



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس  
Université M'hamed Bougara de Boumerdès

Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie de l'environnement

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenu par:

- M<sup>lle</sup> BELACHEHEB Wafaa.
- M<sup>lle</sup> ZAIDI Djouher.

22 octobre 2020

Thème

*Etude de la phytoremédiation des contaminants  
U, Cs et Sr par une espèce d'Asteraceae.*

M <sup>me</sup> BOUSSAK Hassina	Maitre de conférences A FS-UMBB	Président
M <sup>me</sup> LOUCIF Seiad Linda	Maitre de conférences B Fs-UMBB	Examineur
M <sup>me</sup> RABIA Nadia	Chercheur confirmé-CRNA	Promoteur
M <sup>me</sup> DEMIM Soraya	Maitre de conférences B Fs-UMBB	Co-promoteur

## Résumé.

La contamination du sol par les radionucléides peut présenter un risque important pour la santé humaine et l'environnement d'où la nécessité d'un assainissement et d'une restauration adéquats. La phytoremédiation est une nouvelle technique de décontamination alternative écologique et peu coûteuse aux autres techniques. Dans cette étude, nous avons mené un travail sur la phytoremédiation d'une espèce de plante de la famille des *Astéraceae*, à savoir la *Crepis Rubra*, vis-à-vis de trois radionucléides l'U, le Sr et le Cs. Les résultats d'analyse minéralogique par l'ICP-EOS ont montré que le Sr et le Cs sont accumulés par la plante et sont en compétition avec le Ca et le K, respectivement. L'U quant à lui, pourrait ne pas être accumulé dans les parties aériennes de la plante.

**Mots clés :** Phytoremédiation ,Radionucléides , *Astéraceae*, *Crepis Rubra*, , U, Sr, Cs, ICP-EOS.

## Abstract .

Soil contamination with radionuclides can have a significant risk to human health and environment, hence the need for adequate remediation and restoration. Phytoremediation is a new decontamination technique that is an ecological and inexpensive alternative to the others. In present work, we carried out a study on the phytoremediation of three radionuclides: U, Sr and Cs by a plant species of the *Asteracea* family, called *Crepis Rubra*. The plant samples were analysed by the ICP-EOS. The results showed that Sr and Cs are absorbed by the plant and compete with Ca and K, respectively. On the other hand, U would not be accumulated in the aerial parts of the plant.

**Keywords :**Phytoremediation , Radionuclides , Asteracea, *Crepis Rubra* , , U, Sr, Cs, ICP-EOS.

## ملخص

يمكن أن يشكل تلوث التربة بالعناصر المشعة خطرًا كبيرًا على صحة الإنسان والبيئة ، مما يستوجب التطهير و إعادة التهيئة . المعالجة بالنباتات هي تقنية إزالة التلوث البديلة الجديدة والصديقة للبيئة وغير المكلفة مثل تقنيات إزالة التلوث الأخرى. في هذه الدراسة ، أجرينا دراسة حول المعالجة النباتية لنوع نباتي من عائلة *Astéraceae* ، *Crepis Rubra* لثلاثة عناصر مشعة ، U و Sr و Cs. أظهرت نتائج التحليل المعدني بواسطة ICP-EOS أن Sr و Cs يتراكمان في النبات ويتنافسان مع Ca و K على التوالي. عنصر ال U يمكن ان لا يتراكم في الأجزاء العلوية للنبات. الكلمات المفتاحية: المعالجة النباتية ، العناصر المشعة *Astéraceae* , *Crepis Rubra*, U, Sr, Cs. ICP- EOS

## *Remerciement*

Nous remercions avant tout " Dieu" tout puissant de nous avoir accordé la puissance , la volonté et la santé pour achever ce travail.

Tout d'abord nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à Mme RABIA Nadia Chercheur confirmé au sein du CRNA pour son encadrement exceptionnel, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire

Nos sincères remerciements à Mme DEMIM Soraya qu'elle nous a fait l'honneur de nous Co-encadrer dans ce mémoire.

Nous tenons à remercier avec plus grande gratitude Mme BOUSSAK Hassina de l'honneur qu'elle nous fait d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Nous tenons également à présenter nos remerciements à Mme LOUCIF Linda , d'avoir accepté d'être examinatrice et membre de ce jury

Nos remerciements vont également à M<sup>me</sup> KAMEL Nour El Hayet, directrice de division au CRNA pour nous avoir permit de réaliser nos travaux aux sein des laboratoires de la division.

Nous remercions, aussi Mlle MOUHEB Yasmina pour son aide sans laquelle nos analyses n'auraient pas eu lieu.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur Djamel TAIEB ERRAHMANI pour ses conseils et ses remarques qui ont guidé nos réflexions et a accepté à répondre à nos questions durant la réalisation de notre travail.

Nous remercions ainsi notre collègue NECHAF Abderezzak de nous avoir beaucoup aidé ainsi que pour sa disponibilité .



## *Dédicace*

*Je Dédie Mon travail à:*

*Mes chers parents ,ma Mère et  
mon Père pour leurs amour, leurs sacrifices  
et leurs encouragements.*

*Mon grand frère Mohammed*

*Mon petit frère Ryad pour son grand aide.*

*Ma chère sœur Nesrine et son mari Djallel  
pour leurs encouragements.*

*Mon petit prince Wassim.*

*Mes amies Feriel , Kamilia , Selma,*

*Hadjer et Fassemine.*

*Ma binôme Djouher.*

*Tous ceuse qui m'aiment*

*Wafaa*



## *Dédicace*

*Je dédie mon travail  
à ma chère mère Ma source  
de ma vie pour son amour, ses sacrifices  
et ses encouragements.*

*A la mémoire de mon cher père.*

*A mes chères sœurs.*

*A ma meilleure amie Manel.*

*A ma binôme Wafaa.*

*Et surtout à Zine eddine pour son  
aide et son soutien tout le long  
de mon cursus.*

*Djouher*

## Liste des abréviations.

**BTEX** :Benzène, Toluène, Éthylbenzène, Xylènes.

**CAV** :Composés aromatiques volatils.

**Cd** :Cadmium .

**COV** :Composés organiques volatils.

**CEC** :Capacité d'échange cationique.

**Cr** :Chrome.

**CRNA** : Centre de recherche nucléaire d'Alger.

**CFC** : Chlorofluorocarbone .

**DNAPL** :Dense Non Aqueous Phase Liquids.

**HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques.

**HCl** :Acide chlorhydrique.

**HNO<sub>3</sub>** :l'acide nitrique

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>** : Peroxyde d'hydrogène.

**Hg** :Mercure.

**ICP-OES** :Inductivelycoupled plasma - opticalemissionspectrometry.

**MO** : matière organique.

**PAF** : Perte au feu.

**Pb** :Plomb

**PCB** :PolyChloroBiphényle.

**PCT** :polychloroterphényles.

**PEP** : L'acide phosphoénolpyruvique.

**ppm**: partie par million 1% = 10000ppm.

**PTC** :PhénylThioCarbamide.

**Radio** : Radionucléide.

**SVOC** : SemivolatileOrganic Compounds.

**Se** :Sélénium.

## Liste des Tableaux.

<b>Tableau 1 :</b> Les principaux contaminants organiques et leurs familles de production [5].....	4
<b>Tableau 2 :</b> Radionucléides d'origine naturelle et leurs périodes radioactives [8].....	6
<b>Tableau 3 :</b> Les éléments essentiels absorbés par les racines des plantes et leurs formes d'absorption [2].....	14
<b>Tableau 4 :</b> Les différentes concentrations choisies pour la contamination des pots. ....	34
<b>Tableau 5 :</b> La fréquence de prélèvement.....	34
<b>Tableau 6 :</b> Les caractéristiques du sol.....	43
<b>Tableau 7:</b> Concentrations des éléments dans le sol. ....	44
<b>Tableau 8:</b> Masses d'uranium absorbées par la plante. ....	44

# Liste des Figures.

<b>Figure 1 :</b> Schéma de désintégration de l'Uranium-238 (a), du Thorium-232 (b) et de l'Uranium-235 (c) [10].....	7
<b>Figure 2:</b> Le cycle des polluants dans le système sol-plante [4].....	9
<b>Figure 3 :</b> Exemple du devenir des métaux lourds dans les sols [4].....	9
<b>Figure 4:</b> Processus de phytoextraction (ITRC,2001).....	15
<b>Figure 5:</b> Représentation de la rhizofiltration [25].....	16
<b>Figure 6:</b> Représentation de la phytostabilisation [25].....	17
<b>Figure 7:</b> Phytodégardation des contaminants organiques [25].....	18
<b>Figure 8:</b> Schéma de la rhizodégradation [25].....	19
<b>Figure 9:</b> Représentation de la phytovolatilisation [25]. ....	20
<b>Figure 10:</b> Principaux critères de sélection d'espèces végétales à des fins de phytoremédiation [26]. ....	21
<b>Figure 11:</b> Voies de contamination des plantes par les radionucléides [27].....	22
<b>Figure 12:</b> Quelques espèces de la famille des <i>Astéraceae</i> [28]. ....	23
<b>Figure 13:</b> Différents types de tiges [28]. ....	24
<b>Figure 14:</b> Nervations pennés (a) et palmés (b) [28].....	24
<b>Figure 15:</b> Tamisage du sol.....	28
<b>Figure 16:</b> Aération et humidification du sol.....	29
<b>Figure 17:</b> Préparation des pots.....	32
<b>Figure 18:</b> Mise en terre des plantes.....	33
<b>Figure 19:</b> Pesées des plantes sèches.....	36
<b>Figure 20:</b> Bombes de digestion.....	37

