu'une partie des pluies ruisselle et entraîne avec elle des particules de sol ou de roche. Ce type d'érosion intervient surtout lorsque l'infiltration de l'eau dans le sol est faible.

Le surpâturage : définit comme une pratique qui consiste à faire paître trop de bétail durant une longue période sur des terres incapables de reconstituer leur végétation, ou bien, à faire paître des ruminants sur des terres qui ne sont pas adaptées au pâturage à cause de certains paramètres physiques, tels que la pente (CLEMENT, 2020)

6.2. La dégradation chimique

Contamination et toxicité par apport de polluants organiques et minéraux, comprend les phénomènes de :

Salinisation : qui provient d'un excès de sels solubles dans la solution du sol, elle a des conséquences immédiates sur la fertilité chimique du sol mais aussi sur la structure du sol, donc sur sa fertilité physique.

Alcalisation qui se manifeste par une présence excessive de sodium dans le complexe absorbant des sols,

Acidification : l'absorption des éléments minéraux du sol par la plante, qui sont ensuite exportés dans celle-ci lors des récoltes, diminue la réserve en cations des sols. Par conséquent, si l'apport d'intrants (fumier, compost, engrais) ne vient pas compenser les exportations, petit

à petit le sol va s'appauvrir en cations (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...). Ceux-ci seront remplacés par des ions H^+ , ce qui se traduira par une acidification (CLEMENT , 2020)

Pollution du sol : Un sol est dit pollué quand il contient un ou plusieurs polluant(s) ou contaminant(s) susceptibles de causer des altérations biologiques, physiques et chimiques.

Plusieurs sources peuvent être à l'origine de la contamination des sols :

- Naturelles, liées à la nature géologique des roches et leur évolution dans le temps
- Humaines, associées notamment à des exploitations industrielles actuelles ou anciennes.

Divers polluants sont mis en évidence, tels que :

- Les éléments métalliques, qui sont fréquemment retrouvés : plomb, zinc, arsenic, chrome, cadmium... Leur présence peut être liée à l'évolution naturelle de la roche du sol ou par des impacts d'activités anthropiques.
- Les composés organiques, qui sont principalement introduits par l'homme : notamment les hydrocarbures détectés dans 40 % des sites diagnostiqués dans la base de données Basol (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), solvants halogénés comme le trichloréthylène par exemple, composés organiques volatiles (COV), etc.).

La gravité de la pollution des sols dépend de plusieurs facteurs, tel que :

- La nature du sol, qui peut impacter, selon les cas, sur la diffusion des métaux ;
- les risques de transmission d'éléments pathogènes suite au transport de terre ;
- le niveau de dégradabilité de chaque élément perturbateur/polluant ;
- la capacité même du polluant à impacter de quelque façon que ce soit le fonctionnement de la biosphère ou d'un écosystème.

6.3. La dégradation biologique

Dans le sol, l'activité biologique contrôle les processus importants qui déterminent sa fertilité: taux ou vitesse de décomposition, de minéralisation, de dénitrification ou de lixiviation. En fait, il y a une très étroite relation entre l'activité microbienne et la teneur en eau du sol.

Cette dégradation se manifeste sous forme de toxicité vis-à-vis des organismes, perte de diversité et appauvrissement biologique, espèces invasives (invertébrés du sol ou plantes) ; réduction de la quantité de la macrofaune du sol. (GUEYE et al., 2013).

6.4. Les conséquences de la dégradation des sols sur la santé :

Certains phénomènes sociaux et environnementaux contribuent à la dégradation des terres arables et des pâturages, essentiels à l'approvisionnement alimentaire et à la qualité de l'eau et de l'air. Les liens entre la dégradation des sols, la désertification et la santé sont complexes (Organisation mondiale de la santé, 2020)

La dégradation des sols et, à certains endroits, l'avancée du désert entraînent la réduction de la production agroalimentaire, l'assèchement des sources d'eau et le déplacement des populations vers des régions plus habitables. Les conséquences potentielles de la désertification sur la santé sont les suivantes:

- Augmentation du risque de malnutrition en raison d'une réduction de l'approvisionnement en nourriture et en eau;
- Multiplication des maladies à transmission hydrique et d'origine alimentaire en raison du manque d'hygiène et d'eau propre;
- Maladies respiratoires dues aux poussières provoquées par l'érosion éolienne et à d'autres polluants atmosphériques;
- Propagation de maladies infectieuses en raison des migrations.

Chapitre II : Technique de fluorescence X

1. Principe de production des rayons X :

Les rayons X sont une radiation électromagnétique découverte par Wilhelm Rontgen à la fin du XIX siècle. Ils représentent la partie du spectre électromagnétique comprise entre 100eV et 1 MeV. L'énergie contenue dans les photons X est plus grande que celle des photons lumineux et elle permet d'arracher des électrons situés au cœur des atomes. L'énergie E et la longueur d'onde λ d'un photon sont liées par la relation :

$$E = h \cdot c / \lambda \quad \text{Equation II.1}$$

Où :

h est la constante de Planck ($6,6 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$).

c la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) (THIRION-MERLE, 2014).

Un faisceau de rayon X traversant la matière est soumis à trois processus : l'**absorption**, la **dispersion** et la **fluorescence**.

Les sources de rayonnements X habituellement utilisées dans la spectrométrie de fluorescence X, sont les tubes à rayons X ou les sources radioactives (surtout pour les appareils portables). Du fait de leur énergie importante, les photons X émis par un tube ont la capacité d'arracher des électrons situés sur les couches proches du noyau des atomes. L'atome alors ionisé va tendre à revenir à l'état d'équilibre : un électron d'une couche plus externe va venir combler la lacune laissée par l'électron qui a été éjecté. Cette transition électronique s'accompagne d'une libération d'énergie sous forme d'un photon X d'énergie caractéristique de l'atome : c'est le phénomène de **fluorescence X** (THIRION-MERLE, 2014).

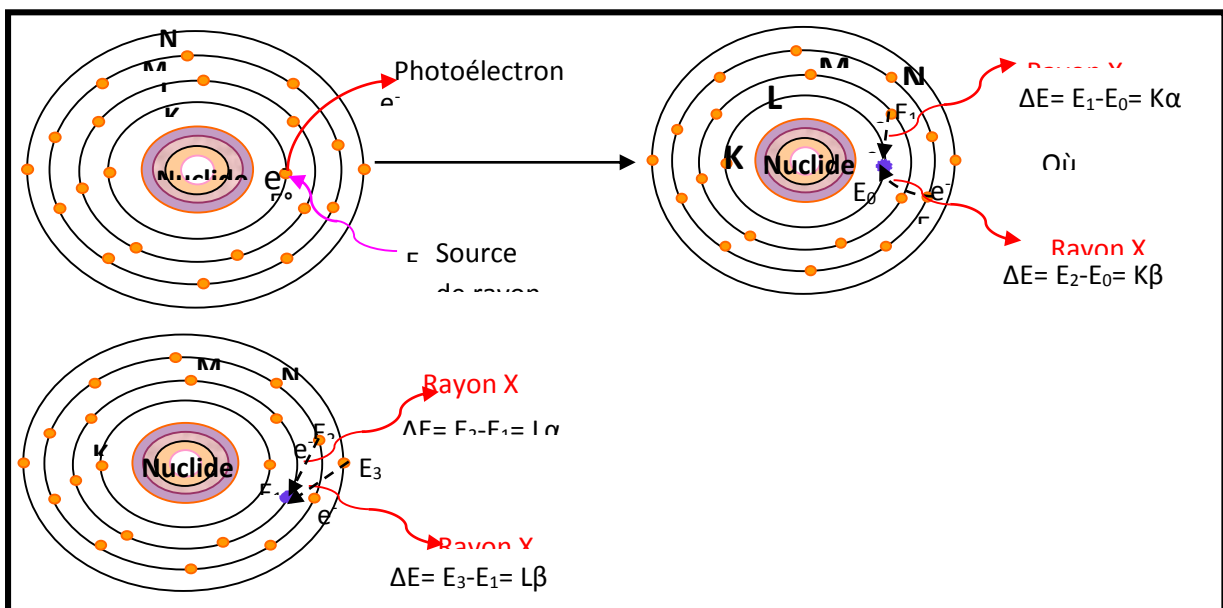


Figure II-1: Principe de la production des rayons X.

2. Principe de l'analyse par fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X, appelée XRF (X-Ray Fluorescence), est une technique rapide et non destructrice qui sert à quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides en mesurant l'intensité et l'énergie des photons X émis par l'atome bombardé aux rayons X.

Selon Isidor Adler (1966) Le principe d'analyse repose sur la comparaison de l'aire d'une raie X d'un élément d'un échantillon standard de concentration connue avec celle de la même raie X de l'élément de l'échantillon (BOULABRAOUAT, 2010).

Le spectre des rayons X accumulé pendant le processus de désexcitation révèle un certain nombre des pics caractéristiques. Les énergies des pics nous permettent d'identifier les éléments présents dans l'échantillon (analyse qualitative), tandis que les intensités des pics fournissent la concentration relative ou absolue (analyse semi-quantitative ou quantitative).

Un système typique pour la spectroscopie XRF contient une source de radiation primaire (Un radio-isotope ou un tube X) et un équipement pour la détection des rayons X secondaires.

Pour l'analyse du rayonnement de fluorescence X émis par l'échantillon, il existe deux grands types d'appareillage : les spectromètres de fluorescence X à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF, *Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry*) et les spectromètres de fluorescence X à dispersion en énergie (ED-XRF, *Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry*) (THIRION-MERLE, 2014).

3. Caractéristiques de la technique :

Limites de sensibilité : La sensibilité théorique de l'analyse par fluorescence X est exprimée pas la relation suivante :

$$S_i = \frac{I_i}{C_i} \quad \text{Equation II.2}$$

Où :

I_i : Est l'intensité de la raie caractéristique de l'élément i ,

C_i : Est la concentration de l'élément i (Toumert, 2003).

Elle est limitée par :

- **Le bruit de fond** : dû à des processus d'interactions rayonnement-matière autres que l'effet photoélectrique, tels que :

- La diffusion Rayleigh qui est une diffusion élastique (avec conservation de l'énergie cinétique). Selon Warren (1969) l'échantillon se comporte comme une sorte de miroir qui renvoie le signal du tube vers le détecteur, sans modification d'énergie ; et la diffusion est plus importante pour les échantillons lourds (BOUTAHAR, 2014).

- L'effet Compton : qui est une diffusion inélastique où le rayonnement du tube est diffusé par l'échantillon avec une perte d'énergie. Il est plus important pour des échantillons légers (MÜLLER, 1972).

- **La limite de détection**, caractéristique la plus importante dans l'analyse qualitative, représente la possibilité de détecter un élément en concentration très faible et est liée à la statistique de comptage (EBERHART, 1989).

Effet matrice : c'est les modifications du signal qui sont dus aux autres atomes qui constituent l'échantillon induisant direct une intensité d'une raie non proportionnelle à la concentration de l'élément. Il englobe deux phénomènes : l'absorption et la fluorescence secondaire, ou la surexcitation. (GALEZ, 2011).

4. Analyse par dispersion d'énergie ED-XRF :

Cet appareil est réservé à l'analyse qualitative et aux dosages de routine.

Ce spectromètre utilise les caractéristiques de proportionnalité d'un détecteur convenable pour produire une distribution de vibrations de tension proportionnelle au spectre d'énergie des photons de l'échantillon. Une optimisation de ce type de spectromètre pour la fluorescence X peut conduire à des performances égales ou même supérieures à celles d'un spectromètre à cristal analyseur (ROUESSAC, 2004).

4.1. Analyse qualitative :

Cette analyse consiste à identifier les éléments contenus dans l'échantillon en se basant sur l'énergie du rayon X émit. Ces énergies sont données par la loi de Mosley et tabulées par différents auteurs (BENAMAR, 1999).

La loi de Mosley :
$$E = R \cdot (z - \sigma)^2 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right) \quad \text{Equation II.3}$$

Où :

R : Constante de Rydberg ($R=13,6 \text{ eV}$),

z : Numéro atomique,

σ : Constante d'écran,

n et p : Nombres quantiques correspondants aux niveaux d'énergie initial et final.

4.2. Analyse quantitative :

Les concentrations des éléments détectés sont déterminées à partir des aires des raies X correspondantes.

L'intensité de la raie caractéristique d'un élément i présent dans l'échantillon est proportionnelle à sa concentration. Selon Benamar (1999) s'il n'y a aucune interaction du

rayonnement avec la matrice (milieu entourant l'élément i) l'intensité mesurée sera directement proportionnelle à la concentration (BOULABRAOUAT, 2010), suivant la relation :

$$I_i = K \cdot C_i \quad \text{Equation II.4}$$

Où :

I_i : l'intensité d'un élément i.

C_i : la concentration d'un élément i.

K : la sensibilité du dispositif XRF.

Des méthodes de correction sont utilisées si l'intensité est modifiée par l'effet matrice :

- **Méthodes relatives**

Cette méthode consiste à utiliser un standard de même nature (standard externe), ou bien d'ajouter un élément comme standard interne dans l'échantillon pour doser les éléments de numéro atomique voisin de cet élément.

Méthode des standards externes :

Elle consiste en l'utilisation des composés standards contenant des éléments identifiés, à des concentrations connues. L'irradiation des standards et des échantillons à analyser dans les mêmes conditions, permet le calcul des concentrations inconnues des éléments constituant l'échantillon (BOUDRA et al., 2010). L'expression de la concentration de l'élément à doser dans l'échantillon devient :

$$C_x = C_{ST} \cdot \frac{I_x}{I_{st}} \quad \text{Equation II.5}$$

Où :

C_x : Concentration de l'élément dans l'échantillon,

C_{st} : Concentration de l'élément dans le standard,

I_x : Intensité de l'élément dans l'échantillon,

I_{st} : Intensité de l'élément dans le standard.

Méthode du standard interne :

Cette méthode consiste à ajouter à l'échantillon un élément en proportion connue de telle manière qu'il n'interfère pas avec les éléments d'intérêt. Les concentrations des éléments présents sont calculées à partir des aires des raies X en tenant compte des facteurs de sensibilité et d'absorption (BOUDRA, 2010). De manière générale, la concentration d'un élément i est donnée par l'expression ci-dessous :

$$\frac{I_x}{I_{st}} = \frac{\sigma_x \cdot \epsilon_x \cdot C_x}{\sigma_{st} \cdot \epsilon_{st} \cdot C_{st}} \quad \text{Equation II.6}$$

Où :-

σ_{st} : Section efficace de production des rayons X de l'élément standard,

σ_x : Section efficace de production des rayons X de l'élément recherché,

ϵ_{st} : Efficacité de détecteur pour l'énergie du rayon X caractéristique de l'élément standard,

ϵ_x : Efficacité de détecteur pour l'énergie du rayon X caractéristique de l'élément recherche.

4.3. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué des éléments suivants : une source de rayonnement, un échantillon et un système de détection.

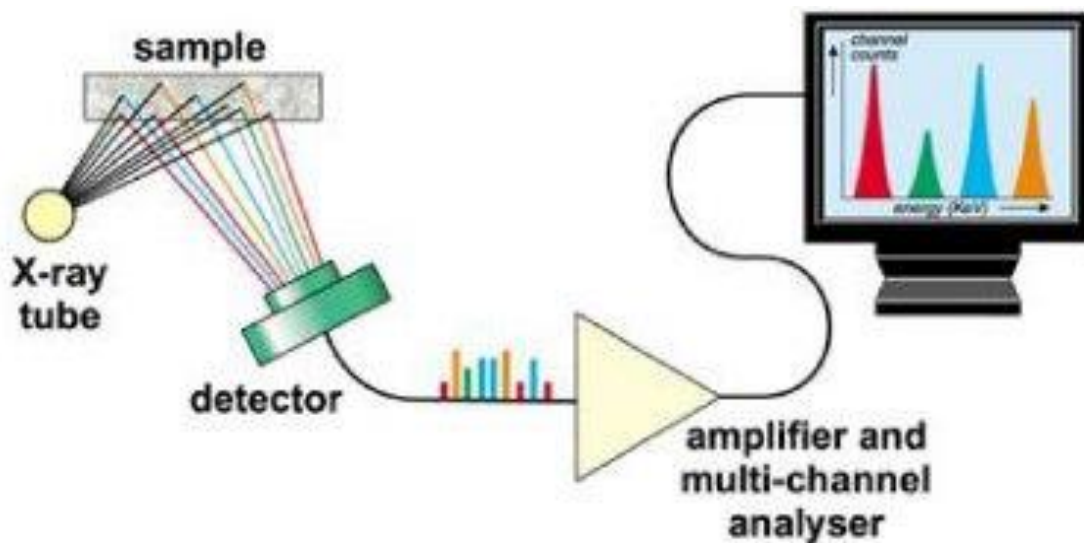


Figure II-2 : Dispositif expérimental de l'ED-XRF

Sources de rayonnements :

Il existe différentes sources radioactives pour l'excitation des échantillons à savoir des sources isotopiques émettant des rayons X ou gammas ou un tube à rayons X. Pour avoir une grande probabilité d'émission de rayons X, l'énergie du rayonnement de la source excitatrice doit être la plus proche possible de l'énergie de liaison des électrons des éléments à analyser (WOLDSETH, 1973).

Détecteur :

Il peut être de type semi-conducteur (classiquement des détecteurs Si(Li) silicium dopé au lithium) ou en silicium à diffusion. Le détecteur est capable de mesurer et distinguer les différentes énergies du rayonnement caractéristique provenant directement de l'échantillon.

Les photons X qui pénètrent dans le détecteur vont provoquer des ionisations dans le semi-conducteur, les paires électrons/trous vont migrer sous l'effet du champ électrique de polarisation et provoquer des impulsions de courant dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie du photon. Le détecteur convertit les photons X en charge électrique (THIRION-MERLE, 2014)

Amplificateur :

Il transforme le signal en impulsion électrique. Plus le photon X incident aura une énergie élevée, plus il créera de défauts dans le semi-conducteur et plus l'amplitude de l'impulsion électrique sera grande (THIRION-MERLE, 2014).

Convertisseur digital/analogique(ADC) et analyseur multi canaux (MCA)

L'ADC convertit les impulsions analogiques amplifiées par l'amplificateur en impulsions numériques. L'analyseur multicanaux est monté sur une carte incorporée à un micro-ordinateur pour stocker les informations et traiter les spectres obtenus (TOUMERT, 2003).

Logiciel de traitement des spectres X

Les spectres de rayons X enregistrés sont traités par un code de déconvolution AXIL (Analysis of X-Ray Spectre by Iterative Least-Squares Fitting). Ce code est basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires en utilisant l'algorithme de Marquardt. Lorsque deux raies sont proches en énergie (leurs pics se recouvrent) il y a une interférence, ce problème est résolu grâce à ce logiciel, en général ces calculs sont automatisés (TOUMERT, 2003).

4.4. Avantages de la spectrométrie EDXRF

- Conception d'un instrument petit et compact.
- Entretien minimal.
- Pas besoin d'eau, d'air comprimé ou de gaz
- Faible consommation électrique
- Meilleure résolution du système
- Analyse élémentaire simultanée.

5. Méthode d'analyse par dispersion en longueur d'onde WD-XRF :

L'analyse dispersive en longueur d'onde WD-XRF utilise la propriété diffractante d'un seul cristal pour séparer ou disperser la raie polychromatique de radiation du spécimen. Ces spectromètres sont connus pour leur très bonne résolution spectrale (ROUESSAC, 2004).

5.1. Principe de la technique :

Le rayonnement de fluorescence X émis par les atomes constituant l'échantillon est d'abord collimaté en un faisceau de rayons parallèles (pour concentrer le rayonnement) vers un cristal analyseur ; qui est taillé suivant un plan réticulaire donné (de distance inter-réticulaire connue, d). Le faisceau diffracté par le cristal est alors dirigé vers un système de détection placé tel que lorsque le cristal varie d'un angle θ , le système de détection varie d'un angle 2θ . (RON

JENKINS, 1981). Cette géométrie fait que les détecteurs mesurent la partie du rayonnement diffracté par le cristal suivant l'angle θ , c'est à dire la partie du spectre, de longueur d'onde λ , qui obéit à la condition de Bragg :

$$n \cdot \lambda = 2 d \cdot \sin\theta. \quad \text{Equation II.7}$$

Où λ : longueur d'onde du rayonnement X incident,
 n : ordre de la réflexion (entier positif),
 d : distance interréticulaire du cristal analyseur,
 θ : angle d'incidence du rayonnement X.

5.2. Le dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est constitué des éléments suivants : une source de rayonnement, un échantillon et un système de détection.

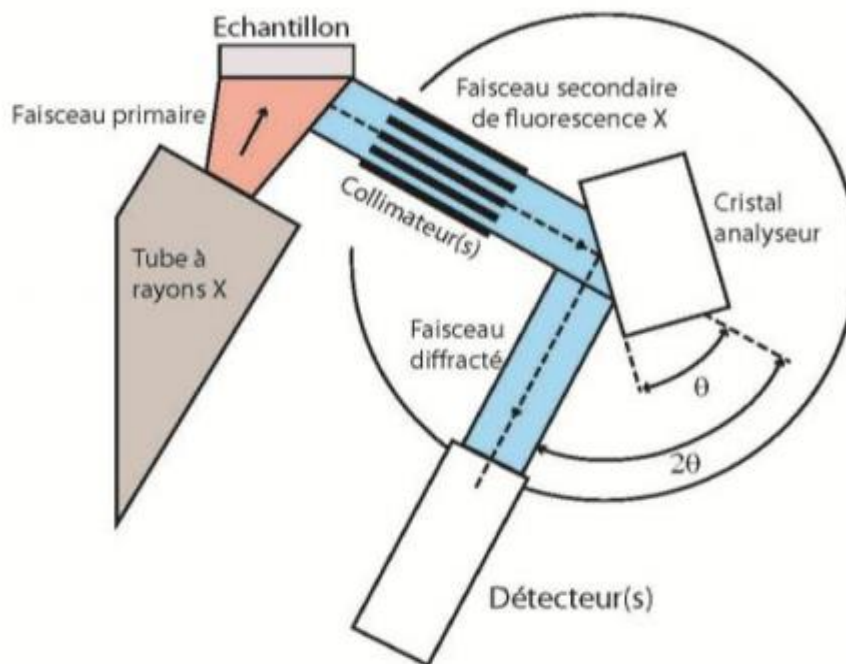


Figure II-3: Le dispositif expérimental de WD-XRF

Source de rayonnement :

C'est un tube à rayons X, sous vide, constitué de deux électrodes :

- la cathode : filament de tungstène porté à haute température.
- l'anode : la partie positive du tube, composée principalement du rhodium.

Les électrons émis de la cathode par un mécanisme de thermo émission sont soumis à une différence de potentiel, qui les accélère vers l'anode avec une grande vitesse à l'aide d'un

générateur de haute tension. Lorsque les électrons accélérés bombardent l'élément constituant la cible, il y a émission de rayons X (CAMARILLO, 2007).

Filtre Primaire :

Situé entre le tube et l'échantillon, il sert à filtrer les composantes du rayonnement du tube qui sont indésirables ou susceptibles de provoquer des interférences (PAGNON, 2011).

Collimateur :

Les rayons X passent d'abord par un masque de diamètre en fonction du modèle du porte-échantillon utiliser et sélectionne le rayonnement provenant de l'échantillon et élimine celui du porte-échantillon. Le collimateur a pour rôle la production de faisceau parallèle à partir du faisceau divergent produit par l'échantillon (GEISLER, 2015)

Cristaux analyseurs :

Les cristaux analyseurs les plus courants sont faits de fluorure de lithium (LiF), du germanium, ou des cristaux composites (multicouche). La valeur $\langle d \rangle$ (distance inter-réticulaire) d'un cristal ne permet pas de balayer efficacement l'ensemble du domaine de longueur d'onde. D'où la nécessité de l'utilisation de plusieurs cristaux (HAMMADI, 2002)

Détecteurs:

Ils convertissent le signal lumineux (i.e. les photons X) renvoyés par le spectromètre en un signal électrique qui sera ensuite digitalisé puis lu par l'informatique. La détection des rayons X est basée sur leur pouvoir ionisant (BOULABRAOUAT, 2010).

5.3. Analyse qualitative et quantitative

L'analyse qualitative du spectre est obtenue en faisant varier l'angle θ , et en utilisant successivement plusieurs cristaux (donc avec des valeurs de d différentes), il est possible d'identifier tous les atomes constituant l'échantillon.

L'intensité de chaque pic d'un élément identifié peut être exploitée pour une analyse quantitative à travers une courbe d'étalonnage établie à l'aide d'échantillons standards.

5.4. Avantages de la spectrométrie WD-XRF

- Haute résolution, en particulier pour les éléments légers.
- Limites de détection basses, en particulier pour les éléments légers.
- Analyse robuste.
- Rendement élevé.

6. Rendement de la fluorescence :

- Le rendement quantique de fluorescence φ_{flu} est le rapport du nombre de photons émis par fluorescence sur le nombre de photons absorbés par l'échantillon. En d'autres termes, le rendement quantique représente la probabilité que l'état excité de notre système relaxe par fluorescence plutôt que par d'autres mécanismes non radiatifs (conversion interne, conversion inter-système,...) selon Sanyo Hamai (1983) rapporté par Marmois (2008).
- Afin d'éviter les effets de réabsorption, la D.O. de l'échantillon considérée doit être inférieure à environ 0.1 cm^{-1} . Ainsi, il est possible de déduire le rendement quantique de fluorescence φ_{flu} d'un échantillon i en utilisant la formule suivante :

$$\varphi_{\text{flu}} = \varphi_{\text{fluost}} \left(\frac{S_i}{S_{\text{st}}} \right) \left(\frac{n_i^2}{n_{\text{st}}^2} \right) \quad \text{Equation II.8}$$

Où :

- φ_{fluost} est le rendement quantique connu d'un échantillon standard parfaitement caractérisé.
 - S_i et S_{st} sont les intégrales des spectres de fluorescence préalablement corrigés des échantillons i et standard.
 - n_i et n_{st} sont les indices de réfraction des solvants dans lesquels sont dilués les échantillons i et standard.
- Cas particulier :
- $\varphi_{\text{flu}} = 0$ (molécule non fluorescente)
 - $\varphi_{\text{flu}} = 1$ (pas d'autres processus de désexcitation)

7. Limites de l'analyse par fluorescence des rayons X

- Malheureusement, la procédure XRF souffre d'un manque de sensibilité sur les très faibles teneurs et sur les éléments légers ; Ceci est dû au fait que le rayonnement des rayons X des éléments plus légers est absorbé trop facilement et ne peut donc pas pénétrer dans le détecteur.
- La sensibilité de la fluorescence est en fonction du pH et de la température lorsque la fluorescence est mesurée en solution. De plus, à forte concentration la réponse captée par le détecteur n'est plus linéaire puisque le détecteur devient saturé (KARUMANCHI, 2011).
- Les techniques utilisant la fluorescence sont aussi affectées par la présence d'autres substances qui peuvent absorber une partie de la lumière excitatrice (GEISLER, 2015).
- Pour une grande exactitude, exige une référence similaire à l'échantillon test.

8. Comparaison entre la WD-XRF et ED-XRF :

Le tableau ci-dessous résume les différences entre les deux techniques :

Tableau II-2: Comparaison entre la WD-XRF et ED-XRF

Méthode	Géométrie	Faisceau/ optique
WD-XRF	Tube X-filtre-échantillon-cristal-détecteur	Faisceau quasi-monochromatique. Système à vide. Optique Robuste.
ED-XRF	Tube X-échantillon-détecteur	Peut être diverse.

9. Domaine d'application de la fluorescence X :

La fluorescence X était conçue pour l'analyse dans l'industrie chimique, aujourd'hui on l'applique dans divers domaines : la médecine, la biologie, l'industrie du pétrole et du charbon, l'industrie du ciment et l'analyse des roches.

Dans l'industrie de l'acier et du fer, la fluorescence X est souvent utilisée pour déterminer la composition des produits. La précision est dans la plupart des cas aussi bonne que dans les méthodes chimiques, mais la fluorescence X est beaucoup moins chère et exige moins de temps.

Dans l'industrie des métaux légers, la fluorescence X est souvent utilisée pour la détermination des substances contaminants dans des produits ultra-purs.

L'industrie du ciment se sert de la fluorescence X pour l'analyse quantitative de ses produits. Les éléments Mg, Al, Si, Ca et Fe peuvent être facilement déterminés dans des poudres tandis que les éléments plus légers comme Na et Al doivent être dissous (BRUNDLE, 1992)

Un domaine particulièrement performant est l'analyse des éléments traces dans des roches parce qu'ici les intensités de fluorescence sont directement proportionnelles à la concentration. Les limites de détection dans cette application sont entre 1 et 20ppm. (ROTHWELL, 2006)

La détection des éléments traces est aussi une application majeure dans les industries du pétrole et du charbon. Les limites de détection directe sont de 1 à 2 ppm (NADKARNI, 2005).

L'analyse par fluorescence X est également très populaire pour l'achat d'or et l'analyse d'œuvres d'art en raison de sa méthode conviviale pour les échantillons.

Dans l'industrie chimique, l'application principale est la détermination des teneurs en éléments traces lourds comme Pb, As, Cu, Ni, Hg et Se qui sont nocifs ou Ti, Mn, Co, Zn, Sb, Cl et Al qui polluent la production de plastique (BOUGHERARA, 2011).

En médecine, la fluorescence est utilisée en raison d'une plus grande rapidité et d'une meilleure précision par rapport aux autres méthodes d'analyse.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude :

Les monts de Béni-Chougrane se trouvent dans le nord-ouest algérien. Ils sont l'un des principaux monts chaînés du tell occidental de l'Oranie, avec une superficie de 2860 km². Le bassin versant de l'Oued Fergoug, qui est l'objet d'étude, fait partie des monts de Béni-Chougrane qui sont sujets aux activités intenses du phénomène d'érosion (MORSLI et al., 1996). Il couvre une superficie de 142 km² sur l'ensemble du grand bassin versant de l'Oranie Chott-Chergui.



Figure III-1: Localisation du bassin versant d'Oued Fergoug (Google Map)

Le bassin versant de Fergoug est limité au nord par la daïra de Mohammadia, au sud par la plaine de Ghriss, au sud-ouest par la daïra de Bouhanifia, à l'ouest par la Daïra de Sig et à l'est par la Daïra de Aïn Farès (figure III-1). Il est caractérisé par une lithologie fragile, représentée par des roches souvent tendres et un relief escarpé et fortement disséqué, présentant souvent de fortes pentes. La couverture végétale est profondément dégradée sous l'effet des facteurs anthropique (SOUIDI et al., 2017)

1.1. Aspects physiques de la zone d'étude :

Climat

Le climat d'une région est la résultante de divers phénomènes: la température, la pression atmosphérique, la pression barométrique, les vents, l'humidité de l'air, la nébulosité et les pluies. Il détermine le potentiel agricole d'une région et influe sur le développement des plantes, la formation et l'évolution des sols.

L'Algérie est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par des pluies concentrées et une température relativement basse en hiver et assez chaud en été. Le climat qui règne dans la région de Fergoug tend à être aride, ce qui menace la productivité de la région.

En effet depuis deux décennies il a été constaté une diminution constante des précipitations : dans les années 1990, la moyenne était de 400 à 500mm/an, alors au cours de ces dernières années elle n'est que de 300 à 400mm/an (MORSLI et al., 1996).

Une étude du climat de la zone d'étude nous éclairera certainement sur les différents facteurs du climat et leur influence sur la distribution des éléments dans le sol. Pour cela nous utiliserons les données météorologiques de l'ONM d'Alger relatives aux stations de Mascara.

Précipitation :

Dans la région de Fergoug, les conditions climatiques font en sorte que les précipitations saisonnières sont très contrastées et irrégulières. Des pluies fréquemment brutales dont l'essentiel se concentre sur quelques jours pendant la saison humide sont assez fréquentes (BOUCHETATA et BOUCHETATA, 2006). Les pluies agressives exceptionnelles qui s'abattent sur la région, en déclenchant le ravinement et des glissements de terrain, charrient d'énormes quantités de sédiments vers les réservoirs d'eaux.

L'analyse des précipitations est réalisée à travers l'étude du régime mensuel des précipitations.

Le tableau ci-dessous représente les précipitations moyennes mensuelles (mm) des stations de Mascara (Altitude : 511m, Latitude : 35°13N, Longitude : 00°09W) de 1998 à 2008 :

Tableau III-1: Précipitations moyennes mensuelles (mm) des stations de Mascara Ghriss

Année	Janv	Fevr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dece	Annuel
1998	24,2	34,5	7,2	39,0	52,2	0,0	0,6	2,6	1,1	5,1	11,1	25,9	203,5
1999	40,7	38,2	41,2	0,0	3,0	0,4	0,1	0,0	37,6	27,8	48,4	38,8	276,2
2000	0,0	0,0	4,8	21,4	20,6	0,0	0,5	5,8	19,9	56,1	72,4	15,6	217,1
2001	39,9	41,1	6,7	20,5	20,0	1,0	0,1	0,2	2,9	17,1	78,3	26,3	254,1
2002	3,3	0,0	27,2	45,7	49,0	0,2	0,0	13,9	0,2	16,0	63,9	11,6	231,0
2003	86,0	58,4	23,5	54,2	9,5	9,8	0,8	1,7	15,8	38,7	30,8	50,3	379,5
2004	38,0	48,9	16,3	22,2	91,3	13,8	0,7	4,5	37,1	40,4	47,0	66,0	426,2
2005	17,5	20,2	24,3	8,6	0,4	3,3	1,2	0,0	20,4	31,7	96,6	16,0	240,2
2006	80,0	32,7	13,4	14,9	35,2	8,1	4,1	0,0	4,8	4,8	3,6	90,2	291,8
2007	44,9	43,4	54,9	64,0	2,1	0,2	1,7	0,0	55,8	103,3	37,6	11,6	419,5
2008	26,3	13,5	-	-	47,6	5,7	12,1	2,5	15,3	44,1	63,8	82,3	313,2
Moyen	39,0	34,1	22,6	37,2	29,1	10,0	2,9	7,2	21,6	32,7	49,6	38,3	319,7

La pluviométrie est extrêmement variable d'une année à l'autre et d'une saison à une autre. Elle est concentrée en quelques mois et le nombre de jours de pluies est relativement

restreint. Ces pluies ne durent jamais plus que quelques heures et constituent donc presque toutes les pluies torrentielles (BENCHETRIT et al., 1972).

Pour la période de 1998-2008 ; la pluviométrie s'observe généralement en automne, et en hiver surtout. Le mois de novembre enregistre d'importantes précipitations presque chaque année avec une moyenne de 49.6mm suivie du mois de janvier et décembre.

Les ans 2004 et 2007 étaient les plus arrosés de cette période avec des quantités de 426 mm et 419,5mm respectivement.

Les mois de juillet et août sont les plus secs de chaque année avec une pluviométrie quasi-nulle.