<b>Figure 21:</b> Micro-ondes. ....	38
<b>Figure 22:</b> Refroidissement des bombes de digestion. ....	38
<b>Figure 23:</b> Filtration des échantillons minéralisés.....	39
<b>Figure 24:</b> Excitation thermique des ions dans la plasma.....	39
<b>Figure 25:</b> schéma représentant du principe de fonctionnement de l'ICP-OES.....	40
<b>Figure 26:</b> Appareil de l'ICP-OES.....	41
<b>Figure 27:</b> Exemple d'une courbe d'étalonnage. ....	42
<b>Figure 28 :</b> concentrations de strontium ( $1\text{mmol.L}^{-1}$ ) et calcium absorbés par la plante. ....	46
<b>Figure 29:</b> Masses de strontium ( $30\text{mmol.L}^{-1}$ ) et de calcium absorbées par la plante . ....	46
<b>Figure 30 :</b> Masses de strontium ( $80\text{mmol.L}^{-1}$ ) et calcium absorbées par la plante.....	47
<b>Figure 31:</b> Masses de césium ( $0,05\text{mmol}$ ) et potassium absorbées par la plante.....	48
<b>Figure 32:</b> Masses de césium ( $0,5\text{mmol}$ ) et potassium absorbées par la plante. ....	49
<b>Figure 33:</b> Masses césium ( $3\text{mmol}$ ) et potassium absorbées par la plante . ....	49

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Partie Bibliographique.**

<b>CHAPITRE I:GENERALITES SUR LES SOLS.</b> .....	3
---	---

I.1. Introduction.....	3
------------------------	---

I.2. Contamination du Sol. ....	3
---------------------------------	---

I.3. Les contaminants du sol. ....	4
------------------------------------	---

I.3.1. Les composés organiques.....	4
-------------------------------------	---

I.3.2. Les métaux lourds.....	5
-------------------------------	---

I.3.3. Les Radionucléides.....	5
--------------------------------	---

I.3.3.1. Radionucléides d'origine naturelle :.....	6
--	---

I.3.3.2. Les radionucléides d'origine artificielle:.....	8
--	---

I.4. Conséquences de la pollution des sols.....	8
---	---

I.5. Remédiation des sols .....	10
---------------------------------	----

I.5.1. Le traitement ex situ :.....	10
-------------------------------------	----

I.5.2. Le traitement in situ : .....	10
--------------------------------------	----

I.6. Techniques de la remédiation des sols. ....	10
--	----

I.6.1. Electro-remédiation.....	10
---------------------------------	----

I.6.2. Rinçage des sols.....	11
------------------------------	----

I.6.3. L'extraction des vapeurs du sol. ....	11
--	----

I.6.4. Stabilisation. ....	11
----------------------------	----

I.6.5. La vitrification. ....	11
-------------------------------	----

I.6.6. Lavage du sol .....	12
----------------------------	----

I.6.7. Bio-piles. ....	12
------------------------	----

I.6.8. Phytoremédiation. ....	12
-------------------------------	----

<b>Chapitre II. PHYTOREMEDIATION</b> .....	13
--	----

II.1. Introduction. ....	13
--------------------------	----

II.2. Éléments nutritifs du sol essentiels aux plantes .....	13
II.3. Mécanismes de la phytoremédiation.....	14
II.3.1. Phytoextraction.....	15
II.3.2. Rhizofiltration.....	15
II.3.3. Phytostabilisation.....	16
II.3.4. Phytodégradation.....	17
II.3.5. Rhizodégradation.....	18
II.3.6. Phytovolatilisation.....	19
II.4. Potentiel épuratoire.....	20
II.5. La phytoremédiation des radionucléides.....	22
II.6. Exemple de plantes accumulatrices : Famille des <i>Asteracea</i> (COMPOSEES).....	23
II.6.1. Racine.....	24
II.6.2. Tige.....	24
II.6.3. Les feuilles.....	24
II.6.4. Appareil sécréteur.....	25
II.6.5. Appareil reproducteur.....	25
II.6.6. Fleur.....	25
II.7. Présentation de radionucléides étudiés.....	25
II.7.1. Uranium.....	25
II.7.2. Strontium.....	26
II.7.3. Césium.....	27

### **Partie Expérimentale.**

Introduction.....	28
<b>I. Matériels et méthodes.....</b>	<b>28</b>
I.1. Conditionnement du sol.....	28
I.1.1. Tamisage.....	28
I.1.2. Aération et humidification.....	29
I.1.3. pH.....	29

I.1.4. Taux d'humidité.....	30
I.1.5. Teneur en matière organique (MO) .....	31
I.1.6. Capacité d'échange cationique.....	31
I.2. Culture de l' <i>Astéraceae</i> dans un sol contaminée.....	32
I.2.1. Préparation des pots. ....	32
I.2.2. Mis en terre des plantes.....	32
I.2.3. Contamination des pots : .....	33
I.2.4. Prélèvement des échantillons des plantes.....	34
I.3. Analyse par Torche à Plasma (ICP-OES). ....	34
I.3.2. Procédure de minéralisation du sol. ....	35
I.3.3. Procédure de minéralisation des plantes.....	36
I.3.4. Principe de l'ICP-EOS. ....	39
I.3.5. Mise en marche de l'ICP-OES et analyse. ....	40
<b>II. Résultats et discussions.....</b>	<b>43</b>
II.1. Résultats des caractéristiques physico-chimiques du sol et des plantes. ....	43
II.2. Résultats de l'analyse minéralogique (ICP-OES).....	43
II.2.1. Résultats de l'analyse minéralogique du sol .....	43
II.2.2. Résultats de calcul de quantités de contaminants absorbées par la plante.....	44
II.2.2.1. Masses d'uranium absorbées. ....	44
II.2.2.2. Masses de strontium absorbées .....	46
II.2.2.3. Masses de césium absorbées.....	48
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>51</b>
<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>52</b>

**Références.**

**ANNEXES.**

**Glossaire chimique.**

**Glossaire biologique.**

## INTRODUCTION GENERALE.

Depuis sa découverte et quel que soit son origine (naturelle ou artificielle), la radioactivité est utilisée dans plusieurs domaines: recherche, médecine, industrie et production d'électricité. A l'instar des autres activités humaines, ces applications génèrent des sous-produits, des rejets ainsi que des sites contaminés (ex. anciennes mines d'uranium) qui peuvent avoir des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement.

La contamination des sols, des eaux souterraines, des sédiments, des eaux de surface et de l'air par les radionucléides est l'un des principaux problèmes environnementaux.

Il existe différentes méthodes physico-chimiques de décontamination des sols. Cependant, ces technologies d'ingénierie traditionnelles peuvent être non écologiques et trop coûteuses pour la restauration de la plupart des sites.

L'assainissement et la restauration des sols ou sites contaminés par des polluants et particulièrement, par des radionucléides, nécessitent donc, une approche écologique et efficace pour la durabilité environnementale et pour la protection de la santé humaine. Pour cela, plusieurs études ont montré qu'il existe d'autres méthodes pouvant être des alternatives peu coûteuses et peu technologiques aux techniques de décontamination actuelles.

Ces méthodes sont :

- La bioremédiation microbienne qui utilise des micro-organismes (bactéries, algues et les champignons) pour dégrader et transformer les composés dangereux du sol et de l'eau ;
- La phytoremédiation, objet de notre étude, est une technique de réhabilitation rentable et respectueuse de l'environnement qui utilise les capacités des plantes pour éliminer, contenir, ou rendre moins toxiques les polluants. Elle peut être appliquée à des métaux lourds, à des radioéléments ou à des polluants organiques présents dans le sol ou dans l'eau.

Au cours de l'évolution, les plantes ont développé plusieurs mécanismes pour s'adapter et se multiplier dans des conditions hostiles. Certaines ont adopté des mécanismes racinaires pour y immobiliser les polluants et diminuer leur transfert vers les feuilles. D'autres ont développé des mécanismes complexes pour tolérer, absorber et accumuler dans leurs tissus des quantités significatives de polluants.

Dans le cadre de ce mémoire, un exemple de phytoremédiation de radionucléides par une espèce de la famille des *Astéraceae*, sera étudié, en l'occurrence, la phytoremédiation de

## INTRODUCTION GENERALE

---

l'uranium naturel (U-238), du strontium stable (Sr-87) et du césium stable (Cs-133) par le *Crepis Rubra*.

L'étude consiste à déterminer, la quantité respective des radionucléides absorbée par la plante au cours du temps, après contamination du sol.

L'analyse minéralogique des éléments dans la plante et dans le sol, sera réalisée par une technique spectrométrique, la Spectrométrie à Emission Optique couplée à la Spectrométrie à Induction Plasma (ICP-OES). Et ce, après la minéralisation des échantillons.

Ce mémoire comprend deux parties, l'une bibliographique et l'autre expérimentale.

La partie bibliographique comprend deux chapitres dont le premier introduit des généralités sur les sols, le deuxième présente la phytoremédiation, ses mécanismes et un exemple de plantes.

La partie expérimentale comprend le conditionnement du sol avant son utilisation et un prélèvement périodique d'échantillons de plante pour le suivi de l'absorption des radionucléides. Le sol à utiliser est un sol qui provient du site du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger(CRNA).

## **CHAPITRE I:GENERALITES SUR LES SOLS.**

### **I.1.Introduction.**

Le sol est une entité naturelle, superficielle et souvent résultante de la transformation d'un matériau minéral sous l'influence des processus physico-chimiques et biologiques.

Le sol est l'interface d'échange dynamique à la surface du globe entre l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la géosphère. Il présente la particularité de lier intimement l'organique et le minéral, ce qui lui confère des propriétés dépassant la simple addition des propriétés géologiques et biologiques [1].

Le mélange de particules minérales et organiques occupe environ 50 % du volume du sol. Le reste du volume, est constitué de pores de formes et de tailles différentes. Les espaces poreux contiennent de l'air et de l'eau et servent de canaux pour le mouvement de l'air et de l'eau. Ils sont aussi des voies d'extension et de croissance des racines. Les racines ancrées dans le sol soutiennent les plantes et absorbent l'eau et les nutriments [2].

### **I.2.Contamination du Sol.**

La contamination du sol désigne la présence d'une substance chimique hors de son lieu d'utilisation et/ou présente à une concentration supérieure à la normale, engendrant des effets néfastes plus ou moins importants sur les organismes [3].

Les polluants du sol sont analogues à ceux trouvés dans l'eau et sont issus des activités humaines telles l'agriculture, les industries ou les activités urbaines. Les polluants peuvent être organiques ou inorganiques avec des comportements différents. On y trouve des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et des produits organiques synthétisés par l'industrie chimique (produits phytosanitaires, solvants chlorés, PCB, hydrocarbures aromatiques), des métaux lourds et des radionucléides. Tous ces polluants sont très fortement associés à la matrice des sols, ce qui les rend difficiles à éliminer. Ainsi, nettoyer un sol est bien plus compliqué que nettoyer de l'eau ou de l'air [4].

### I.3. Les contaminants du sol.

Il existe une grande variété de contaminants du sol. Ils appartiennent à trois grandes classes :

#### I.3.1. Les composés organiques.

Les déchets organiques de divers types sont retrouvés dans les sols et sont d'origine naturelle ou générés par l'activité humaine [5]. Le tableau 1 regroupe les principaux contaminants organiques et leurs familles de production. Ces composés sont nocifs pour la santé humaine et l'environnement (faune et flore).

Tableau 1 : Les principaux contaminants organiques et leurs familles de production [5].

Famille de produits	Polluants types	Molécules chimiques types	Famille de comportement
Hydrocarbures ou huiles minérales types carburant combustibles)	-Essence -diesel -Fuel -Goudrons .....	- alcanes (hydrocarbure aliphatique) - cyclane (hydrocarbures aliphatiques cycliques) - hydrocarbures aromatique monocyclique - aromatique polycycliques (HAP).	-Certains CAV. (BETEX)
Produits organiques industriels	- Base de chimie de synthèse - Solvants traitements	- Hydrocarbures aliphatique et aromatique halogénées (chlorés, fluorés, bromés, iodés) - Aromatique monocyclique, substitués (halogénés, phénolés, nitrates) - Non aromatique polycyclique (HAP) - Composés phénoliques, PCB, PCT, dioxines, furanes.	- COV halogénés (volatils). - Certains DNAPL (denses). - SVOC halogènes (semi - volatils) - La plupart des CFC.
Phytosanitaires	- Herbicides - Insecticides - Acaricides - Raticides - - Fongicides	-Amides. -Acides aryloxyalkanoïque ,diphényle-éther carbamates. -Organophosphorés, organochlorés et pyrethroides ,azoles ,carbamates ,dithiocarbamates.	Principale source de pollution diffuse dans l'environnement.
Autres	Tensioactifs militaire	-Détergents anioniques et cationiques - Substances à usages militaire, explosifs.	Tension actifs PEP .

### **I.3.2. Les métaux lourds.**

Le terme "métaux lourds" désigne le groupe des métaux et métalloïdes de numéro atomique généralement supérieur à  $Z=11$  et d'une masse volumique supérieure à  $5\text{g/cm}^3$ . Ces éléments sont naturellement présents à de faibles concentrations dans les sols. Certains sont des micronutriments essentiels pour les plantes, les animaux et les humains. Cependant, à des concentrations élevées, ils peuvent être toxiques et nuire à la santé humaine en raison de leur nature non biodégradable et donc, accumulation dans les tissus des organismes vivants.

Les principales sources anthropiques des métaux lourds sont:

- les zones industrielles;
- les résidus miniers;
- les déchets à forte teneur en métaux;
- l'application d'engrais, les fumiers animaux;
- les boues d'épuration;
- les pesticides;
- les résidus de combustion du charbon;
- le déversement de produits pétrochimiques et les dépôts atmosphériques provenant de sources diverses.

Les métaux lourds sont les polluants les plus persistants et les plus complexes à traiter dans la nature [6].

### **I.3.3. Les Radionucléides.**

Un radionucléide ou radioélément est issu de la désintégration d'un atome instable (père) dans une période de temps donnée (période radioactive), en émettant de l'énergie sous forme de rayonnement (désintégration radioactive). Au cours d'une désintégration radioactive, il peut y avoir trois modes d'émissions désignés par les trois premières lettres de l'alphabet grec: alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) et gamma ( $\gamma$ ) [7]. Les radionucléides proviennent de deux origines : origine naturelle et origine artificielle.

**I.3.3.1. Radionucléides d'origine naturelle.**

Les radionucléides naturels peuvent être d'origine terrestre ou cosmique [8].

La radioactivité naturelle terrestre due aux radioéléments existant dans l'écorce terrestre. On distingue deux catégories de radionucléides naturels terrigènes :

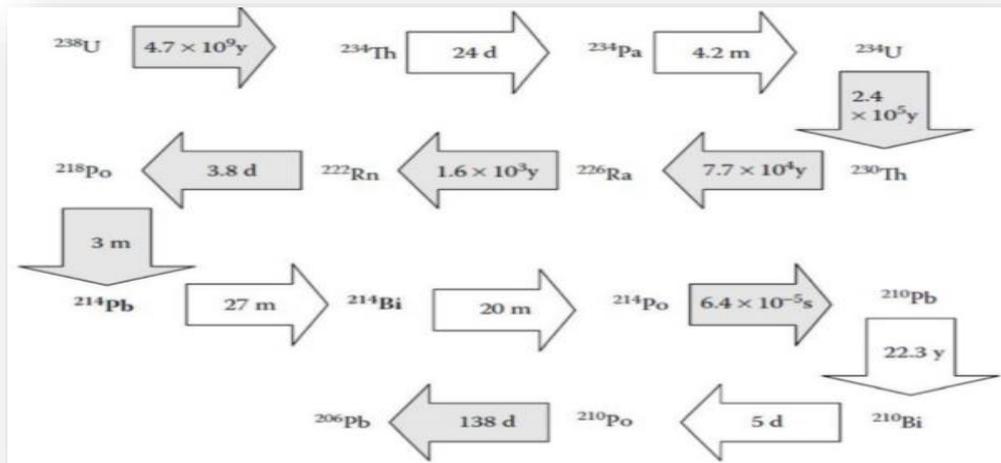
-La première est constituée d'au moins 14 radionucléides qui coexistent dans la nature avec des isotopes stables dont les principaux sont le potassium-40 (K-40) et le rubidium-87 (Rb-87) (Tableau2);

-La deuxième catégorie est constituée par trois familles de radionucléides précurseurs, l'uranium-238 (U-238), l'uranium-235 (U-235) et le thorium-232 (Th-232) et leurs descendants [9](Figure 1).

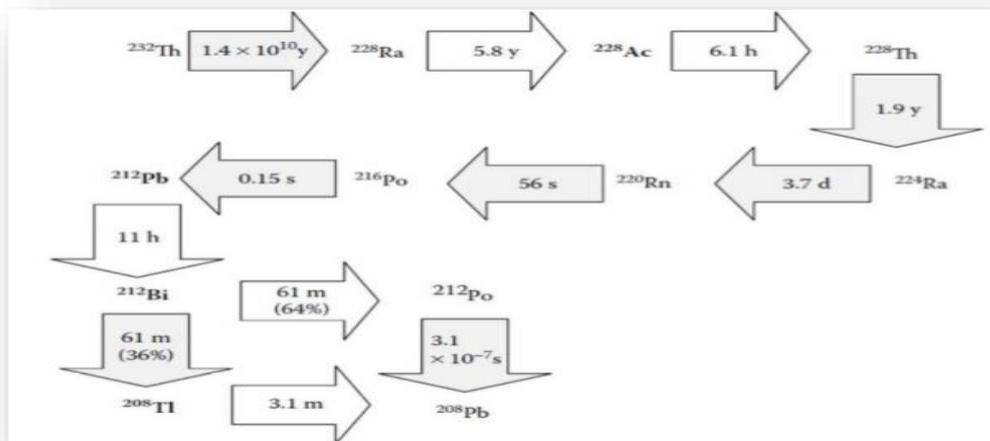
Tableau 2 : Radionucléides d'origine naturelle et leurs périodes radioactives [8].