Vent :

Il constitue un des facteurs reconnus dans la caractérisation du climat méditerranéen, le vent est caractérisé par sa direction, sa force et sa fréquence. C'est un facteur important d'érosion (érosion éolienne) et de transport des sédiments à la surface de la planète. Il est particulièrement actif dans les régions sèches où la végétation est quasi-absente, comme les déserts (BOUZID, 2005)

Le tableau ci-dessous représente les moyennes mensuelles des vitesses du vent de la station de Mascara allant de 1998 à 2008 :

Tableau III-2: Moyennes mensuelles des vitesses du vent (m/s) de la station de Mascara allant de 1998 à 2008

Année	Janv	Fevr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dece	Annuel
1998	3,5	2,1	1,7	3,9	3,3	3,1	2,6	3,1	2,7	2,0	1,2	1,8	2,6
1999	2,5	1,5	2,3	2,1	2,1	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0	1,2	2,0	2,0
2000	0,8	1,1	1,7	3,1	2,3	2,1	2,2	2,3	1,9	1,9	1,9	2,3	2,0
2001	2,4	1,5	1,8	1,7	2,0	1,9	2,2	1,6	1,7	1,5	1,3	1,4	1,7
2002	1,4	1,2	2,0	2,4	2,3	2,7	1,8	1,9	1,7	1,8	1,9	2,5	2,0
2003	2,5	2,2	1,6	2,1	2,2	2,1	1,9	1,8	1,8	1,8	2,3	2,7	2,1
2004	1,8	2,0	1,8	2,6	2,4	1,9	2,1	2,3	2,5	2,1	1,6	2,4	2,1
2005	1,6	2,2	1,9	2,3	2,2	2,2	2,2	1,8	1,9	1,6	2,0	1,6	2,0
2006	2,2	1,9	1,8	1,9	2,1	2,0	1,9	1,6	1,8	1,5	2,1	1,9	1,9
2007	1,1	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,5	1,8	2,2	2,3	1,9	2,3	1,8
2008	2,1	2,9	-	-	3,7	2,9	3,0	2,4	2,6	3,5	3,3	3,7	3,0
Moyen	2,0	1,8	1,8	2,4	2,4	2,2	2,1	2,0	2,1	2,0	1,9	2,2	2,1

La force du vent reste constante toute l'année a une valeur moyenne au tour de 2m/s et est relativement faible et rarement violente. Selon l'échelle de Beaufort, cette région présente un degré 2, vent caractérisé par une légère brise.

Température :

La température constitue le facteur essentiel différenciant les saisons qui joue un rôle important dans la végétation.

Le tableau ci dessous représente les moyennes mensuelles des températures moyennes de la station de Mascara pour la période 1998 – 2008.

Tableau III-3: Moyenne mensuelle des températures moyennes (°C) de la station de Mascara allant de 1998 à 2008

Année	Janv	Fevr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	Annuel
1998	10,3	11,8	12,7	15,1	17,5	24,4	27,7	28,1	24,4	17,3	12,9	9,2	17,7
1999	10,0	8,2	13,0	15,8	22,0	24,2	27,6	28,5	23,8	21,8	11,5	9,4	18,1
2000	8,2	11,6	14,0	16,2	20,9	25,4	28,3	28,6	23,4	17,1	13,8	12,6	18,4
2001	10,7	10,2	15,9	15,5	18,2	26,0	27,9	29,0	24,5	22,9	12,8	10,1	18,7
2002	10,3	11,2	13,7	14,9	19,4	26,9	26,3	25,8	22,9	19,9	13,8	12,8	18,2
2003	8,4	9,1	13,9	14,5	19,1	27,2	30,0	28,8	23,7	19,7	13,9	10,1	18,3
2004	10,0	11,9	12,4	14,4	16,4	24,1	27,8	29,2	25,3	21,3	12,1	9,4	17,9
2005	7,1	6,8	12,9	15,1	21,7	24,9	28,9	27,1	22,7	20,6	13,1	9,4	17,6
2006	8,3	9,0	13,3	18,0	22,3	24,7	29,0	27,0	23,1	21,5	16,2	10,4	18,6
2007	10,4	12,1	10,9	14,0	18,9	22,7	28,0	27,8	23,9	17,7	12,1	9,2	17,3
2008	9,9	11,9	-	-	18,1	23,7	28,4	28,4	23,7	19,0	11,4	8,8	18,4
Moyen	9,8	10,3	13,1	15,3	19,3	24,7	27,7	27,6	23,5	19,6	13,2	10,3	18,0

La température moyenne est de 18°C. Les valeurs mensuelles maximales et minimales moyennes sont respectivement de 27,7 et 9,8°C. Le mois de janvier présente les plus basses températures, alors que le mois d'août est le mois le plus chaud.

1.2. Synthèse climatique :

Pour estimer rapidement l'influence des principaux éléments et afin de caractériser le climat de Mascara, divers systèmes sont proposés. Les plus utilisés en région méditerranéenne sont : Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) et le climagramme pluviométrique d'Emberger.

Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen:

Ce diagramme met en évidence la période de sécheresse et son intensité dans une région donnée. **Bagnouls et Gaussen (1957)** se sont basés sur la formule $P = 2xT$ (°C) et considèrent qu'un mois est sec lorsque le total des précipitations moyennes exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne en degré Celsius ($P \leq 2T$).

Ces auteurs préconisent pour la détermination de la période sèche (suite de mois secs) de tracer un diagramme sur lequel la température est portée à une double échelle de celle des précipitations. La durée de cette période sèche ressort matérialisée par la surface de croisement où quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes.

Mais, ils présentent l'inconvénient de ne pas faciliter la comparaison entre les stations. (IGUER et SEKHANE, 2017)

Le tableau suivant présente les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes mensuelles de la station de Mascara pour la période de 1998-2008 :

Tableau III-4: Les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes mensuelles de la station de Mascara pour la période de 1998-2008

Mois	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
T (°C)	9,8	10,3	13,1	15,3	19,3	24,7	27,7	27,6	23,5	19,6	13,2	10,3
P(mm)	39,0	34,1	22,6	37,2	29,1	10,0	2,9	7,2	21,6	32,7	49,6	38,3

La figure suivante représente le diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gausson pour la période de 1998-2008.

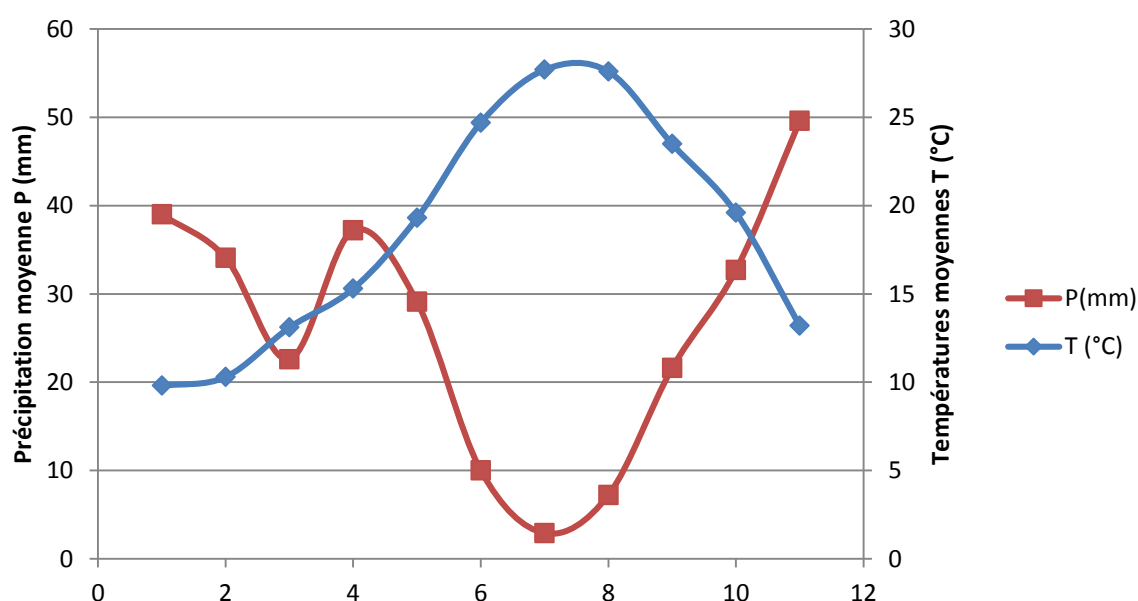


Figure III-2: Diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gausson pour la période de 1998-2008

D'après le diagramme obtenu la période sèche s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'octobre. Ainsi, la région de Mascara compte environ 6 mois sur 12 de sécheresse.

La durée de la saison sèche varie en fonction de l'altitude et de l'exposition. D'une part, elle est beaucoup plus tardive et plus courte en haute altitude et d'autre part, pour une même altitude, elle est plus longue et plus précoce sur l'exposition sud que nord.

1.3. Quotient pluviométrique :

Il est utilisé pour la délimitation des aires occupées par divers ensembles de végétation. La méthode d’Emberger permet l’étude du climat à partir d’un quotient pluviométrique dont la formule est la suivante :

$$Q = \frac{2000.P}{M^2 - m^2} \quad \text{Equation III.1}$$

Où :

Q : quotient pluviométrique d’Emberger ;

P : précipitation moyenne annuelle en mm ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (en degré kelvin) ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid en (degré kelvin).

Stewart (1969) a simplifié l’équation d’Emberger pour pouvoir l’appliquer dans un climat Méditerranéen en Algérie. (IGUER et SEKHANE, 2017)

$$Q = \frac{3.43.P}{M - m} \quad \text{Equation III.2}$$

Où :

P : précipitation moyennes annuelle (mm)

M : température moyenne des maximales du mois le plus chaud (°C)

m : température moyenne des minimales du mois le plus froid (°C)

3,43 est le coefficient de Stewart établi pour l’Algérie

En effet, une région est d’autant plus sèche que « M-m » est plus élevée (HALIMI, 1980). Le tableau montre le quotient pluviométrique calculé pour la région de Fergoug :

Tableau III-5 : Quotient pluviométrique calculé pour la région de Fergoug

La méthode	Q
Emberger (mm K-1)	61,22
Stewart (mm K-1)	61,26

Les valeurs de Q montrent que la région du sous bassin versant de Fergoug était semi aride

Tableau III-6: Correspondance entre étage de la végétation et variance thermique (IGUER et SEKHANE, 2017)

P (mm)	Q	Bioclimat
<100	<10	Per-aride
100-400	10-45	Arde
400-600	45-70	Semi-aride
600-800	70-110	Subhumide
800-1200	110-150	Humide

1.4. Pédologie :

Dans les monts de Béni Chougrane, on distingue différents types de sols, notamment les sols vertiques, les sols bruns, les sols fersialitiques et les sols peu évolués (MORSLI, 1996). Ce sont des sols jeunes et peu évolués, liés à la roche mère et possédant le plus souvent des propriétés de cette dernière, les roches meubles essentiellement marneuses sont les plus répandues. Pour le site du bassin versant d'Oued fergoug, il se caractérise par un sol peu évolué occupant souvent le haut des versants. Sur grès, l'horizon de surface est limono-sableux, tandis qu'en profondeur, la texture est sableuse et il est moins riche en éléments nutritifs. Le complexe absorbant est dominé par le calcium. Le pH est légèrement alcalin. La principale cause de leur non développement c'est l'érosion, car la majorité d'entre eux sont situés sur des versants à fortes déclivités (IGUER et SEKANE, 2017).

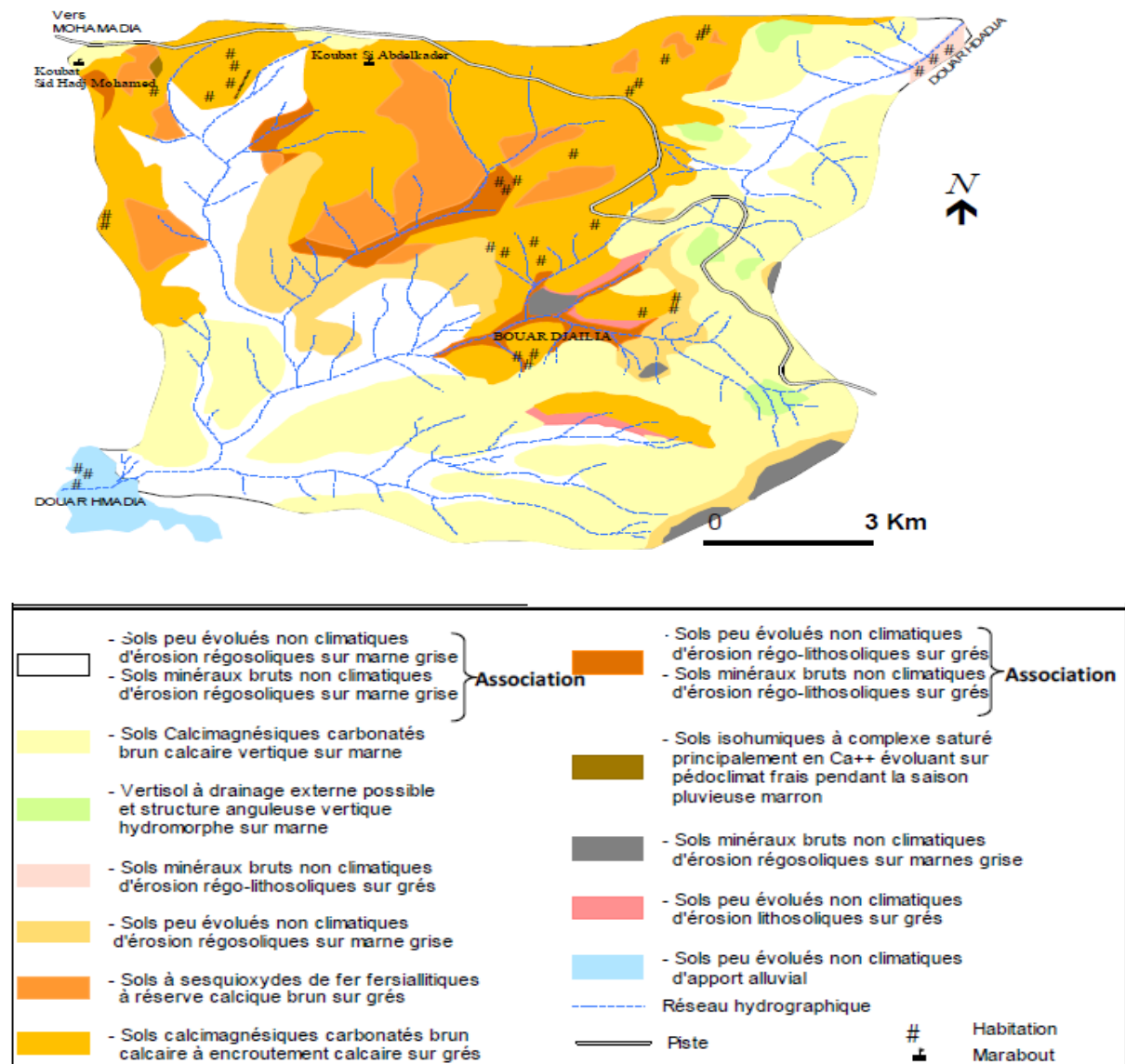


Figure III-3: Carte pédologique du bassin versant de Fergoug (MORSLI, 1996).

1.5. Lithologie :

La roche mère de cette région est une roche sédimentaire. Le sol est généralement constitués de couches argilo-marneuses avec des bancs de grès. Dans la région on trouve une prédominance de marnes vertes avec des passages très riches en macrofaunes. Des marnes argileuses assez imperméables et peu résistantes à l'érosion. Les formations géologiques de la région sont très sensibles à l'érosion, la principale source de sédiments provient des formations tendres (marne, marno-calcaire, grès tendre...) (IGUER et SHEKANE, 2017).

La carte lithologique du BV de l'Oued Fergoug, laisse apparaître une grande diversité de formations superficielles avec prédominance de sols argileux issus des formations marneuses.

Quatre grands ensembles géologiques sont distincts :

- Des marnes d'âge crétacé, très fracturée et des affleurements éocènes qui forment le soubassement.
- Un ensemble de couches marneuses et gréseuses miocènes.
- Des témoins sablo-gréseux d'âge pliocène.
- Des alluvions et des dépôts de pente quaternaires, d'épaisseur faible par rapport aux autres ensembles (BOUTKHIL, 2015).

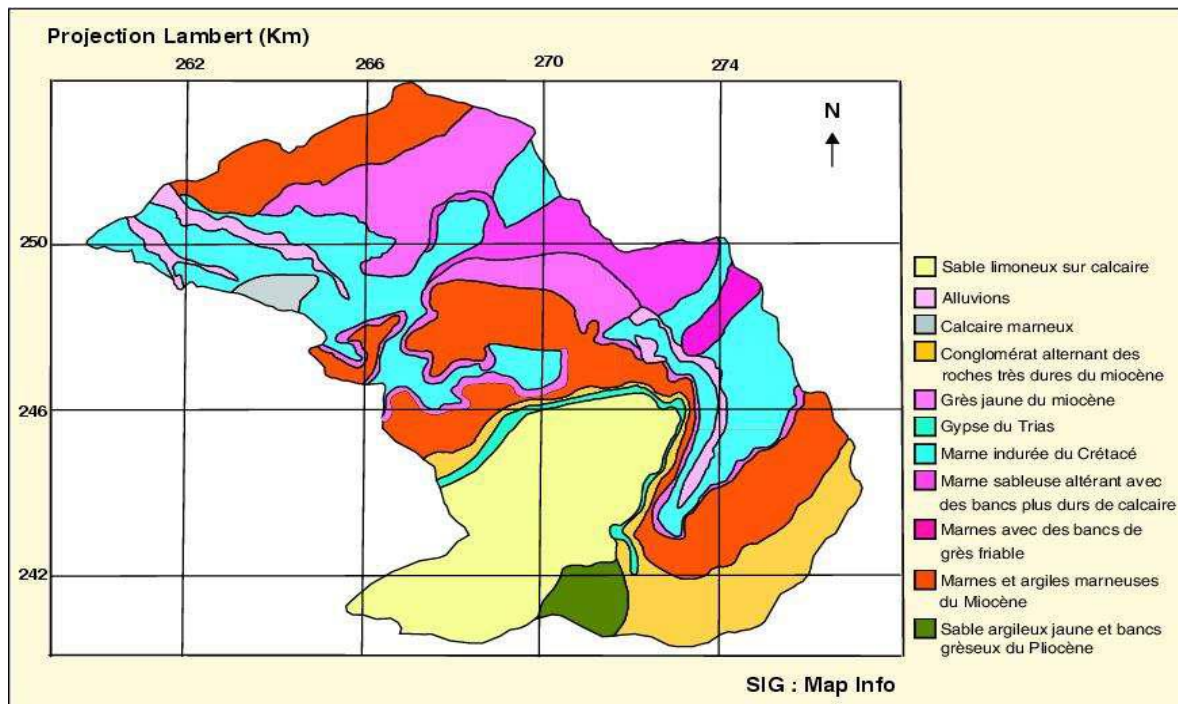


Figure III-4: Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Fergoug (BOUCHETATA, 2006)

2. Prélèvements et échantillonnages

2.1. Choix des sites et méthodologie d'échantillonnage :

L'échantillonnage consiste à prélever des échantillons de sols représentatifs d'un site donné afin de déterminer les éléments qui le caractérisent.

Un choix d'un site de référence est une étape importante lors de l'échantillonnage, ce site doit avoir presque les mêmes caractéristiques et être soumis aux mêmes conditions que le site d'étude. La distance entre le site de référence et le site d'étude doit être inférieure à 1km. Ainsi, des études météorologiques sont nécessaires pour le choix des deux sites.

Dans le cadre de ce travail, une mission de terrain a été programmée en avril 2016 au niveau du sous bassin versant de Fergoug. Deux sites de référence, supposés non perturbés, et deux sites d'études ont été choisis par des experts.

Site de référence :

Le site de référence doit, comme mentionné ci-dessus, avoir les mêmes caractéristiques que le site d'étude comme il doit être un terrain avec une pente faible (terrain plat).

L'échantillonnage pour un site de référence consiste à délimiter une surface de 20cm x 20cm. Des prélèvements superficiels sont réalisés tous les 10m à l'aide d'un cadran en fer de dimension 25cm x 5cm x 5cm et une carotte de 70cm de profondeur et de diamètre de 9,1cm (Figure III.5). Cette dernière est par la suite coupée en tranches de 2cm jusqu'à une profondeur de 20cm, puis en tranches de 5cm jusqu'à une profondeur de 40cm et enfin des tranches de 10cm au-delà de 40cm.

Les échantillons sont numérotés et mis dans des sachets en plastiques avant d'être analysés.

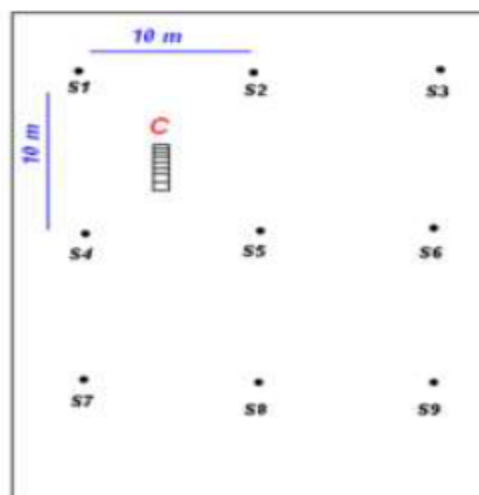


Figure III-5 : Schéma d'échantillonnage dans un site de référence.

Site d'étude :

Ce site doit avoir une pente le long de la direction de culture et l'échantillonnage se fait de la même technique que le site de référence.

Pour ce site, une surface de 60mx30m, qui tient compte des fortes pentes et pour avoir une pente homogène sur tout le site, a été délimitée. 9 points de prélèvement en profondeur et 12 point de prélèvement en surfaces ont été effectués.

Les échantillons sont ensuite numérotés et mis dans des sachets en plastiques avant d'être analysés.

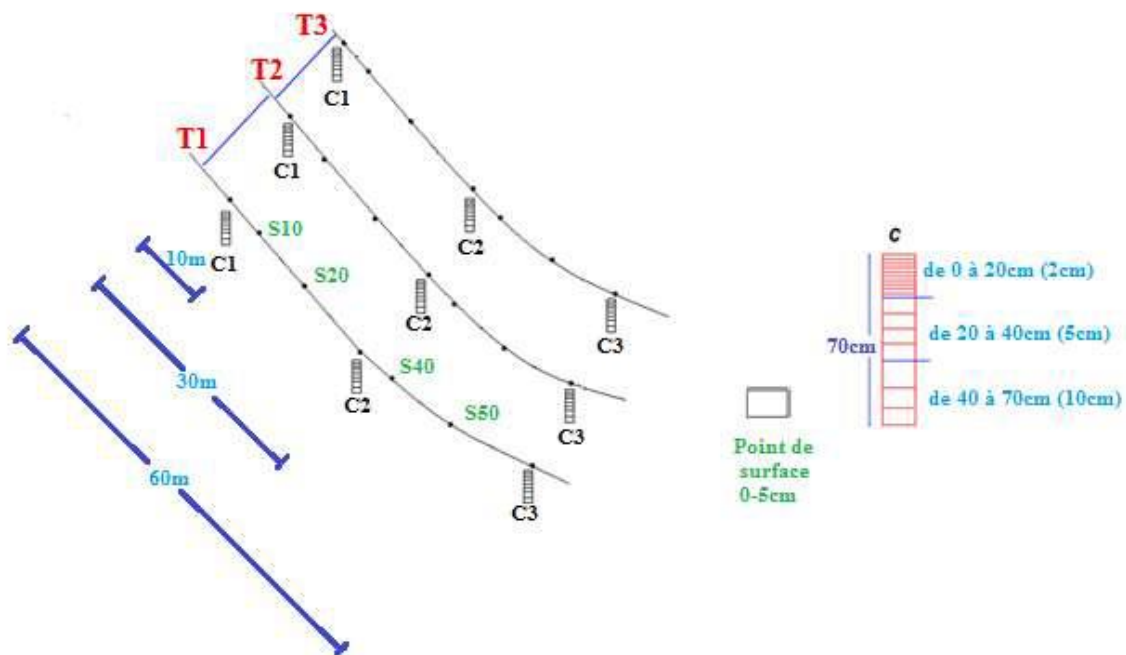


Figure III-6 : Schéma d'échantillonnage dans un site d'étude.

2.2. Préparation des échantillons :

Une fois au laboratoire, les échantillons sont séchés à l'air libre pour être ensuite broyés d'une manière très fine et tamisés à l'aide d'un tamis de diamètre de $\varnothing = 0.2$ mm. Les échantillons sont séchés une deuxième fois à 105°C pendant 2h pour être tamisés.

Les échantillons ainsi préparés seront analysés par la technique de la fluorescence X.



Figure III-8: Broyage



Figure III-7 : Tamisage



Figure III-9 : Séchage à l'étuve

- **Analyse par ED-XRF :**

Une masse de 3g d'échantillon du sol est pesée puis encapsulée dans des portes échantillons en polypropène.

- **Analyse par WD-XRF :**

Les échantillons sont mélangés et pesés d'une masse de 8g. Ensuite, ils ont été mis sous forme de pastille à l'aide d'une presse hydraulique pour obtenir une surface lisse et homogène.

3. Analyse des échantillons de sol

Le but de cette analyse est d'identifier les éléments présents dans notre site, ainsi que leur teneur. Ces informations permettront par la suite d'établir la distribution de chaque élément, en fonction des profondeurs, dans sol étudié.

Le choix de cette technique nucléaire s'est basé sur les nombreux avantages qu'elle présente à savoir :

La rapidité ; permettant d'avoir les résultats dans des délais les plus bref,

Le caractère non destructif ; permettant la préservation des échantillons analysés.

3.1. Caractéristique de l'ED-XRF

L'appareil de fluorescence X à dispersion d'énergie est composé de :

- Un Détecteur SDD (Silicon Draft Detector) pour obtenir le spectre de l'échantillon. Ce détecteur occupe une Surface de 25 mm^2 , sa résolution pour les rayons γ est de 130 eV.
- Un mini tube de rayon X équipé d'une anode argenté (avec un voltage élevé de 30 kV et un courant maximum de $25 \mu\text{A}$).
- L'angle d'excitation et d'émergence : $67,5^\circ$.
- Le système est contrôlé par un ordinateur équipé d'un logiciel d'analyse.
- La Distance entre le tube de rayon X et l'échantillon est de 33,9 mm, et celle entre l'échantillon et le détecteur est de 15,9 mm.
- Temps de récolte : 300 secondes. (AZBOUCHE, 2013)

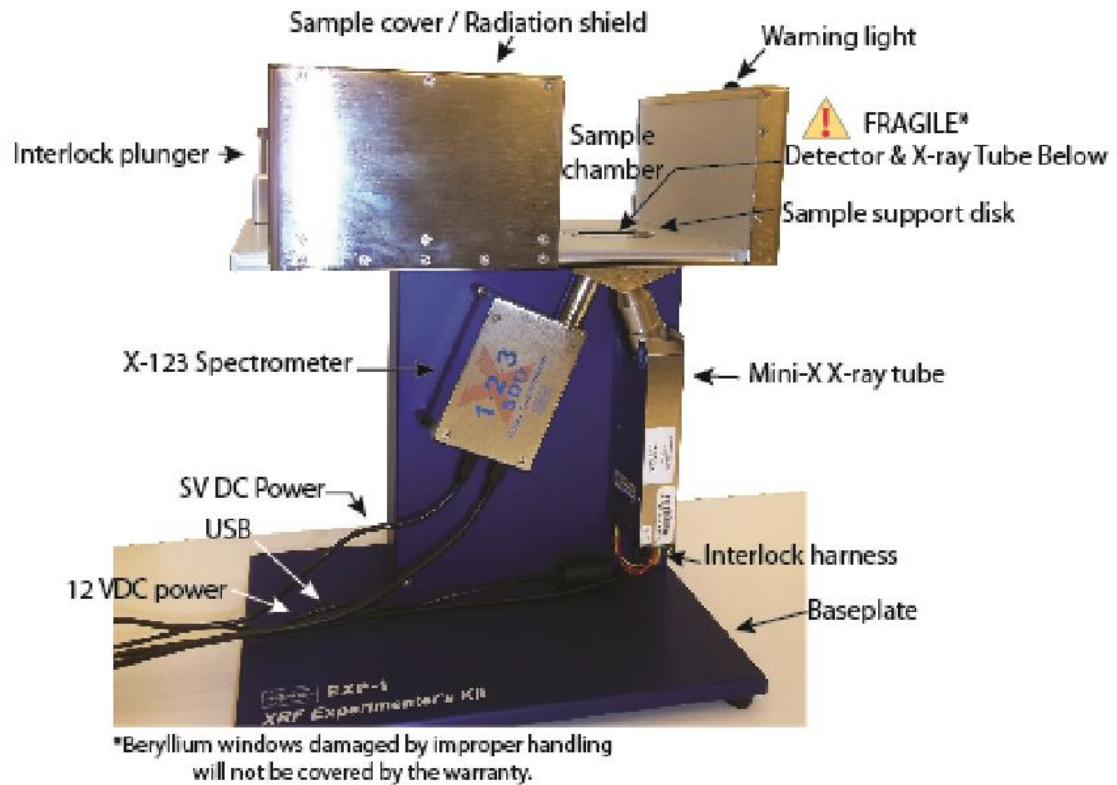


Figure III-10 : Caractéristiques de l'ED-XRF (AZBOUCHE, 2013)

3.2. Traitement du spectre X :

Les photons à rayons X primaires à haute énergie sont émis par le tube à rayons X et frappent l'échantillon. Ces photons sont collectés par le détecteur où ils sont absorbés et convertis en un signal électrique.

Un numéro de classe dans un histogramme (axe X des énergies, l'axe Y étant le nombre d'impulsions accumulées comptées) leur ai ensuite attribué moyennant un analyseur multi canal.

Un spectre est ensuite obtenu grâce au cumul de ces informations, la visualisation de ce spectre est fait par un logiciel intégré dans l'appareillage d'analyse.

Ce logiciel permet le traitement et la déconvolution des spectres X en donnant toutes les intensités des raies X caractéristiques des éléments existants ainsi que leurs erreurs.

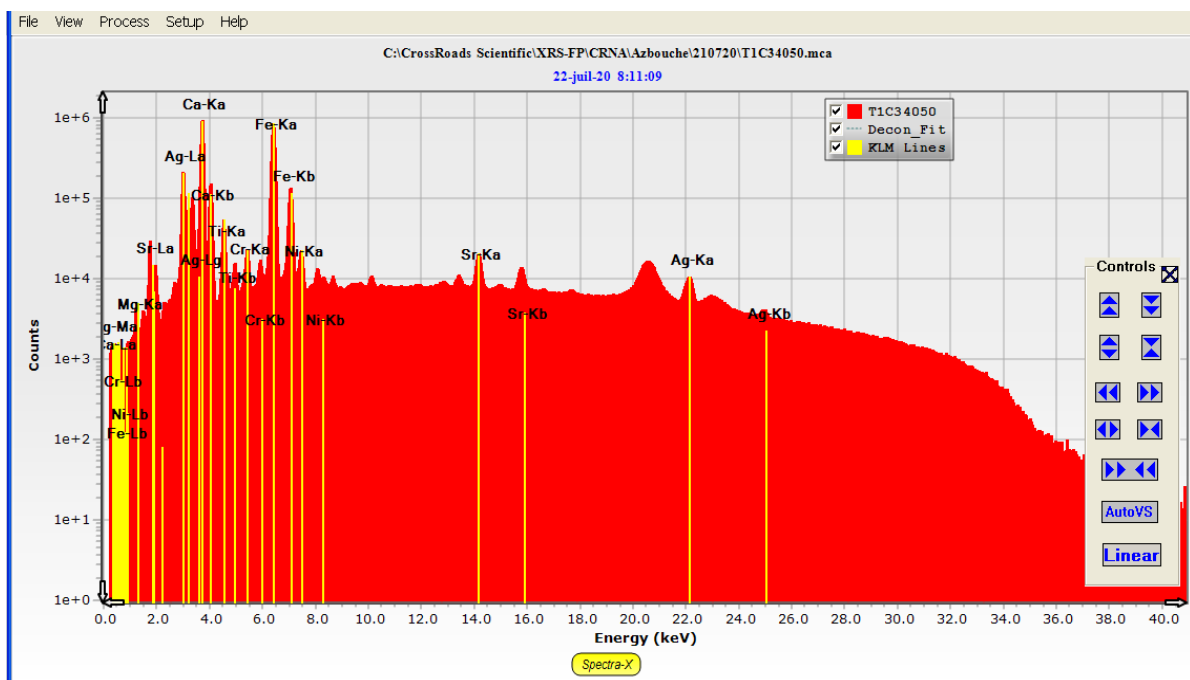


Figure III-11 : Spectre de fluorescence X (ED-XRF) d'un échantillon du sol T1C3 (50-60) cm.

3.3. Identification et quantifications des éléments.

Les aires (ou hauteurs) des pics de l'histogramme étant représentatives des concentrations des éléments présents, un algorithme de correction calcule en temps réel la composition chimique du matériau irradié sous le faisceau.

A noté que les résultats extraits du spectre sont exprimés en %, en ppm, en épaisseurs de couches en rapport d'éléments.

Afin d'étudier la distribution des éléments majeurs, mineur et traces dans sol, il est demandé de connaître les concentrations de ces éléments afin de les représenter en fonction de la profondeur de chaque des profils.

Il est noté que le rapport entre la concentration d'un élément x dans l'échantillon et le standard en tenant compte de l'intensité du blanc est donné par la relation suivante :

$$C_x = \frac{(I_x - I_{BX})}{(I_{ST} - I_{BST})} \cdot C_{ST} \quad \text{Equation III.3}$$

Où :

C_x : la concentration de l'élément dans l'échantillon.

I_x : l'intensité de chaque élément dans l'échantillon.

I_{BST} : l'intensité de blanc de standard.

I_{BX} : l'intensité de blanc de l'élément dans l'échantillon.

I_{ST} : l'intensité du standard.

C_{ST} : la concentration du standard (ppm).

L'erreur associée à la concentration des éléments présent dans l'échantillon est donnée par :

$$\sigma_{C_x} = C_x \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_x}}{I_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_{ST}}}{I_{ST}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{ST}}}{C_{ST}}\right)^2} \quad \text{Equation III.4}$$

On déduira alors la valeur de l'erreur associée à la concentration du standard pour chaque élément.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

1. Présentation des résultats

Pour cette étude trois points ont été choisis :

- Le transect 1, carotte 3 (T1C3) : à une profondeur entre 40-50 cm et 50-60cm.
- Le transect 2, carotte 2 (T2C2) : à une profondeur entre 40-50 cm et 50-60cm.
- Le transect 3, carotte 1 (T3C1) : à une profondeur entre 40-50 cm et 50-60cm.

Les résultats obtenus permettront de déterminer la distribution des éléments majeurs, mineurs et traces le long du bassin versant au niveau du site de Fergoug.

Les tableaux ci-dessous représentent les résultats des analyses effectuées par la spectrométrie EDXRF :

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau IV-1 : Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T1C3

Profondeur (cm)	40-50	50-60
Eléments	Concentration des éléments majeurs (mg/g)	
Na	2,27±0,45	2,29±0,46
Mg	22,63 ±5,36	19,52±4,71
Si	182,92±27,6	150,88±22,85
P	1,72±0,58	1,55±0,52
K	11,97±1,80	12,44 ±1,88
Fe	31,44±2,28	33,97±2,47
Ca	91,12 ±13,44	93,94±13,86
Ti	3,32±1,33	3,97±1,59
	Concentration des éléments mineurs (mg/g)	
Cr	0,07±0,04	0,07±0,05
Mn	0,27±0,03	0,23±0,03
Sr	0,30±0,03	0,22±0,03
Zr	0,19±0,02	0,13 ±0,02
Ba	0,48±0,33	0,49±0,33
	Concentration des éléments traces (ug/g)	
Sc	6,4±1,9	4,8±1,4
V	78,9±18,9	56,6±13,9
Ni	148,2±78,4	138,9±73,5
Zn	79,9±15,4	77,0±14,8
Br	8,2±6,8	8,1±6,7
Rb	65,1±14,3	70,3±15,4
Y	20,9±10,1	11,3±5,5
Nb	6,0±4,4	8,9±6,8
La	67,8±23	80,5±26,6
Pb	67,6±25,2	41,5±15,4
Th	3,3±1 ,0	00
U	2,8±1,1	2,4±1,0

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau IV-2: Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T2C2.