Radioéléments d'origine terrestre		Période	Radioéléments d'origine cosmiques	Période
Série 1	Potassium-40	$1,25 \cdot 10^9$ a	Hydrogene-3	1226 a
	Rubidium-87	$4,7 \cdot 10^{10}$ a	Carbone-14	5570 a
	Indium-115	$6 \cdot 10^{14}$ a	Berullium-7	53j
	Lanthane-138	$2 \cdot 10^{11}$ a	Beryllium-10	$2,5 \cdot 10^6$ a
	Neodyne-144	$5 \cdot 10^5$ a	Sodium-22	2,6 a
	Samarium-147	$1,3 \cdot 10^{11}$ a	Aluminium-26	$7,4 \cdot 10^5$ a
	Letetium-176	$2,4 \cdot 10^{10}$ a	Silicium-32	710 a
	Tungstène-180	$10^{14}$ a	Phosphore-32	14,3 j
	Thénium-187	$5 \cdot 10^{10}$ a	Phosphore-33	25j
	Platine-190	$10^{12}$ a	Soufre-35	87j
			Chlore-36	$3,1 \cdot 10^5$ a
			Chlore-39	1h
			Argon-37	35j
			Argon-39	270 a
Série 2	<b>Famille naturelle.</b>			
	Uranium-238			
	Thorium-232			
	Uranium-235			

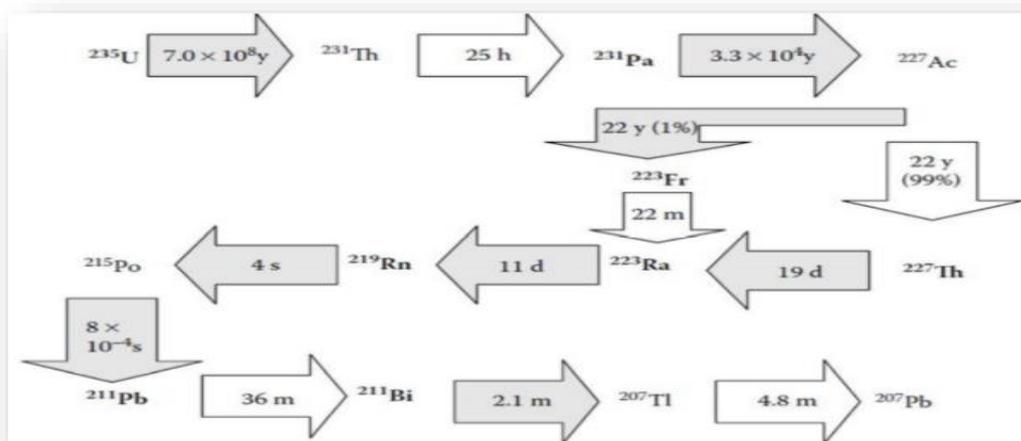
a :année ; h: heure ; j: jours



(a)



(b)



(c)

Figure 1 Schéma de désintégration de l'Uranium-238 (a), du Thorium-232 (b) et de l'Uranium-235 (c) [10].

La radioactivité d'origine cosmique est constituée par les radionucléides issus de l'interaction du rayonnement cosmique chargé de particules (protons) et les atomes gazeux (hydrogène, oxygène, azote, argon... etc.) présents dans l'atmosphère. Les principaux radionucléides d'origine cosmique sont le tritium (H-3) et le carbone(C-14)(Tableau 2).

### **I.3.3.2.Les radionucléides d'origine artificielle.**

Les radionucléides artificiels proviennent d'une réaction nucléaire provoquée artificiellement sur des nucléides stables. En effet, il est possible de provoquer artificiellement une instabilité radioactive en transformant le noyau d'un élément stable en un noyau instable par un bombardement de particules (essentiellement alpha ou neutrons)[11]. Dans la nature, les radionucléides artificiels proviennent de l'intervention humaine telle que les accidents nucléaires ou les essais d'armes nucléaires. Les principaux radionucléides d'origines artificielles sont les isotopes du césium (Cs), de l'américium (Am) et les isotopes du strontium (Sr)[12].

La présence de ces radioéléments dans les différents compartiments de l'environnement (air, eau et sol) peut être nocive pour la santé humaine et l'environnement vu leur transfert dans la chaîne alimentaire [12].

## **I.4.Conséquences de la pollution des sols.**

Après que le sol ait été contaminé, les polluants subissent des transformations en passant par les eaux souterraines, les plantes et les eaux superficielles avant d'atteindre l'homme (Figure 2). La chaîne alimentaire est contaminée par différentes voies: via le transfert sol plante, puis la consommation de la plante par les animaux, suivie de la consommation par l'homme (ou directement par l'homme). Il peut aussi y avoir la contamination directe des plantes par dépôt sur les parties aériennes et la contamination des eaux [4].

Globalement, dès lors qu'un sol est contaminé, il représente une menace pour la sécurité alimentaire, non seulement du fait de l'absorption par les plantes mais aussi parce que les polluants peuvent suivre d'autres voies de transfert.

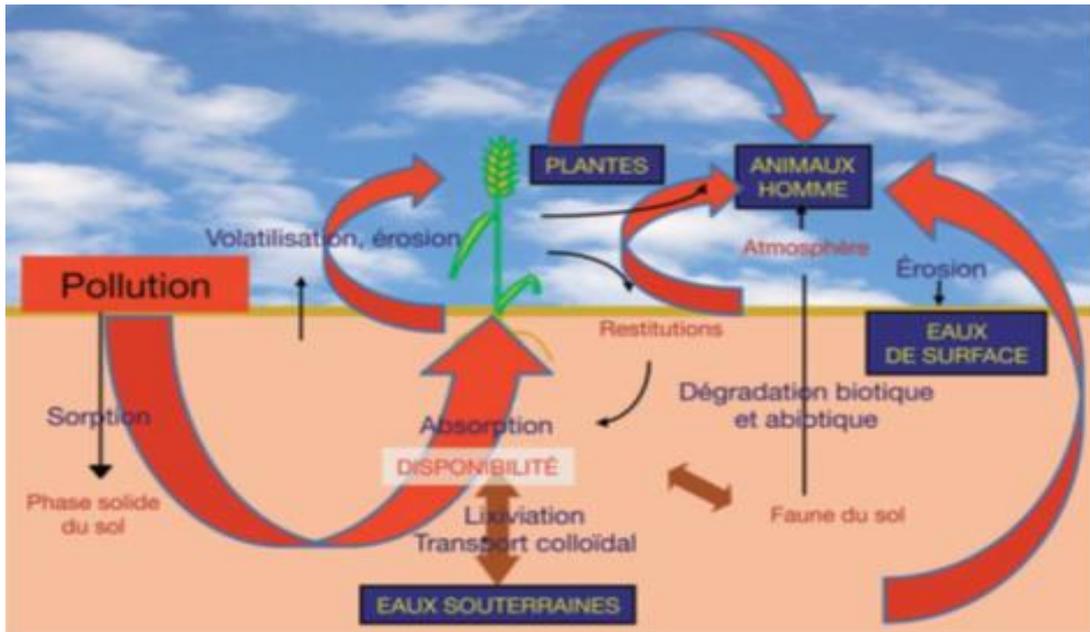


Figure 2 Le cycle des polluants dans le système sol-plante [ 4].

Un exemple de suivi du devenir d'un type de pollution tel qu'un métal lourd illustre toute la complexité du cheminement des polluants (Figure 3).

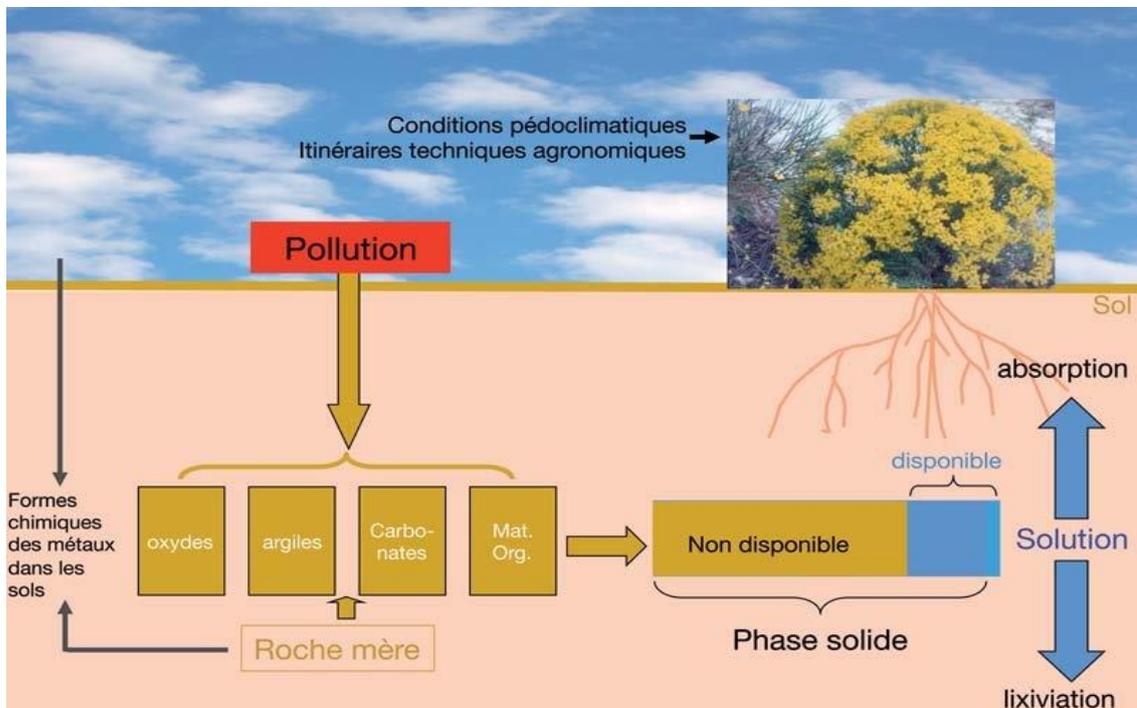


Figure 3 Exemple du devenir des métaux lourds dans les sols [ 4].