Profondeur (cm)	40-50	50-60
Eléments	Concentration des éléments majeurs (mg/g)	
Na	1,97±0,40	2,52 ±0,50
Mg	8,30 ±2,22	21,95±5,23
Si	161,03±24,35	147,13 ±22,29
P	1,82±0,60	1,50±0,51
K	12,537±1,89	12,60 ±1,90
Fe	35,24±2,56	35,56±2,58
Ca	96,11±14,18	94,15 ±13,89
Ti	4,08±1,63	4,04±1,62
	Concentration des éléments mineurs (mg/g)	
Cr	0,07±0,05	0,07 ±0,05
Mn	0,18±0,02	0,16 ±0,02
Sr	0,34 ±0,04	0,33±0,04
Zr	0,14±0,02	0,13±0,02
Ba	0,28±0,20	0,42±0,23
	Concentration des éléments traces (ug/g)	
Sc	5,0±1,5	4,8±1,41
V	55,2±13,6	52,3±13,0
Ni	151,2±80,0	146,4±77,5
Zn	84,3±16,2	75,8±14,6
Br	9,2±7,6	9,1±7,5
Rb	76,1±16,7	82,9±18,2
Y	32,4±15,6	24,1±11,7
Nb	8,3±6,3	8,6±6,5
La	36,4±14,7	78,0±25,9
Pb	43,3±16,1	51,7±19,2
Th	18,2±5,4	11,2±3,4
U	3,6±1,4	3,6±1,4

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau IV- 3 : Concentrations des éléments majeurs, mineurs et traces au point T3C1

Profondeur (cm)	40-50	50-60
éléments	Concentration des éléments majeurs (mg/g)	
Na	1,42±0,30	1,35±0,28
Mg	0,93±0,28	00
Si	142,37±21,56	154,27 ±23,33
P	0,68±0,26	0,99 ±0,36
K	14,43±2,17	15,43±2,32
Fe	32,94±2,39	35,35±2,57
Ca	92,42±13,63	85,40±12,60
Ti	3,80±1,52	4,14±1,65
	Concentration des éléments mineurs (mg/g)	
Cr	0,07±0,05	0,07±0,05
Mn	0,16 ±0,02	0,15 ±0,02
Sr	0,31 ±0,04	0,34±0,04
Zr	0,13 ±0,02	0,12±0,01
Ba	0,24±0,18	0,39±0,28
	Concentration des éléments traces (ug/g)	
Sc	4,8±1,4	4,3±1,3
V	54,6±13,4	52,0±12,9
Ni	123,8±65,6	145,8±77,2
Zn	75,5±14,5	74,4±14,3
Br	8,4±6,9	10,0±8,3
Rb	92,6±20,3	117,3±25,7
Y	8,4±4,1	44,2±21,2
Nb	12,7±10,4	13,2±11,2
La	60,3±21,1	70,9±23,9
Pb	41,4±15,4	56,9±21,2
Th	5,4±1,6	20,0±5,9
U	3,5±1,4	3,2±1,3

2. Discussion et interprétation des résultats :

2.1. La distribution des éléments majeurs :

D'après la Figure IV-1, on remarque que la distribution des éléments est uniforme au niveau des trois profils ce qui nous permet de dire que le sol est perturbé et remanié par les travaux de labour, on remarque aussi l'absence d'une source de pollution des éléments majeurs.

Par ailleurs, on voit la présence du silicium en grande concentration, ceci est expliqué par le fait que la croute terrestre est riche en silicium. Cette présence en concentration élevée montre que le sol étudié n'est pas soumis à une forte sécheresse (BOULABRAOUAT, 2010).

On a enregistré aussi une bonne quantité du fer et le calcium qui forme aussi la matrice du sol le long du site étudié. Pour la concentration du magnésium, elle est assez faible dans le transect T1 et T2 puis nul au niveau du T3. Les concentrations de Ca, Mg et K, s montre que le sol n'est pas acide, en effet, ces éléments sont caractérisés par la résistance aux pluies acides. Et donc leur présence en forte concentration va faciliter la lixiviation des acides (NANGAH et al., 2013). Le sodium, potassium, titane et le phosphore sont présents à de faibles teneurs. On peut classer ces éléments comme suit $Si > Ca > Fe > K > Mg > Na > K > Ti > P$.

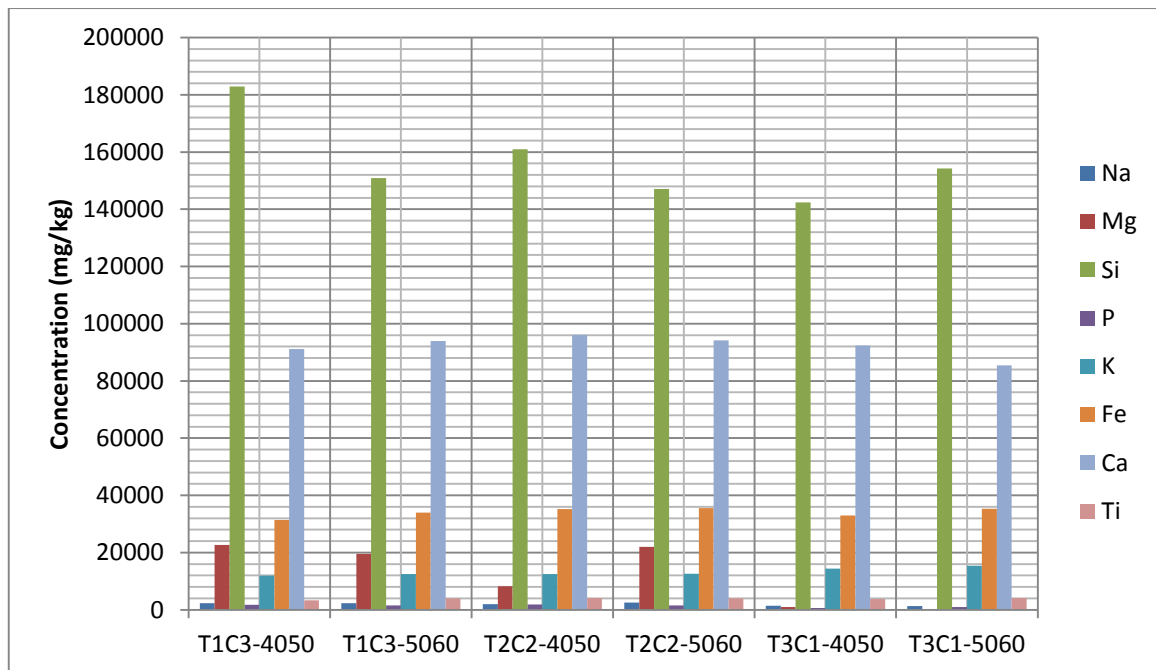


Figure IV-1 : Concentration des éléments majeurs dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm.

2.2. La distribution des éléments mineurs :

Il ressort de la figure IV.2 , que la distribution des éléments étudiés est uniforme au niveau des trois profils.

Par ailleurs, on remarque une abondance du baryum (Ba) tout au long des trois profils et une grande concentration du strontium.

On enregistre également des teneurs moyennes constantes du chrome, manganèse et du zirconium.

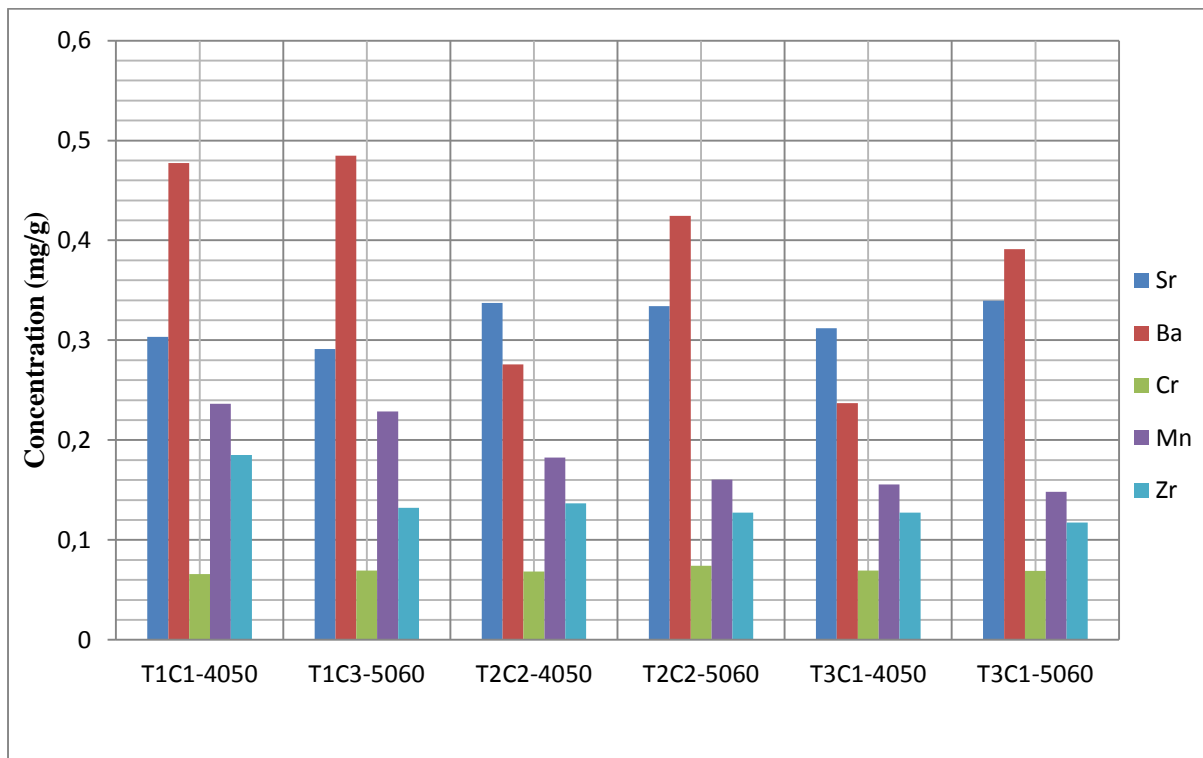


Figure IV-2 : Concentration des éléments mineurs dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm

2.3. La distribution des éléments traces

La distribution des éléments traces tel que illustrée dans la figure IV-3 est uniforme dans les profondeurs des carottes étudiées.

La représentation graphique montre que les concentrations de ces éléments dans chaque carotte du transect sont homogènes.

Au niveau du T1C1-4050, les éléments étudiés ont presque la même concentration. On enregistre par ailleurs des teneurs plus élevées de Rb par rapport aux deux autres éléments.

Pour le plomb, reconnu comme parmi les micropolluants non essentiels et toxiques à l'état de traces pour l'environnement, les plantes et pour l'homme, sa distribution est homogène dans les différents transect sauf au niveau du T1C3-4050 où la teneur est assez élevée sans toutefois dépasser pas le seuil recommandé.

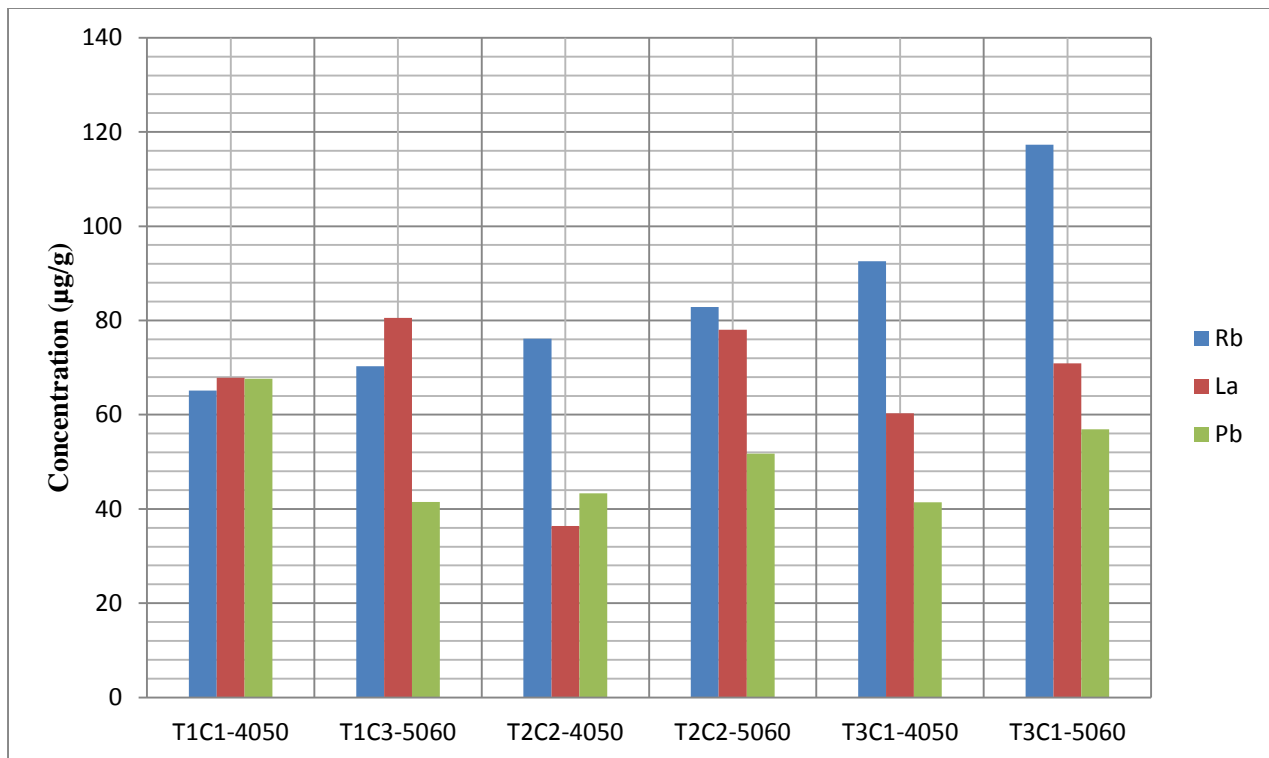


Figure IV-3 : Concentration des éléments Rb, La et Pb dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm

On remarque qu'il y a une uniformité de distribution de chacun des éléments Ni, Zn et V telle que illustrée dans la figure IV-4. Les concentrations de ces éléments sont assez élevées par rapport aux autres éléments traces.

Pour l'ETM zinc, on remarque une petite basse de concentration à la profondeur 50-60 cm dans chaque carotte ; même chose pour le vanadium.

La teneur en nickel très élevés au moyenne de 142mg/km elle dépasse même le seuil recommander par la norme Afnor .

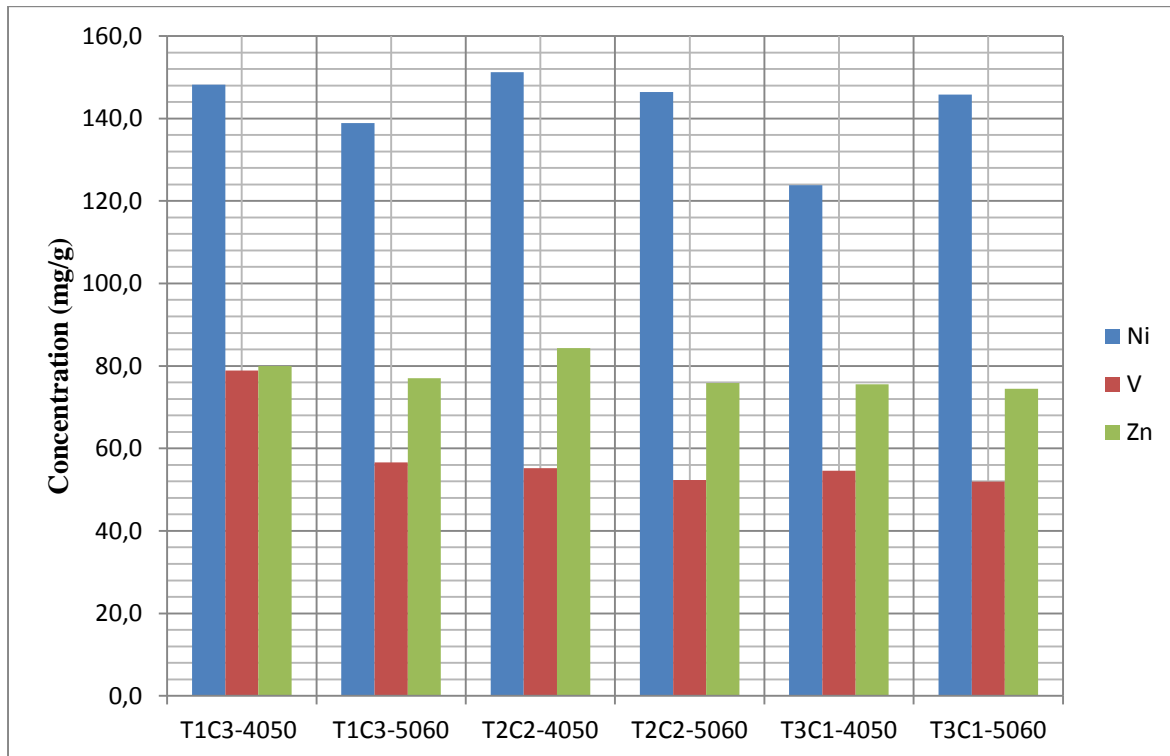


Figure IV-4 : Concentration des éléments V, Ni et Zn dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm.

Pour les terres rares qui sont représentées dans la Figure IV-5, on remarque une uniformité de distribution pour le niobium et le scandium dans chaque point. Par contre l'yttrium a une distribution plus au moins stable et atteint une concentration élevée de 44,18 $\mu\text{g/g}$ au T3C1-5060. On remarque aussi que sa quantité est moindre dans les profondeurs de 50-60 cm dans les transect T1 et T2 contrairement au T3 où on enregistre une quantité très élevée sur la même profondeur.

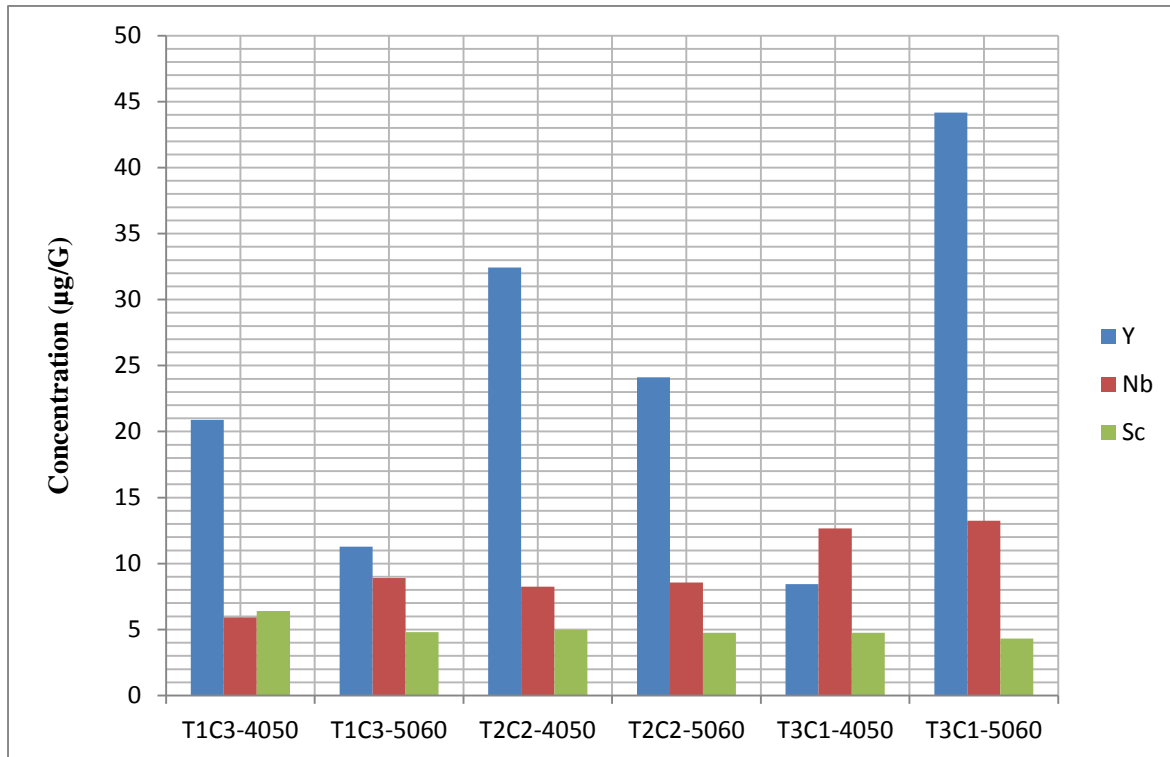


Figure IV-5 : Concentration des éléments Y, Nb et Sc dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm.

On remarque une faible quantité en uranium le long du bassin, les concentrations de thorium ne sont pas uniformes sur le site de prélèvement. On constate une non présence de ce dernier au niveau de T1C3-5060 alors qu'au niveau T3C1-5060 on enregistre une concentration de 20 $\mu\text{g/g}$.

Pour la distribution du brome, elle est uniforme le long du bassin.

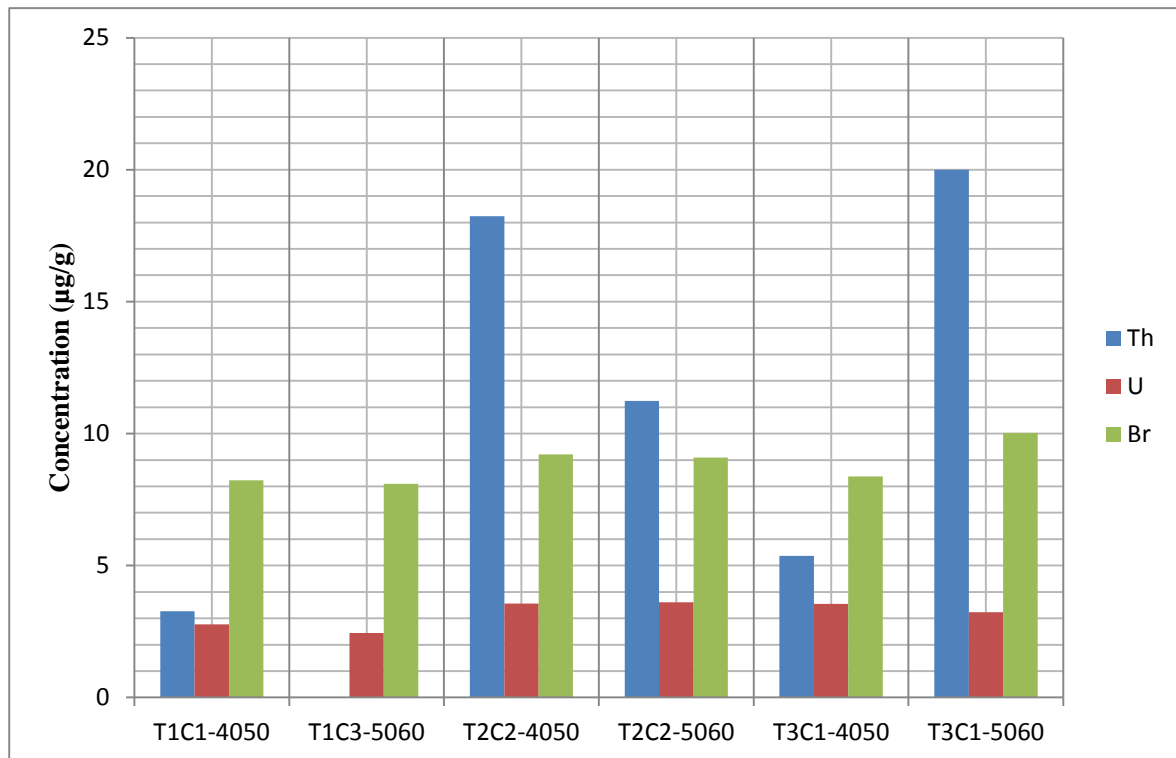


Figure IV-6 : Concentration des éléments U , Th et Br dans différents profils pour les profondeurs 40-50 et 50-60cm

2.4. Interprétions :

Le sol que nous avons étudié est aussi bien riche en silicium, en fer, en calcium et autre éléments. La présence du silicium en forte concentration est issue de l'altération de la roche mère : il représente un des éléments nécessaires des minéraux dans les sols. D'autre part la présence de cet élément limitera les pertes en eau et évitera ainsi une sécheresse du sol.

Concernant le Ca, Mg et le K, leur concentration nous montre que notre sol n'est pas acide, en effet, ces éléments sont caractérisés par la résistance aux pluies acides, et donc leur présence en forte concentration va faciliter la lixiviation des acides.

Pour les autres éléments trouvés que ça soit les éléments mineurs ou traces, leur faible teneur nous mène à conclure que notre sol n'est pas soumis à une évidente pollution.

3. Résultats d'autres régions du monde

Pour la comparaison des résultats étudiés, nous avons pris la moyenne des concentrations pour chaque élément avec d'autres résultats obtenus dans les différentes régions du monde. Nous avons pris pour la comparaison de nos résultats :

- Les travaux de Rudnick et Gao (2003) portant sur l'estimation des teneurs des éléments traces dans la croûte terrestre supérieure (Upper Crust Composition) en se basant sur les travaux des autres chercheurs.
- Les travaux de Denis Baize (2000) dans le cadre du programme ASPITET en France qui ont porté sur les teneurs totales des métaux lourds dans le sol français. Les échantillons proviennent d'une quarantaine de départements situés surtout dans la moitié nord du pays.
- L'étude réalisée dans la province de Settat au Maroc par Kao et al. (2007) sur l'évaluation de la pollution métallique dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées.
- l'étude menée par Bravo-Martin-Consuegra et al. (2015) sur l'enrichissement des sols calssique en éléments trace dans la plaine de La Mancha dans la communauté autonome de Castilla-La Mancha en Espagne.
- L'étude réalisée par Badawy et al. (2019) sur la distribution majeurs et traces dans le sol et sédiments dans le large du Nil et du Delta en Egypte.

Eléments majeurs :

Le tableau IV-4 représente les teneurs des éléments majeurs enregistrés en France, au Maroc, en Egypte et en Espagne :

Tableau IV-4 : Tableau comparatif des éléments majeurs

Eléments	Algérie (mg/kg)	UCC (mg/kg)	France (mg/g)	Espagne (mg/kg)	Egypte (mg/kg)
Na	1968,118	24260	-	994	7630
Mg	12221,783	14950	-	10725	10610
Si	156432,228	311355	-	138427	-
P	1374,308	655	-	751	-
K	13233,581	23244	-	13050	-
Fe	34082,731	39176	3,65	17793	40900
Ca	92190,396	25658	-	215525	28160
Ti	3891,567	3837	-	2818	8580

Nous avons représenté les concentrations des éléments majeurs, dans différents sols, en fonction des profondeurs 40-50 cm et 50-60 cm.

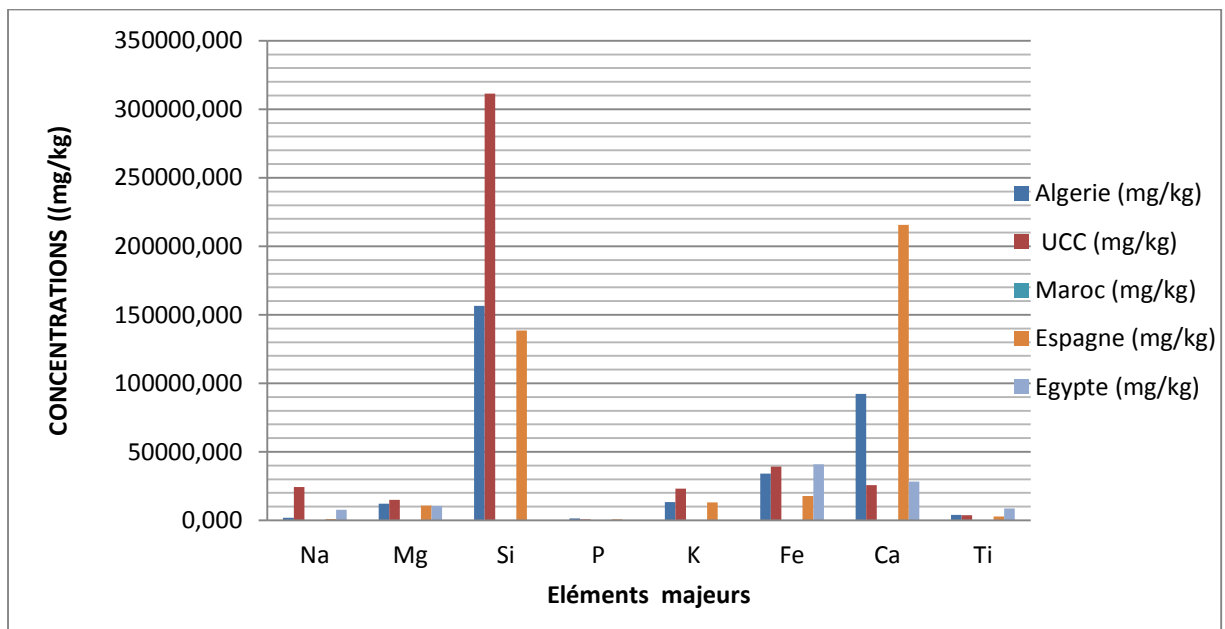


Figure IV-7 : Comparaison des concentrations des éléments majeurs dans différents sols

- La teneur en sodium est d'autant moins élevée dans notre sol comparée à celle trouvée dans le sol d'Egypte et l'estimation de la croûte terrestre (UCC), mais elle reste plus élevée par rapport à la teneur déterminée en Espagne.
- Le magnésium est présent avec une teneur rapprochée dans les tous les sols variant entre 10610 et 14950mg/kg.
- Le silicium est moins présent dans notre pays que dans l'estimation UCC, et est davantage présent en comparaison avec l'Espagne.
- le phosphore (P) est beaucoup plus présent dans notre sol avec une teneur moyenne de 1374,308mg/kg, que celle retrouvée dans le sol Espagnol et la croûte terrestre UCC. Quant au potassium (K), sa teneur dans le sol Algérien est rapproché de celle en Espagne mais reste moins élevé que l'estimation donnée pour la croûte terrestre UCC .
- Pour le fer (Fe), on retrouve des teneurs quasiment similaires dans le cas des sols Algérien, Egyptien et très proches de l'estimation UCC. Par ailleurs, elle reste moindre en Espagne.
- Le calcium est présent avec une teneur moyenne de 92190,396 mg/kg dans notre sol. Cette teneur est plus élevée que celle retrouvée en Egypte et celle donnée par l'Estimation UCC. Par contre on remarque une abondance de Ca dans le sol espagnol, ceci est évident vu le caractère calcique du sol étudié.
- Le tritium est davantage présent en Egypte, sur le sol étudié, avec une teneur élevée en comparaison avec celles des sols Algérien, Espagnol et l'estimation UCC qui restent quasiment très approchées.
- Pour conclure, le sol étudié reste plus riche, en calcium comparé à l'UCC et l'Egypte, en phosphore comparé à l'Espagne et l'UCC et en sodium comparé à l'Espagne et l'Egypte.

Éléments mineurs :

Le tableau IV-5 représente les teneurs des éléments mineurs enregistrés en France, au Maroc, en Egypte et en Espagne :

Tableau IV-5 : Tableau comparatif des éléments mineurs

Eléments	Algérie (mg/kg)	UCC (mg/kg)	France (mg/kg)	Norme française NF U44-041	Maroc (mg/kg)	Espagne (mg/kg)	Egypte (mg/kg)
Cr	69,327	92	75	150	70	33,62	130
Mn	185,287	775	-	-	-	279	780
Sr	319,554	320	-	-	-	275,28	260
Zr	137,716	193	-	-	-	156	290
Ba	381,894	628	-	-	-	172,38	386

Nous avons représenté les concentrations des éléments mineurs, dans différents sols, en fonction des profondeurs 40-50 cm et 50-60 cm.

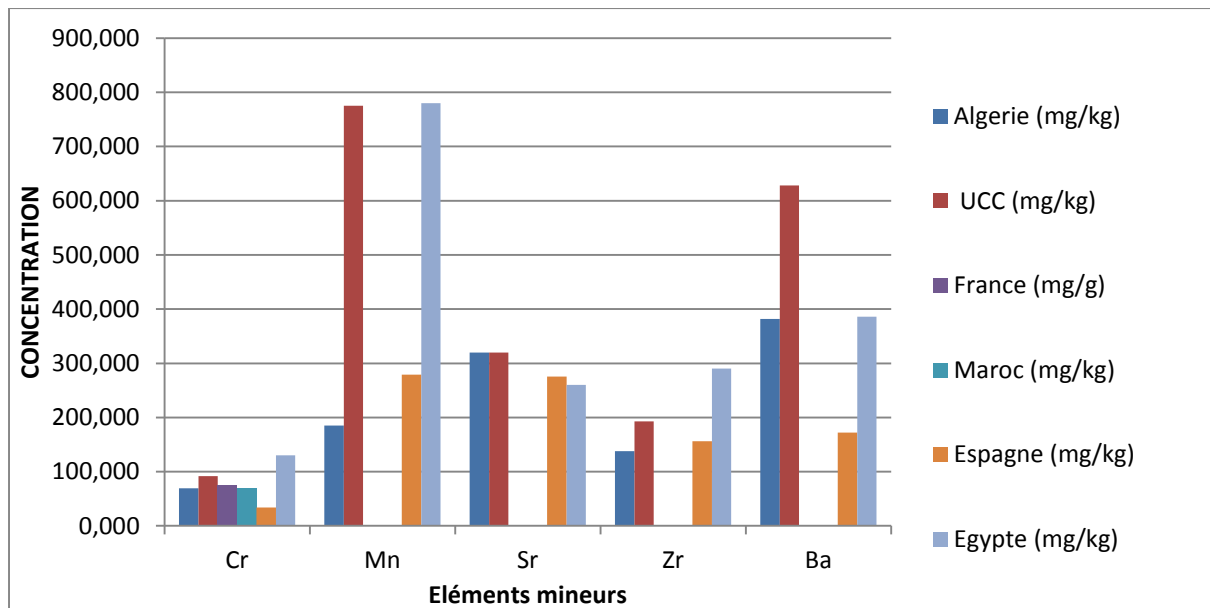


Figure IV-8 : Comparaison des concentrations des éléments mineurs dans différents sols.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

- Les teneurs en chrome sont moins élevées en Algérie en comparaison avec celle de la norme française qui est de 150 mg/kg et celles trouvées dans la croûte terrestre ainsi qu'en Egypte. Par ailleurs, elles se rapprochent des teneurs des sols Français et Marocain. La teneur en Espagne reste faible.
- Pour le manganèse, les teneurs sont moins élevées que celles de la croûte terrestre UCC, ainsi que celles trouvées en Espagne et en Egypte.
- La teneur en Strontium dans notre sol est pratiquement proche de celle de la croûte terrestre et elle reste plus importante que celle enregistrée en Espagne et en Egypte.
- Pour le Zirconium, on enregistre une plus faible teneur par rapport aux autres sols et à la croûte terrestre qui est de 193mg/kg contre 137,716 mg/kg pour notre sol.
- Et enfin, le baryum (Ba) est présent avec une teneur moyenne de 381,894mg/kg dans notre sol et avec des teneurs moins élevées dans les sols d'Espagne tandis qu'elle est plus importante dans la croûte terrestre.