## **I.5.Remédiation des sols**

La remédiation des sols est la restitution des sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution par des procédés spécifiques. Les techniques utilisées doivent éviter le transfert de pollution [13]. La remédiation des sols suit au moins l'un des trois principes suivants : immobilisation, destruction et extraction du polluant. Il existe deux voies de traitement:

### **I.5.1.Le traitement ex situ.**

Le traitement ex situ consiste à excaver le sol, puis lui faire subir différents types de traitements : désorption thermique, oxydation ou dégradation biologique [4]. La terre traitée est ensuite, réutilisée sur place ou transférée dans un centre de stockage.

### **I.5.2.Le traitement in situ.**

Dans le cas du traitement in situ, le sol pollué reste en place. On lui applique alors, des procédés soit chimiques (Oxydation, réduction, lixiviation) et/ou Biologiques (altération naturelle soit la phytoremédiation).

Les polluants organiques par exemple, peuvent être éliminés en injectant dans le sol des oxydants puissants (procédé Oxy sol) [4].

## **I.6.Techniques de la remédiation des sols.**

Les sites contaminés nécessitent des procédures particulières pour restaurer l'aspect naturel du sol. Il existe trois (03) catégories de remédiation des sols: Chimique, physique et biologique.

### **I.6.1. Electro-remédiation.**

Le principe de ce procédé réside sur l'attraction de particules chargées dans le sol. Deux électrodes, une cathode et une anode sont insérées dans le sol contaminé. Un courant électrique y est appliqué et traverse le sol. Le champ magnétique généré propulse les métaux lourds présents sous forme ionique à travers les électrodes respectives. Arrivées aux électrodes, les particules métalliques sont extraites par adsorption sur les électrodes elles-mêmes ou par une résine échangeuse d'ions [14].

Il est à signaler que cette technique est en cours de développement et n'est pas encore répandue.

### **I.6.2.Rinçage des sols.**

Le rinçage des sols est une technique de remédiation chimique appliquée in situ. Elle est basée sur l'extraction des métaux lourds par l'injection d'un fluide dans le sol contaminé. Le fluide extracteur est pompé à la surface. Il contient ainsi les contaminants absorbés. Le rinçage des sols est appliqué pour tous types de contaminants mais seulement utilisé pour des sols perméables qui facilitent la pénétration du fluide [14].

### **I.6.3.L'extraction des vapeurs du sol.**

La technique par l'extraction des vapeurs du sol est utilisée pour l'élimination des COV par évaporation. Le principe de cette technique est de construire des murs horizontaux ou verticaux à l'intérieur du sol contaminé par lequel un vide est soufflé dans les parties contaminées pour permettre l'évaporation des polluants volatils. L'extraction des vapeurs est réalisée par un puits placé à une extrémité de l'un des murs. Les polluants gazeux sont traités avant leur libération dans l'atmosphère. Cette procédure est utilisée pour traiter des sols très perméables [14].

### **I.6.4.Stabilisation.**

La technique par stabilisation est la réduction de la toxicité, la mobilité et la solubilité du contaminant pour minimiser son risque de propagation aux alentours.

Un exemple de technique de stabilisation est le mélange d'asphalte. Cette technique chimique est utilisée pour le traitement des contaminants d'hydrocarbures. Il s'agit d'ajouter à un sol contenant du pétrole, un mélange de bitume chaud. La solution résultante forme un agrégat qui est ensuite traité pour extraire les contaminants du sol [14].

### **I.6.5.La vitrification.**

La vitrification est une technique qui implique l'application de hautes températures (1600-2000C°), pour faire fondre le sol et ses polluants, dans le but de bloquer la migration des composés nocifs vers des zones non polluées. La vitrification des polluants du sol s'effectue selon trois méthodes différentes [14]:

- Méthode thermique: utilisation de la chaleur d'une source externe avec un réacteur.
- Méthode électrique: insertion d'électrodes en graphite pour fournir de la chaleur sous forme d'une énergie électrique.
- Méthode de plasma: très favorable pour atteindre des températures élevées à environ 5000C°.

**I.6.6.Lavage du sol .**

Le lavage du sol contaminé consiste en la séparation de terre fine des particules grossières du sol telles le gravier et le sable, par l'utilisation de solvants (eau). Les solvants sont choisis suivant leur pouvoir solubilisant et leurs effets sur l'environnement. La séparation de particules peut contribuer à l'assainissement des sols. Les hydrocarbures qui ont tendance à s'accrocher aux parties les plus fines comme l'argile en sont un exemple. Celles-ci sont ensuite traitées pour obtenir une pureté complète [14].

**I.6.7.Bio-piles.**

La technique bio-piles est une méthode biologique d'assainissement ex situ basée sur la biodégradation des contaminants du sol. Elle est principalement efficace pour éliminer le pétrole, les composés organiques volatils et les pesticides chimiques [14].

Le procédé nécessite au préalable une excavation, les sols pollués sont mélangés avec un amendement (agent structurant) et sont par la suite dirigés vers une aire de traitement contenant au minimum un système de collecte de lixiviats et des unités d'aération afin d'optimiser le transfert de l'oxygène et la stimulation de la biodégradation.

La biodégradation est contrôlée (Température, taux d'humidité, nutriments, oxygène et pH)(15).

**I.6.8.Phytoremédiation.**

La phytoremédiation est un traitement biologique qui permet de décontaminer un sol à l'aide de végétaux possédant les capacités d'emmagasiner les contaminants dans leurs tissus. Différents mécanismes sont associés à la phytoremédiation [14]. Cette technique sera détaillée dans le chapitre II.

## Chapitre II. PHYTOREMEDIATION.

### II.1.Introduction.

La phytoremédiation est une technique de réhabilitation environnementale qui utilise les capacités des plantes pour éliminer, contenir, ou rendre moins toxiques les polluants [16].

Le terme phytoremédiation est composé du préfixe grec « phyto » qui signifie plante et du mot latin « remedium » qui fait référence à l'élimination d'un mal[17]. La phytoremédiation est une approche de décontamination des sols, des eaux et des airs de polluants organiques et inorganiques par l'utilisation de plantes [18] [19]. Cette technique a pour but d'éliminer, de contenir ou de rendre moins toxique les contaminants environnementaux réduisant le risque de dégradation des écosystèmes naturels [19] [20]. Elle tire profit de l'énergie solaire pour extraire et concentrer certains éléments de l'environnement. Certaines plantes ont développé des mécanismes complexes pour tolérer, absorber et accumuler dans leurs tissus des quantités significatives de polluants [16].

### II.2.Éléments nutritifs du sol essentiels aux plantes .

Les plantes et les microorganismes dans le sol ont besoin de certains éléments nutritifs essentiels pour leur cycle de vie. Ces nutriments sont disponibles sous forme d'ions, de composés nutritifs que les plantes et les micro-organismes peuvent absorber et utiliser pour leurs croissances. Dans le cas des plantes, les éléments nutritifs sont généralement absorbés par les racines sous forme de cations et d'anions à partir de l'eau, des sols ou de la solution du sol. La majorité des nutriments présents dans les sols se trouvent dans les minéraux et la matière organique[2], exemple :

- L'altération de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) fournit du calcium, sous forme de  $\text{Ca}^{2+}$  ;
- L'altération de l'orthoclase-feldspath ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ ) libère le potassium sous forme de  $\text{K}^+$  ;
- La décomposition de la matière organique.

Aucun autre élément ne peut se substituer complètement à ces éléments, ces éléments sont considérés comme essentiels pour la croissance de la plupart des plantes. Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont combinés dans des réactions de photosynthèse et sont obtenus à partir de l'air et de l'eau[2]. Les autres éléments (Tableau3), nommés oligoéléments, sont obtenus en grande partie à partir du sol et jouent des rôles très importants dans un grand nombre de molécules biologiques, ce sont des cofacteurs et des biocatalyseurs (catalyseurs

enzymatiques). Ces derniers sont indispensables à faibles concentrations mais sont toxiques à fortes concentrations[21]. Le passage de la fonction d'oligo-élément à celle d'élément toxique dépend de la nature, de la teneur et de la disponibilité de l'élément et du milieu considéré [22].

Tableau 3 Les éléments essentiels absorbés par les racines des plantes et leurs formes d'absorption [2].

Nutriments	Symbole chimique	La forme absorbée habituellement par les plantes
<b>Macronutriments</b>		
<b>Nitrogène</b>	N	$\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$
<b>Phosphore</b>	P	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$
<b>Potassium</b>	K	$\text{K}^+$
<b>Calcium</b>	Ca	$\text{Ca}^{2+}$
<b>Magnésium</b>	Mg	$\text{Mg}^{2+}$
<b>Sulfure</b>	S	$\text{SO}_4^{2-}$
<b>Micronutriments</b>		
<b>Manganèse</b>	Mn	$\text{Mn}^{2+}$
<b>Fer</b>	Fe	$\text{Fe}^{2+}$
<b>Bore</b>	B	$\text{H}_3\text{BO}_3$
<b>Zinc</b>	Zn	$\text{Zn}^{2+}$
<b>Cuivre</b>	Cu	$\text{Cu}^{2+}$
<b>Molybdène</b>	Mo	$\text{MoO}_4^{2-}$
<b>Chlore</b>	Cl	$\text{Cl}^-$

### II.3.Mécanismes de la phytoremédiation.

La phytoremédiation est fondée sur les interactions sol-racine-polluants puisque l'essentiel des processus se passe dans l'environnement racinaire. En effet, le système racinaire peut développer une très grande surface (plusieurs mètres carrés) qui constitue le lieu des interactions avec le sol. Plusieurs mécanismes sont développés par les plantes pour épurer les sols, les principaux d'entre eux sont définis dans ce qui suit :

#### II.3.1.Phytoextraction.

Aussi appelée phytoaccumulation, la phytoextraction réfère à l'absorption des contaminants présents dans le sol par les racines de la plante. Par la suite, ces contaminants sont transférés et accumulés dans les parties aériennes de la plante (tiges et feuilles).

Cette méthode est très utilisée compte tenu du fait qu'il y a isolation des polluants, sans altérer la structure et l'activité biologique des sols (figure4)[23].

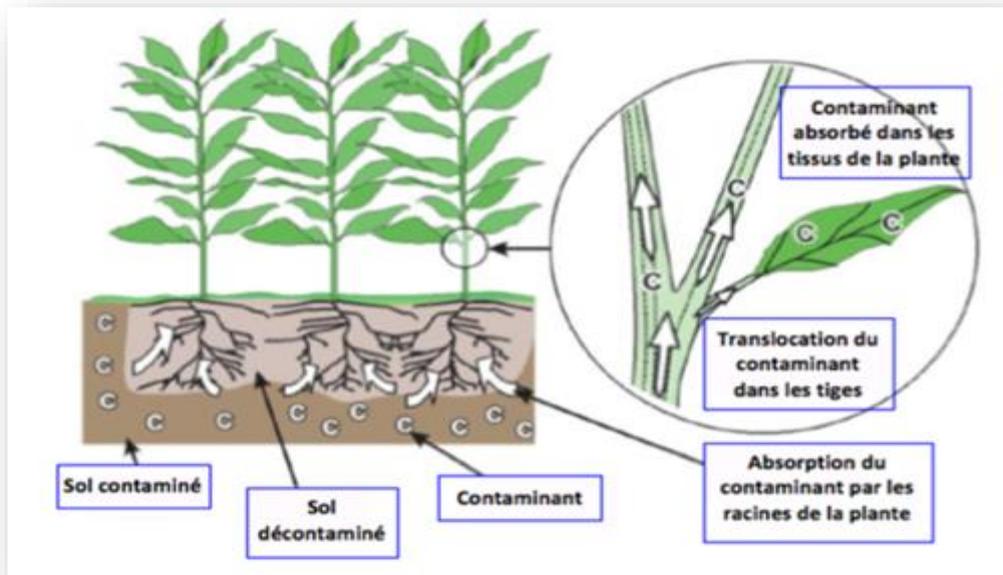


Figure 4 Processus de phytoextraction (ITRC,2001).

Deux principaux types de plantes sont utilisés en phytoextraction :

- Les plantes accumulatrices à forte production de biomasse ;
- Les plantes hyper accumulatrices à faible biomasse.

Les familles les plus utilisées sont les *Asteraceae*, les *Brassicaceae*, les *Euphorbiaceae*, les *Lamiaceae* et les *Scrophulariaceae*.

### II.3.2. Rhizofiltration.

La rhizofiltration consiste en l'adsorption sur les racines ou l'absorption dans les racines de la plante, des contaminants présents dans l'eau (souterraine de surface et eaux usées) [23] (figure 5).

L'espèce, *Calotropis gigantea* de la famille des *apocynaceae* est un exemple de plantes utilisée pour la rhizofiltration comme accumulateur du thorium et d'autres radionucléides en solution [24].

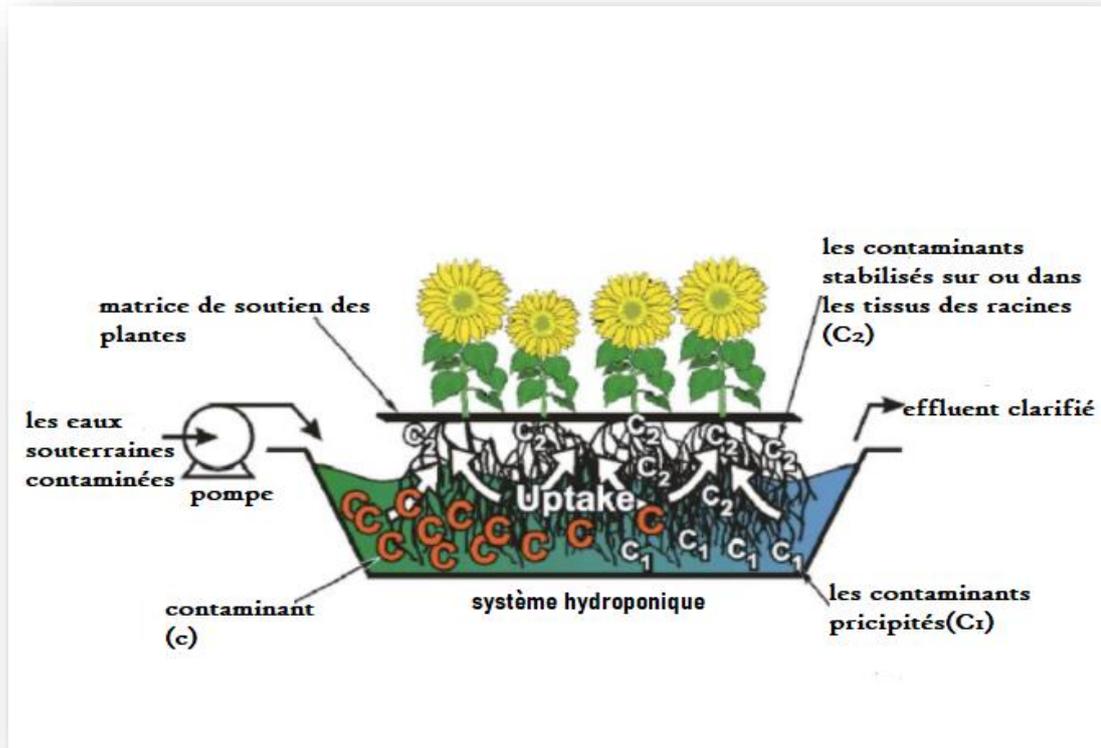


Figure 5 Représentation de la rhizofiltration [25].

### II.3.3. Phytostabilisation.

La phytostabilisation est la restriction de la mobilité et de la biodisponibilité des contaminants dans le sol et éviter leur migration due à l'érosion et au lessivage du sol (Figure6). La phytostabilisation confère certaines modifications à l'environnement du sol par l'insolubilité des polluants[23].

Les *Brassicaceae*, et les *Salicaceae* sont les familles des plantes qui présentent une bonne phytostabilisation [25].