Elements traces :

Le tableau IV-6 représente les teneurs des éléments traces enregistrés en France, au Maroc, en Egypte et en Espagne :

Tableau IV-6 : Tableau comparatif des éléments traces

Eléments	Algerie (mg/kg)	UCC (mg/kg)	France (mg/kg)	Normes françaises NF U44-041	Maroc (mg/kg)	Espagne (mg/kg)	Egypte (mg/kg)
Ni	142,396	47	41,3	50	50	15,8	45
Sc	5,002	14				5,08	13,4
Zn	77,842	67	149	300	90	32,2	73
Br	8,838	1,6	-		-	-	43
Rb	84,041	84	-		-	43,34	27
V	58,242	97	-		-	33	130
Y	23,554	21	-		-	13,42	
Nb	9,592	12	-		-	9,68	
La	65,651	31	-		-	17,06	20
Pb	50,423	17	64,8	100	35	18,14	
Th	9,361	10,5	-		-	7,14	3,8
U	3,192	2,5	-		-	-	1,5
Co	-3,411	17,3	17,1		8	6,8	20
Cu	-2,094	28	14,9	100	30	12,3	7630

Nous avons représenté dans la figure IV-09 et figure IV-10 les concentrations des éléments traces, dans différents sols, en fonction des profondeurs 40-50 cm et 50-60 cm.

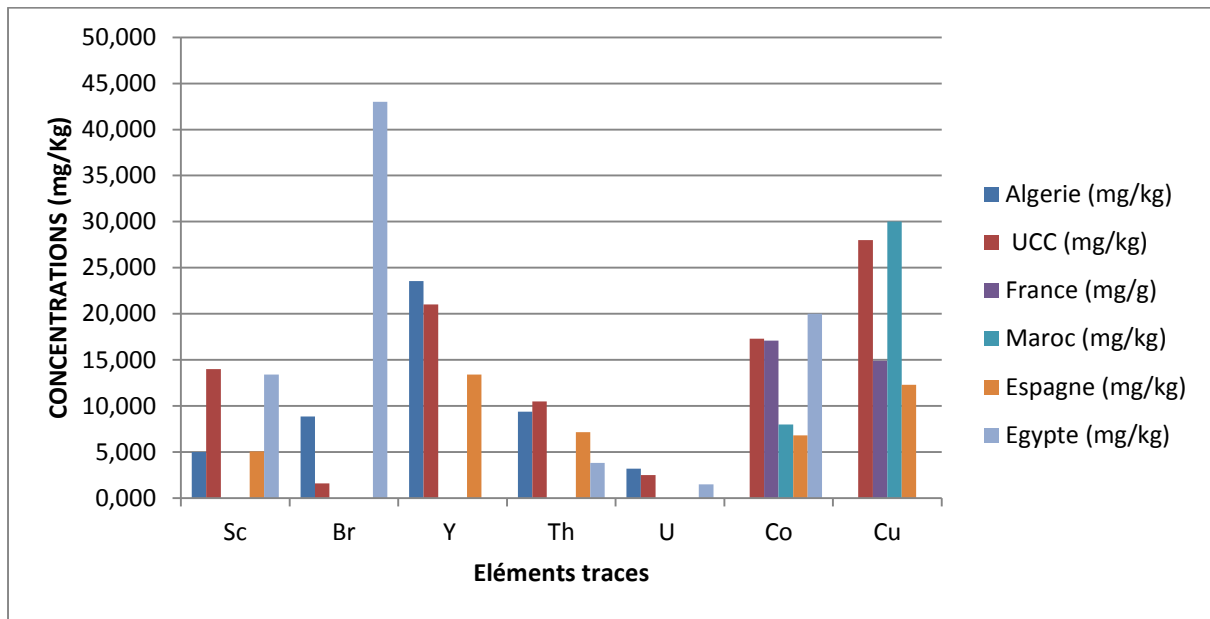


Figure IV-09: Comparaison des Concentration des éléments traces dans différents sols

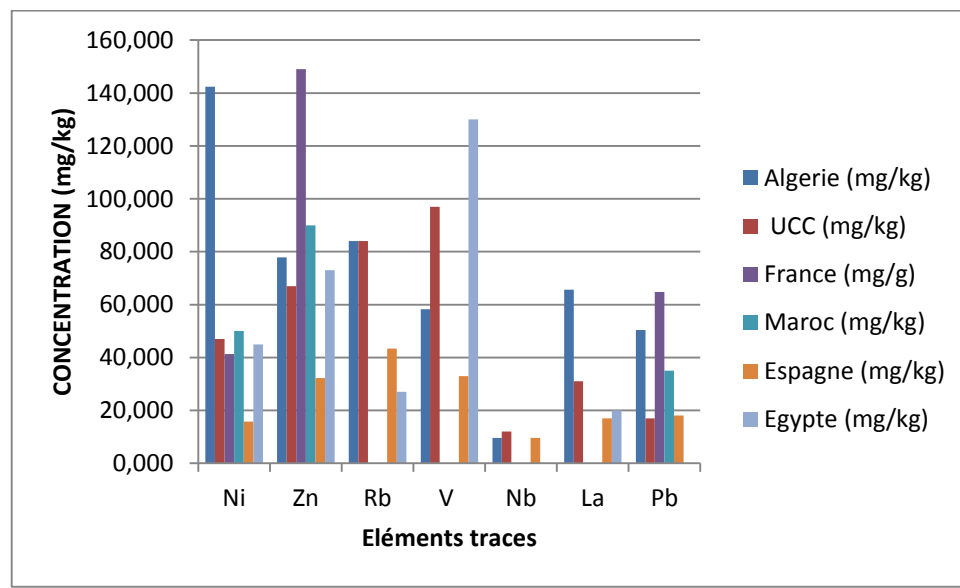


Figure IV-10 : Comparaison des Concentration des éléments traces dans différents sols

Les concentrations en éléments traces dans la région de Fergoug sont en général comparables avec celles de la croûte terrestre supérieure (UCC) ;

- On trouve que la teneur moyennes de U et Y sont relativement proche de celle associés avec l'UCC, et un peu supérieure à celle de l'Égypte pour le Y.
- Pour le Nb on remarque des quantités similaires entre le sol étudié et celui de l'Espagne qui est aussi très proche de celui de la croûte terrestre.
- Le Th se trouve en teneur quasiment rapproché entre notre sol et l'estimation UCC ; mais les valeurs en Égypte et l'Espagne sont inférieure
- La concentration de V dans notre sol est inférieure a celui de UCC et aussi par rapport au l'Égypte mais supérieure au sol espagnol.
- Le Sc de notre sol et celui de l'Espagne sont similaire mais inférieure aux valeurs enregistré en Égypte et de UCC qui sont de leur part très proche de leur part.
- la teneur de La enregistré dans la région de fergoug est élevé 65.5 ppm par rapport aux teneurs de la croûte terrestre supérieure et aussi a l'Égypte.
- La quantité de brome dans notre sol et en Égypte est très élevée par-rapport à l'UCC surtout dans ce sol Égyptien qui atteint 43 ppm.
- Les teneurs en Pb les plus élevées sont détectées en France avec une valeur de 64.8mg/kg suivie de notre échantillon de sol qui est de 50.4mg/kg ; ces valeurs sont supérieure à celle de la croûte terrestre mais ne dépasse pas la limite fixé par la norme française NF U44-041 qui est de 100mg/kg ce qui n'engendre pas une pollution malgré les chiffre enregistré.
- La valeur de zinc dans le sol étudié (77.8 mg/kg) est supérieure a celle de la croûte terrestre supérieure ainsi que l'Espagne, le Cameroun et le Maroc mais elle ne dépasse pas la limite de la norme française exiger 300mg/kg.
- La teneur de Ni enregistré dans l'échantillon de notre sol 142.3 mg/kg est supérieure à celle de France, Égypte et Maroc elle dépasse aussi la valeur fixé par la norme française U44-041 de 50mg/kg.

3.1. Discussion des résultats :

Les résultats ainsi obtenus montrent des différences de concentrations des éléments entre notre site et les sites des différentes régions du monde à savoir celle de la croûte terrestre, l'Espagne, la France, l'Égypte, et le Maroc. Cette différence est évidente vu que l'étude a été menée dans un contexte géologique, climatique et pédologique différent suivant des méthodes analytiques différentes. La comparaison des concentrations des éléments présents dans notre site n'est pas évidente mais on peut dire que la région de Fergoug est caractérisée par une très grande variété d'éléments dans les roches mères et sol.

Par ailleurs, notre étude montre qu'on peut regrouper les éléments trouvés par la ED-XRF en éléments majeurs présents en grande quantité, c'est des éléments qui constituent la roche mère généralement nécessaires à la physiologie des plantes, ainsi que les éléments mineurs et traces présents en quantités infimes.

Pour les éléments majeurs, leurs teneurs sont en dessous des résultats trouvés dans les autres sols ; ils sont présents en petites quantités. Ceci peut être expliqué par la différence des sols de chaque région.

La distribution des éléments traces dépend des types de sols et particulièrement leurs caractéristiques physico-chimiques. Selon Trans et al. (1995) (ESTEVEZ, 2006) les facteurs les plus importants étant la texture (physique du sol), le pH, la teneur en matière organique, l'humidité du sol et le potentiel d'oxydo-réduction (aération et humidité du sol).

Dans le cas du sol étudié, nous avons remarqué que leurs distributions sont semblables généralement à celle de la croûte terrestre (Rb, Y, Nb, Th, U) sauf pour quelques éléments comme le nickel, le brome, le zinc et le plomb reconnus comme non essentiels et toxiques à l'état trace ou on a noté une forte présence qui est supérieure à la teneur moyenne de la croûte terrestre (KAO et al., 2007). La teneur en nickel est souvent supérieure au seuil recommandé par la norme française. En effet, ce seuil a été fixé trop bas à 50mg/kg ; la plupart des sols argileux et riches en fer approchent ou excèdent cette valeur.

Les teneurs en V et Sc sont relativement faibles comparées aux sols étudiés.

Les teneurs en cuivre et cobalt mesurés pour le sol de Fergoug sont inférieures à la limite de détection analytique ; d'où une intensité négative. Par conséquent, on considère que ces éléments ne peuvent être dosés par cette technique.

Conclusion Générale

Ce travail a été réalisé au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger pour l'étude de la distribution des éléments majeurs, mineurs et traces dans le bassin versant d'Oued- Fergoug dans la wilaya de Mascara en utilisant les techniques nucléaires à savoir la technique d'analyse par fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) et en dispersion en longueur d'onde (WD-XRF).

L'analyse par fluorescence X (ED-XRF) a montré une variation de concentrations des éléments chimiques dans les différents points d'échantillonnage. L'analyse a démontrée aussi qu'il y a une distribution uniforme le long du profile étudié, ce qui explique les différentes perturbations causées par les travaux de labour. Ce phénomène a été déjà étudié au niveau de laboratoire en utilisant la méthode du Cs-137 (IGUER et SEKHANE, 2017)

L'utilisation de cette technique fluorescence X, a permis une étude rapide et efficace vu les capacités analytiques de cette méthode en terme de rapidité, d'analyse multi élémentaire et une non destructives.

L'analyse de fond géochimique a démontré l'absence des sources de pollutions dans la région étudiée.

Enfin, il est nécessaire de poursuivre l'étude sur la distribution des éléments stable dans le fond géochimique de Oued Fergoug sur les autres transects et d'autres profondeurs , et l'étendre au reste des sites de la wilaya de Mascara ainsi que d'autres site du territoire national afin de contribuer à la réalisation d'une base de données représentative des éléments métalliques dans le sol Algérien.

Bibliographie

Agriculture du maghreb. Le calcium et son role en agrumiculture. [En ligne]. [Consulté le 11/04/2020]. Disponible sur : [http://www.agri-mag.com/2017/06/arboriculture-le-calcium-en-agrumiculture/..](http://www.agri-mag.com/2017/06/arboriculture-le-calcium-en-agrumiculture/)

AUBERT, H., PINTA, M. Les éléments traces dans le sol. [En ligne].O.R.S.T.O.M. Paris, 1971.Consulté le 14/05/2020]. Disponible sur : < https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/pt5/travaux_d/05199.pdf>

AZBOUCHE, A. Cours de fluorescence X. IAGN. Draria . 2013.

AZBOUCHE, A. Technique Nucléaires PIXE et XRF. Alger : Cantre de Recherche Nucléaire d'Alger .2013.

BADAWY, W.M., OCTAVIAN ,G.D., FRONTASYEVA ,M . Distribution of major and trace elements in soil and sediments along the Nile river and delta—(Egypt). Egypte. Springer Nature Switzerland AG , 2019. [Consulté le 13/05/2020].Disponible sur < https://www.researchgate.net/publication/331295002_Distribution_of_Major_and_Trace_Elements_in_Soil_and_Sediments_Along_the_Nile_River_and_Delta-Egypt_A_Case_Study>

BAIZE, D., JBIOL, B. Guide pour la description des sols. Paris, 2011. 430p.

BAIZE, D., GIRARD, M. Référentiel pédologique. INR-Edition , 1995. 332p.

BEN ABDELOUAHED, H. Etude de la fluorescence X : Développement dans Geant 4 de nouveaux modèles de sections efficaces pour la simulation PIXE.Applications biologiques et archéologiques. [En ligne]. These de doctorat : Physique ,Tunis : Université de Tunis El Manar : 2005. [Consulté le : 25/10/2020]. Disponible sur l'adresse : <http://www.inis.aiea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/072/41072948.pdf>

BENCHETRIT, M. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement de l'Algérie. Presses universitaires de France. Poitiers XI PUF Paris ,1972. 248p. 2-7059-5282-9.

BONNEAU, M. L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière. Revue forestière française. 1963.

BOUCHETATA , A., BOUCHETATA ,T. Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant. Institut agronomique méditerranéen de Montpellier (Iamm), 2006. pp. 415-424.

BOUDRA, N. Analyse des éléments polluants dans l'eau de mer et les sédiments marins par les techniques nucléaires: Pixe,EDXRF et NAA. [En ligne] . Memoire de fin d'étude :génie maritime :Annaba : 2010. [consulté le 12/05/2020]. Disponible sur : <http://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/1946/TH5945.pdf?sequence=3&isAllo wed=y>.

BOUGHERARA, M. Etude du fond géochimique de la region de Tlemcen. Tlemcen : Memoire de Magister chimie : Spectrochimique et methode d'analyse, 2011.

BOULABRAOUAT, F.Z. Détermination des éléments mineurs et de traces dans le fond géochimique d'un sol par les techniques nucléaires: cas du site de Tlemcene. Mémoire de fin d'etude : genie des procédés,Alger :Usthb , 2010.

BOUTAHAR, L. Applications de la spectrométrie de fluorescence X à l'analyse et la caractérisation des matériaux. These magister physique: Propriétés Optiques et Luminescentes des Matériaux, Oran : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran- Mohamed Boudiaf, 2014.

BOUTKHIL, M. Ruissellement et erosion en zone de montagne :analyse des facteurs conditionnels cas des monts de beni chougrane - algerie. 203p. These de doctorat : Hydraulique ,Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid : 2015.

BOUZID, S. Validation du modèle global GOCART de NASA et son apport à l'étude des variations mensuelles des phénomènes de sable sur le Sahara Algérien. [En ligne]. Mémoire de Master en Sciences et Technologies de l'Espace Option : Météorologie Spatiale et Climat Mondial :Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française: Rabat , Maroc, 2005. [Consulté le 10/04/2020]. Disponible sur : https://www.memoireonline.com/05/08/1074/m_validation-modele-gocart-nasa-variation-phenomenes-sable-sahara9.html.

BOYER, J. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales, humides et sub-humides. O.R.S.T.O.M. PARIS .1978 [Consulté le 12/08/2020]. Disponible sur <https://core.ac.uk/download/pdf/39879829.pdf>.

BRABANT, P. Activités humaines et dégradation des terres Indicateurs et indices.[En ligne]. Paris, France : institut de recherche pour le développement. 2008. 357p. ISBN 978-2-7099-1644-8. [Consulté le 05/05/2020]. Disponible sur : http://www.horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-05/010045188.pdf.

BRAVO-MARTIN-CONSUEGRA, S., JOSE, A., AMOROS, O., FRANCISCO, J., NAVARRO, G., RUEDAS, L.R. Natural enrichment of trace elements in surface horizons of calcareous soils (La Mancha, Spain).[en ligne]. Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry Volume 2015. Article ID 606837, 10 pages. [Consulté le 25/07/2020]. Disponible sur <<http://dx.doi.org/10.1155/2015/606837>>.

BRUNDLE, C.R., EVANS, C.A., WILSON, Jr. S. Encyclopedia of Materials Characterization: Surfaces, Interfaces, Thin Films. . USA : Manning Publications Co. 1992.

BUR, T. Impact anthropique sur les elements traces metalliques dans les sols agricoles de midi-pyrenees.implications en termes de limites et de charges critiques.[En ligne]. These de doctorat : hydrogéochimie:l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2008. [Consulté le : 12/08/2020]. Disponible sur: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001050>

BURNOL, A., DURO, L., GRIVE, M . Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraine. Guide méthodologique. INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a. 2006.

CALVET, R. Le sol propriétés et fonctions, constitution et structure, phénomènes aux interfaces. s.l. : . Tome 1. Edition France Agricole. Paris (France). 83-90. 2000.

CAMARILLO, D. Détection et caractérisation par rayons X des éléments de trace dans les fruits et légumes [En ligne].These de doctorat : Image et système, Lyon : Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007. [Consulté le 20/10/2020]. Disponible sur : http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2007/camarillo_ravelo/these.pdf .

CHARLES, A. Les-différents-types-de-sol. [En ligne]. [Consulté le 6 Mars 2019]. Disponible sur : <<https://www.wikipit.fr/classification-des-sols/les-differents-types-de-sol.>>.