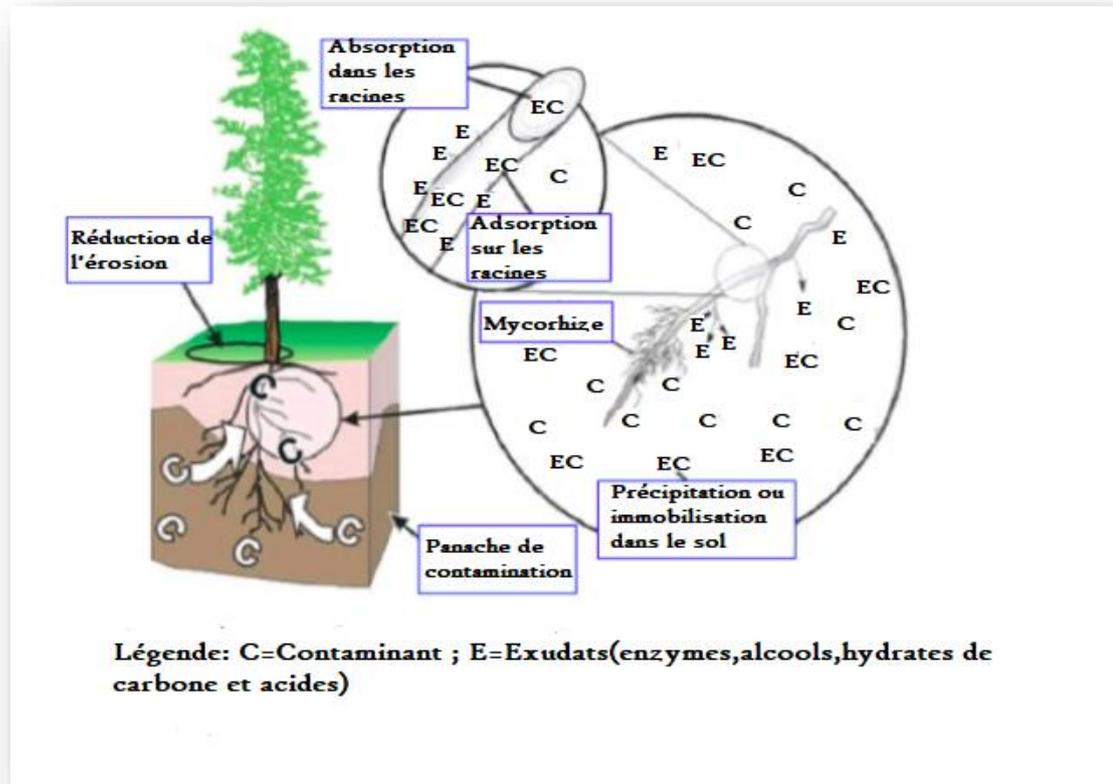


Figure 6 Représentation de la phytostabilisation [25].

### II.3.4. Phytodégradation.

La phytodégradation ou phytotransformation est la dégradation de polluants organiques, (solvants chlorés, herbicides, insecticides et les hydrocarbures) en des molécules moins toxiques et plus simples. Ces mécanismes de dégradation se font soit directement par le relâchement dans la rhizosphère d'enzymes produites par la plante, soit par le résultat de l'activité métabolique dans les tissus de la plante. Une fois dégradée, les contaminants sont absorbés, incorporés aux tissus de la plante et utilisés comme nutriments (Figure7)[23].

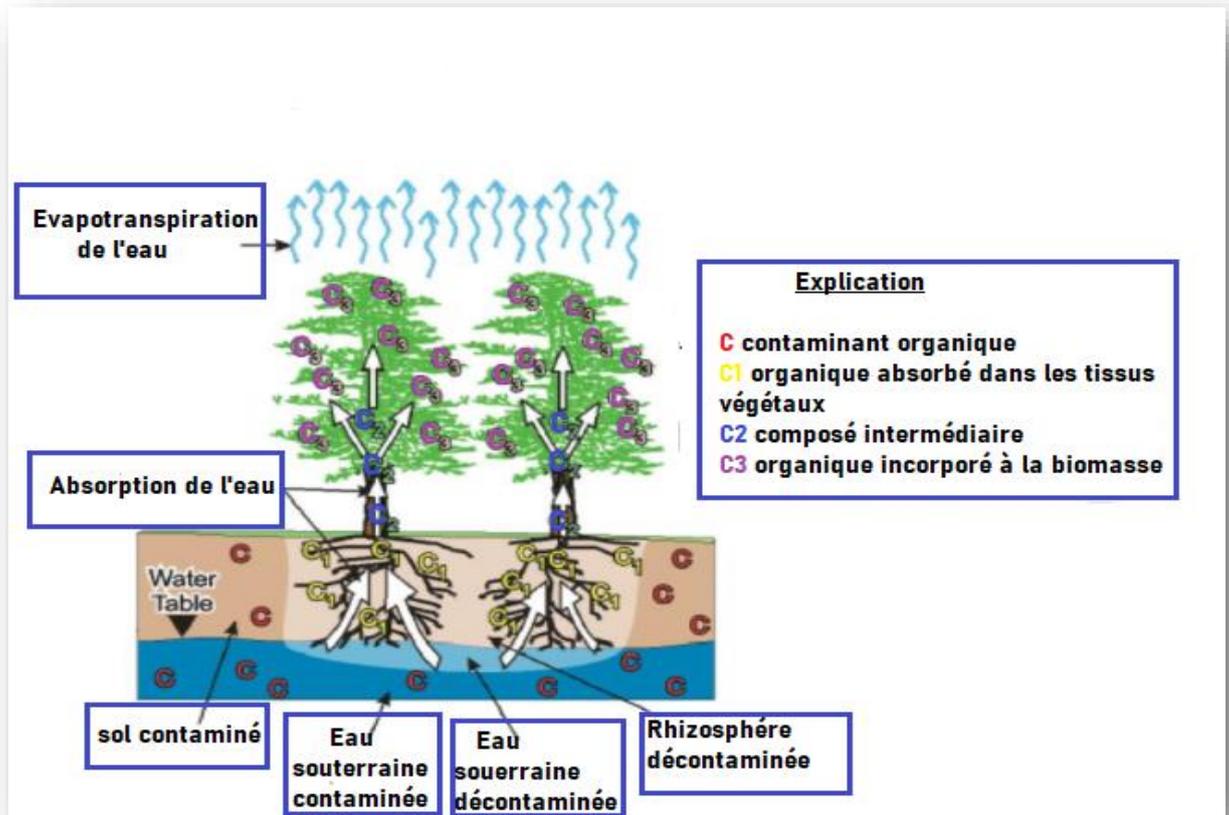


Figure 7 Phytodégradation des contaminants organiques[25].

Les *Salicaceae* (le peuplier jaune, le saule noir), les *Fagaceae* (le chêne vivant), les *bétulaceae* (le bouleau de rivière), les *cupressaceae* (le cyprès chauve) et les *Rosaceae* (l'écorce de cerisier) présentent une phytodégradation pour certains herbicides[23].

### II.3.5. Rhizodégradation.

La rhizodégradation, ou phytostimulation, consiste en la dégradation des contaminants présents dans la rhizosphère (pourtour, à 1 millimètre des racines) par l'activité microbienne (Figure 8). Une présence importante en variété, en quantité et en activité des micro-organismes, entraîne une augmentation de la biodégradation des contaminants dans le sol. En effet, certains d'entre eux (levures, champignon ou bactéries) ont la capacité de dégrader des contaminants organiques (solvants et les hydrocarbures) afin de les utiliser comme source de nutrition et d'énergie pour la plante[23].

Certaines plantes comme les *Salicaceae* et les *moraceae* ont été utilisées pour la rhizodégradation [25].

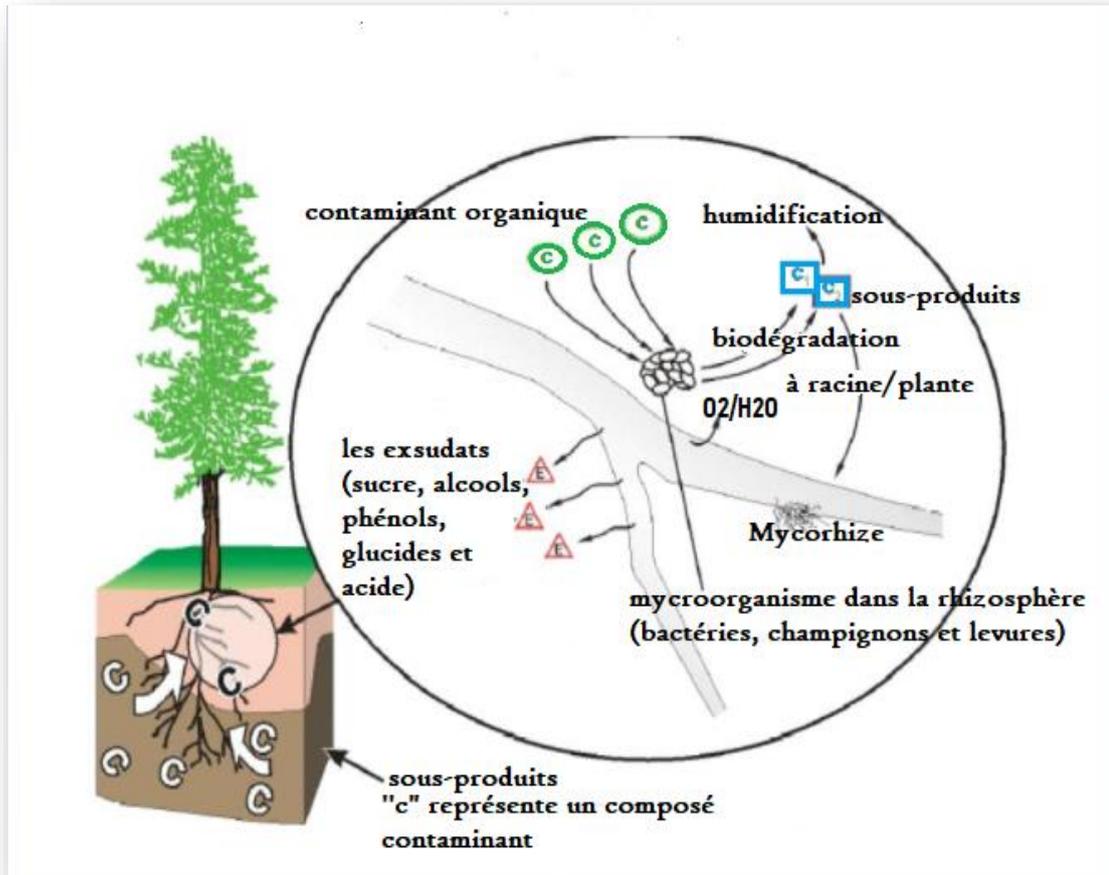


Figure 8 Schéma de la rhizodégradation [25].