CLEMENT, M. La dégradation des sol en France et dans le monde.[en ligne]. Ediscol Ens .2020.[Consulté en ligne 20/07/2020].Disponible sur : <https://planetvie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/la-degradation-des-sols-en-France>
dans#:~:text=L'%C3%A9rosion%2C%20le%20tassement%20du,perte%20de%20la%20diversit%C3%A9%20biologique.

COMBEAU, A., SEGALEN, P., BACHELIER, G. L'etude du sol au laboratoire caracteristiques physiques, chimiques,mineralogiques et biologiques. Techniques rurales en afrique et pédologie et développement. Paris. O. R. S. T. O. M., 1970. 63-92pp

COURSE OF AGRICULTURE DEPARTEMENT. Soil erosion. south africa. 2008.

DAMAY, N., JEANLUC, J. L'acidification des sols : origine, approche, enjeux et maîtrise. [en ligne]. Station Agronomique de l'Aisne. 2009. [consulté le 12/07/2020]. Disponible sur https://comifer.asso.fr/images/pdf/colloque_damay.pdf

Deco. Les différents types de sol. 2020. [En ligne] [Consulté le 12/05/2020]. Disponible sur : <https://www.deco.fr/jardin-jardinage/outils/les-differents-types-de-sol>.

DESCHENES, L., CHASSE, R., GIROUX, M., BASTIEN , C., JEAN, L., BECAERT, V., MARTINEAU, D., COTE, G. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. PARDE, 147p + annexes, 2006.

DOSSO, M. Quelles sont les différentes formes et causes de dégradation ? .2007.[En ligne] [Consulté le : 17 06 2020.]. Disponible sur [<https://www.universalis.fr/encyclopedie/sols-erosion/2-quelles-sont-les-differentes-formes-et-causes-de-degradation/#:~:text=La%20d%C3%A9gradation%20physique%20des%20sols,une%20d%C3%A9sorganisation%20de%20leur%20structure.&text=La%20porosit%C3%A9%20du%20s>].

DUCHAUFOR, P. Abrégé de pédologie-Sol, végétation, environnement. 5e édition. MASSON, 1997. 291p.

EAG, Laboratories. Fluorescence des rayons X, analyse XRF. EAG, Laboratories.2011. [En ligne]. [Consulté le : 07 03 2020]. Disponible sur : <<https://www.eaglabs.fr/cm/xrf.html>>.

EBERHART, J.P. Analyse structurale et chimique des matériaux . Paris .Dunod, 1989. 614p. 2-10-003367-0.

Ecole des Mine de Saint-Etienne. Le spectromètre de Fluorescence X à dispersion de longueur d'onde. [En ligne]. 2005. [Consulté le : 06 03 2020.] . Disponible sur <https://www.emse.fr/~moutte/ecole/mpcm/Xrf_SpectroWDS.pdf>.

ESTEVEZ, B. L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité Une préoccupation en agriculture biologique ? [en ligne]. Québec : SPGBQ, 2006. [consulté le 12/06/2020]. Disponible sur : <https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Fiche%20technique%20%20C3%A9lements%20mineurs.pdf>

FINK, P. Analyse par fluorescence des rayon X (XRF).2004 . [En ligne] [Consulté le : 05 06 2020.] . Disponible sur <<https://www.fp-lims.com/fr/methode-de-mesure/analyse-par-fluorescence-des-rayons-x/#:~:text=Malheureusement%2C%20la%20proc%C3%A9dure%20XRF%20ne,pour%20des%20valeurs%20plut%C3%B4t%20bonnes>>.

GALEZ, P. Techniques spectroscopiques d'analyse : Spectrométrie de fluorescence atomique. [En ligne] .2011. [Consulté le : 03 06 2020.] .Disponible sur <<https://www.yumpu.com/fr/document/view/39427699/spectrometrie-de-fluorescence-atomique-iut-annecy>>.

GEISLER, J. Choosing the Best Detection Method: Absorbance vs Fluorescence. . [En ligne] 2015. [Consulté le : 05 05 2020.]. Disponible sur <<http://www.biocompare.com/Bench-Tips/173963-Choosing-the-Best-Detection-Method-Absorbance-vs-Fluorescence/>>

GIROUX, M., ROMPRE, M., CARRIER, D., AUDESSE, P., LEMIEUX, M. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. 1992 . Agrosol, Vol. 5 (2) :46-55. [Consulté le 26/07/2020]. Disponible sur <<https://irda.qc.ca/fr/publications/>>

GOBAT, J.M., ARAGNO, M., MATTHEY, W. Le sol vivant . 3e édition. Sciences de la terre, 2010. 819p.

GOLSTEIN, J., JOY, D.C., LYMAN., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L., MICHAEL, J.R. Scanning electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 1992. ISBN 0-306-44175-6.

GRISSOL. Les éléments majeurs dans le sol. [En ligne] [consulté le 09/06/2020].disponible sur < <https://www.gissol.fr/thematiques/les-elements-majeurs-totaux-des-sols-305>> .

GUAY, M. Utilisation de la spectroscopie de fluorescence pour la vérification du nettoyage d'un ingrédient pharmaceutique actif sur les surfaces des équipements de production.[En ligne].

Memoire de fin d'etude: genie chimique , Université Laval, Québec, Canada : 2017. Consulté le 09/07/2020]. Disponible sur : <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/28220/1/33905.pdf>.

GUEYE, I. Application de la Télédétection aérospatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le bassin arachidier du Sénégal. [en ligne]. DAKAR . 2013. [Consulté le 12/06/2020]. Disponible sur < <https://www.institut-numerique.org/application-de-la-teledetection-aerospatiale-pour-levaluation-de-la-degradation-des-ressources-naturelles-cas-des-sols-de-la-region-de-kaolack-situee-dans-le-bassin-arachidier-du-senegal-52eca9e714ff3>>.

Halimi, A. L'Atlas blidéen: climats et étage végétaux. OPU. 487p. 1980.

HAMAI, S., HIRAYAMA, F. Actinometric determination of absolute fluorescence quantum yields. J. Phys. Chem., 87 :83–89. 1983.

HAMMADI, A . Détermination de niveau de référence de la radioactivité autour du réacteur de recherche. 2002.

IBTISSEM, S. Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution des espèces végétales par la pollution. Memoire de magister : chimie physique et analytique: Université De Med Cherif Messaadia, Souk-Ahras, 2014.

IGUER, T., SEKHANE, Z. Etude de la distribution du césium-137 dans le sol par la technique de spectrométrie gamma :Application aux mouvements particuliers des sols. 112p .Mémoire de projet de fin d'études : Génie de l'environnement :Ecole Nationale Polytechnique :Alger, 2017.

Inrae.fr. Les propriétés chimiques du sol. [En ligne]. [Consulté le 14 décembre 2011.]. Disponible sur < <https://www6.inrae.fr/qualiagro/Efficacite-Agronomique/Proprietes-chimiques-du-sol.>>.

ISIDOR, A. Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation. X-ray emission spectrographie in geologie. Elsevier publishing company Amsterdam. Londre. 1966.

JARDIN, B. les différents types du sols. [En ligne]. 2020. [Consulté le 12/05/2020] .Disponible sur <<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-285-differents-types-sol-jardin.html.>>.

JENKINS, R.G., GEDCK, D., DEKKER, M. Quantitative X-Ray Spectrometry. New York ,USA. 1981.

KAREMANGINGO, C. Problème environnemental lié au phosphore dans les sols du N.-B. [En ligne]. 2004. Disponiblesur https://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/10/agriculture/content/terres_et_environnement/durabilite_environnement/phosphore.html#:~:text=Les%20processus%20d'%C3%A9rosion%20du,celles%20en%20ont%20besoin..

KARUMANCHI, V., TAYLOR, E. S. Monitoring Powder Blend Homogeneity Using Light-Induced Fluorescence . Aaps Pharmscitech, 12(4), 1031-1037. 2011.

KHANFOUCI, M. S. Contribution a l'étude de la fructification et de la régénération du Cèdre de l'Atlas. [En ligne]. Magister en science forestière: Université hadj lakhdar-batna :2005. [Consulté le 12/4/2020]. Disponible sur <https://www.memoireonline.com/07/08/1372/m_memoire-etude-fructification-regeneration-cedre-atlas13.html>.

KOLLER, E. Traitement des pollutions industriels. 2e édition. DUNOD, 2009.

KOUDEDED , M. Cartographie des risques d'érosion hydrique des sols au moyen du Système d'Information Géographique Cas du bassin versant de l'oued Fergoug.[en ligne]. Memoire de fin d'etude :Sciences Agronomiques: Gestion conservatoire des eaux, des sols et de l'environnement , Mostaganem : Universite Abdelhamid Ibn Badis , 2013. [Consulté le 12/06/2020]. Disponible sur < <http://hdl.handle.net/123456789/1222>>.

LAROUSSE. Larousse agricole. 2002.

LEBLANC, M. La prévention des carences en éléments mineurs et secondaires en sol organique.[En ligne].2008. Saint-Rémi, : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation .[Consulté le 15/05/2020]. Disponible sur < https://www.agrireseau.net/documents/Document_91683.pdf>

LENNTECH. Le nickel dans l'environnement. [En ligne] . [Consulté : 20 08 2020.]. Disponible sur <<https://www.lenntech.fr/nickel-environnement.htm#ixzz6VTzYI1dK>>.

MALVERN, P. Fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF). [En ligne] 2020. [Consulté le : 25 03 2020.]. Disponible sur :< <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/x-ray-fluorescence/wavelength-dispersive-x-ray-flourescence/>.

MANSOURI, A. Détermination du taux des oligoéléments sélénium et zinc dans le cheveu des patients atteints par le psoriasis au moyen de la spectrométrie par fluorescence X et de l'activation neutronique instrumentale. 182p. These de doctorat : Génie chimique , Sétif : Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2014.

MARMOIS, E. Étude photophysique de nouveaux systèmes moléculaires fonctionnels basés sur les styrylpyridines.2008. [En ligne] .[Consulté le 24 10 2008].Disponible sur :< http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2008/MARMOIS_EMILIE_2008.pdf.

MCBRIDE, R.A., MARTIN, H., KENNEDY, B. La compaction du sol.[en ligne] Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Ontario. 1989. [Consulté le 14/04/2020]. Disponible sur <https://www.researchgate.net/publication/284788901_Modification_de_la_porosite_du_sol_sous_les_techniques_culturelles_de_conservation_en_zone_semi-aride_Marocaine>.

MCCAULEY, J., JACOBSEN, C. Soil & Water Management, Module I: Basic Soil Properties. Montana State University (MSU) Extension service. 2005.

MIRSAL, I. Soil Pollution. : Origin, Monitoring & Remediation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2éd . 2008. 978-3-540-70777-6.

MORSLI ,B., BENALOUATI, B., BOUACHE, M., ROOSE, E. Erosion et aménagement conservatoire de trois micro-bassins versants dans les monts Béni Chougrane (Ain Farès-Algérie). Bilan des études et propositions d'actions en milieu paysan. 1988. p. 77p + annexes.

MORSLI, B. Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne-Cas des monts de Beni-Chougrane. EL harrach : INA, 1996.

MOUTTE, J. SPIN. Ecole des Mines, 158 Cours Fauriel, 42023 SAINT ETIENNE, France. 2003.

NADKARNI, R.A. Elemental Analysis of Fuels and Lubricants: Recent Advances and Future Prospects. USA : ASTM International, 2005.

NAILI, S., NAIT, M., DENES, M., LAKEHAL, H. Détermination des teneurs en éléments traces métalliques des sols cultivés dans la région de Constantine par spectrométrie xrf. Constantine, Algérie : Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution, 2016. [Consulté le 12/08/2020]. Disponible sur : <<https://www.umc.edu.dz/images/18-NAILI.pdf>>.

NANGAH KROGBA ,Y., ANGUI, K ., TEHUA, P. Teneurs en éléments traces métalliques dans quelques sols manganifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires de Côte d'Ivoire .[En ligne] . Abidjan, Côte d'Ivoire : Département de pédologie Université Félix Houphouët Boigny, 2013. [Consulté le 20/07/2020]. Disponible sur <<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.299.8403&rep=rep1&type=pdf><

OOREKA, Experts. Composition du sol. [En ligne] .[Consulté le 12/06/2020]. Disponible sur <<https://jardinage.ooreka.fr/astuce/voir/462579/composition-du-sol>.

PAGNON, D. Caractérisation de couches minces par fluorescence X. Grenoble . 2011.

PANALYTICAL, M. Fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF). [En ligne]. 2020. [Consulté le 07 05 2020.]. Disponible sur <<https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/x-ray-fluorescence/energy-dispersive-x-ray-fluorescence.>>.

PARENT, L.O., RIVEST, R. Les éléments nutritifs Dans le Guide de fertilisation. 1ère édition. CRAAQ. Québec, 2003. 294p.

PARKER, R. Plant & Soil Science. Cengage Learning, 2009. 111p.

PIGAULT, C. ABSORPTION - FLUORESCENCE. [En ligne] 2010. [Consulté le : 04 05 2020.] .Disponible sur <http://untori2.crihan.fr/unspf/2010_Strasbourg_Pigault_AbsorptionFluorescence/co/14_parametres_fluo.html.

RIGAUX, V. Analyse des matériaux par spectrométrie de fluorescence X. [En ligne]. [Consulté le 27 07 2017]. Disponible sur <<https://metalblog.ctif.com/2017/07/27/analyse-des-materiaux-par-spectrometrie-de-fluorescence-x/>>

ROBERT, M. Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Paris , 1996. 244p.

ROOSE, E. Exemple de GCES en moyenne montagne méditerranéenne d'Algérie. 2004. p 54-66. Vol. Synthèse Sécheresse V (15) N° 1,9,18.

ROTHWELL, G.S. New Techniques in Sediment Core Analysis. London : Special Publications. 2006.

ROUESSAC, F., ROUESSAC, A., CRUCHE, D. Analyse chimique, methods et techniques instrumentales modernes. 6ème. Paris : Dunod, 2004.

RUDNICK, R. L., GAO, S. Composition of the continental crust. université of Maryland . 2003. 64p. Vol. 3. ISBN:0080443389.

RUDOLF, O., MÜLLER, A. H. Spectrochemical analysis by X-Ray Fluorescence. London. 1972.

SCHNEIDER, R. A. Comportement et mobilité des éléments traces métalliques dans des sols environnant une usine de seconde fusion de plomb.[En ligne]. These de doctorat :en géochimie de l'environnement: université de Reims Champagne-Ardenne: Reims, France , 2016. [Consulté le 20/06/2020]. Disponible sur < file:///C:/Users/Elite-Info/Downloads/49405_SCHNEIDER_2016_archivage%20(3).pdf>.

SEGALEN, P. L'aluminium dans les sols. Influence de l'aluminium sur quelques propriétés du sol et sur les comportementd des vegetaux . [En ligne]. ORSTOM : Paris , 1973. [Consulte le 26/06/2020]. Disponible sur <https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/06564.pdf>.

SEGALEN, P. Le fer dans le sol. BULLETIN BIBLIOGRAPHIQUE DE PEDOLOGIE. [En ligne]. Tome XII - Fascicule 1 ,24, rue Bayard, PARIS-8°. 1963. [Consulté le 12/05/2020]. Disponible sur <https://core.ac.uk/download/pdf/39892471.pdf>.

SOUIDI, Z., HAMIMED, A., ZAAGANE, M., DONZE, F. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : Application au bassin versant d'oued Fergoug dans les monts des Béni-Chougranes en Algérie. [En ligne].2017. Vol 01, No 1,.[Consulté 12 mai 2020]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/317283782_Cartographie_des_zones_a_risque_d'erosion_hydrique_Application_au_bassin_versant_d'oued_Fergoug_dans_les_monts_des_Beni-Chougranes_en_Algerie.

STENUIT, D. F. Les elements mineurs dans le sol . Belgique Reverle (Louvain) . Volume III. 2e serie, N°2, 1955.

TEMGOUA, N. T. Teneurs en éléments majeurs et oligoéléments dans un sol et quelques cultures maraichères de la ville de Dschang, Cameroun. 2015. African Crop Science Journal, Vol. vol-23, pp. 35-44. 1021-9730/2015. [Consulté le 12/06/2020]. Disponible sur < <https://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/113722>>

THIRION-MERLE, V. Spectrométrie de fluorescence X. hal.archives-ouvertes. [En ligne]. 2014. [Consulté : 16 04 2020.] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393984>. 9782813001634.

TOMGOUANI, K., EL MEJAHED, K., Bouzidi, A. Evaluation de la pollution métallique dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Settat (Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat. Section Sciences de la Vie .2007. n°29, 89-92 pp. [Consulté le 12/06/2020]. Disponible sur < [http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/02/11-%20Kao%20et%20al.%20\(89-92\).pdf](http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/02/11-%20Kao%20et%20al.%20(89-92).pdf)>.

TOUMERT, I. La technique de fluorescence . Alger : CRNA, 2003.

TRAN, T.S., GIROUX, M., GUILBAUL, J., AUDESSE, P. Importance des oligo-éléments en agriculture : symptômes visuels de carence, analyses des végétaux et des sols. Agrosol, 1995. Vo. 8 (1) :12-22.,

WARREN, B. X-ray Diffraction. Boston : Addison-Wesley Publishing Co, 1969.

WOLDSETH, R. X-Ray Energy Spectrometry. Burlingame, CA : keve corporation., 1973.

WORDPRESS. La fertilité des sols : les éléments majeurs. [En ligne] .2012. [Consulté le 11/06/2020]. Disponible sur <<https://leblogaguillaume.wordpress.com/les-elements-majeurs/le-potassium/#:~:text=Le%20potassium%20joue%20un%20r%C3%B4le,des%20sucres%20dans%20la%20plante.&text=Le%20potassium%20dans%20le%20sol,du%20sol%2C%20soit%20des%20engrais..>>