### II.3.6. Phytovolatilisation.

La phytovolatilisation est l'utilisation de plantes pour extraire les contaminants du sol et les transformer ensuite en substances volatiles dans l'atmosphère. Cette technique convertit le contaminant en une forme élémentaire moins toxique (figure 9). Des études ont montré que certains métaux lourds (Se, Hg) et certains solvants organiques (tétrachlorure de carbone et trichloroéthane) pouvaient être éliminés par phytovolatilisation.

Certaines espèces de plantes telles que : les *Fabaceae* (la luzerne) et les *Brassicaceae* (la moutarde indienne et le canola) ont montré de bonnes performances en matière de phytovolatilisation [23].

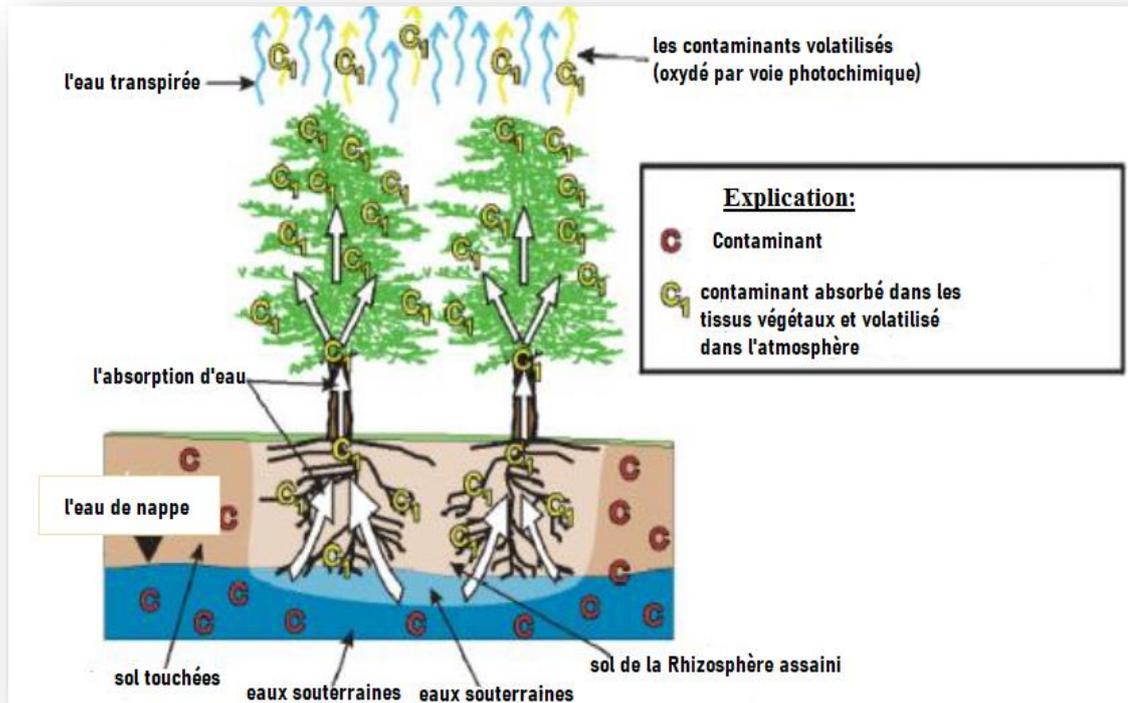


Figure 9 Représentation de la phytovolatilisation [25].

#### II.4.Potentiel épuratoire.

Le choix d'une plante pour la phytoremédiation est régi par ses qualités de tolérance et de concentration des polluants qui pourraient être toxiques pour un autre type de plantes. Le choix en question dictera par la suite certains aspects liés à la préparation et à l'entretien du site durant la phytoremédiation. Il a été trouvé que plus de 800 espèces végétales se prêtent à la phytoremédiation[26].

Le processus de sélection naturelle ou artificielle a fait de certaines plantes de bons agents de phytoremédiation. Dans les milieux contaminés, les plantes pouvant tolérer un certain seuil de pollution ont été favorisées dans le processus de sélection naturelle.

Ces plantes ont développé divers mécanismes de tolérance leur conférant ainsi un avantage évolutif. En étudiant davantage les mécanismes physiologiques et les traits génétiques permettant à certaines plantes (avec leurs microorganismes associés) d'être performantes. Il est aujourd'hui possible d'accélérer le processus de sélection naturelle grâce à la sélection de cultivars tolérants ou encore, par des méthodes de recombinaisons de l'ADN. C'est la sélection artificielle [26].

Le processus de sélection doit satisfaire les objectifs de la phytoremédiation. Pour cela cette sélection passe par certaines étapes [26](figure10) :

- Identifier le mécanisme de phytoremédiation et les objectifs de réhabilitation ;
- Recueillir des informations sur le site ;
- Identifier les critères importants pour la sélection des plantes ;
- Faire correspondre les critères ci-dessus avec la liste des plantes disponibles/proposées ;
- Sélectionner la plante et mettre en œuvre la phytoremédiation.

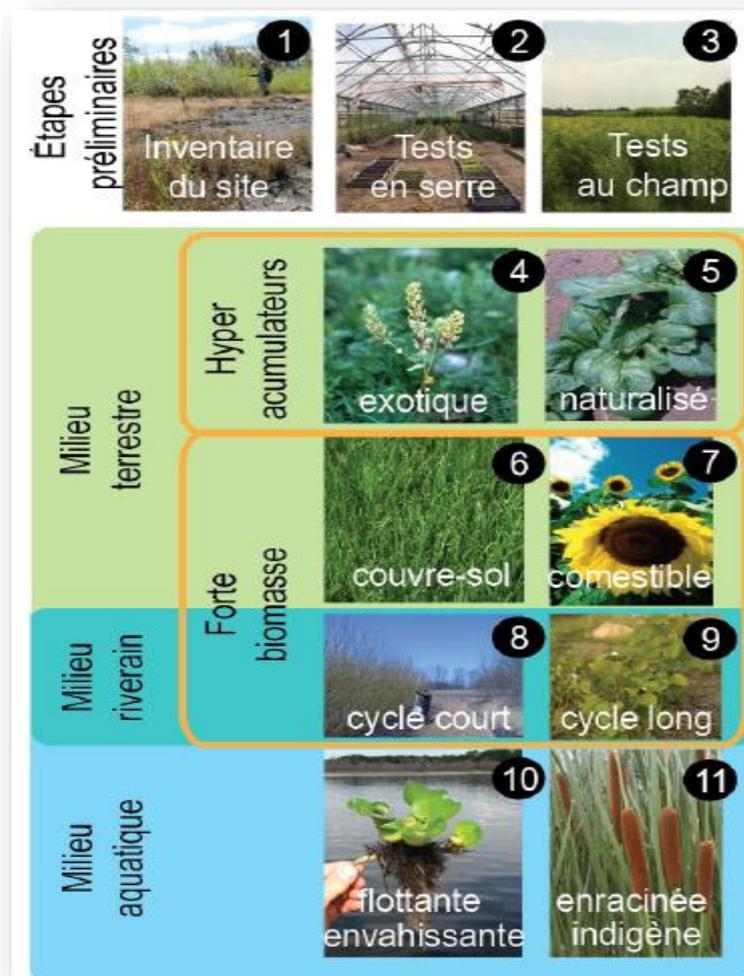


Figure 10 Principaux critères de sélection d'espèces végétales à des fins de phytoremédiation [26].

## II.5. La phytoremédiation des radionucléides.

La contamination par des radionucléides et/ou des éléments toxiques des sols, des sédiments, des eaux a été largement étudiée.

L'absorption et la distribution des polluants dans les plantes peuvent se faire soit par des voies directes ou exposition des organes aériens (feuilles, tiges et vrilles), soit par des voies indirectes (système racinaire dans la contamination liée au sol) (Figure 11), ce qui varie considérablement selon les espèces de plantes, en particulier dans le cas des radionucléides à longue durée de vie. Les propriétés/texture du sol (comme le séchage et la fissuration ultérieure des sols) dues à l'activité biologique, le transport facilité par les colloïdes dans le sol peut augmenter la mobilité et/ou l'affectivité des radionucléides [27]. La concentration des dépôts de radionucléides sur les parties aériennes varie et est modulée par les facteurs tels que le vent, la pluie, etc. Après lessivage, les radionucléides se déposent et sont absorbés par les particules du sol et deviennent disponibles pour l'absorption par les plantes [27].

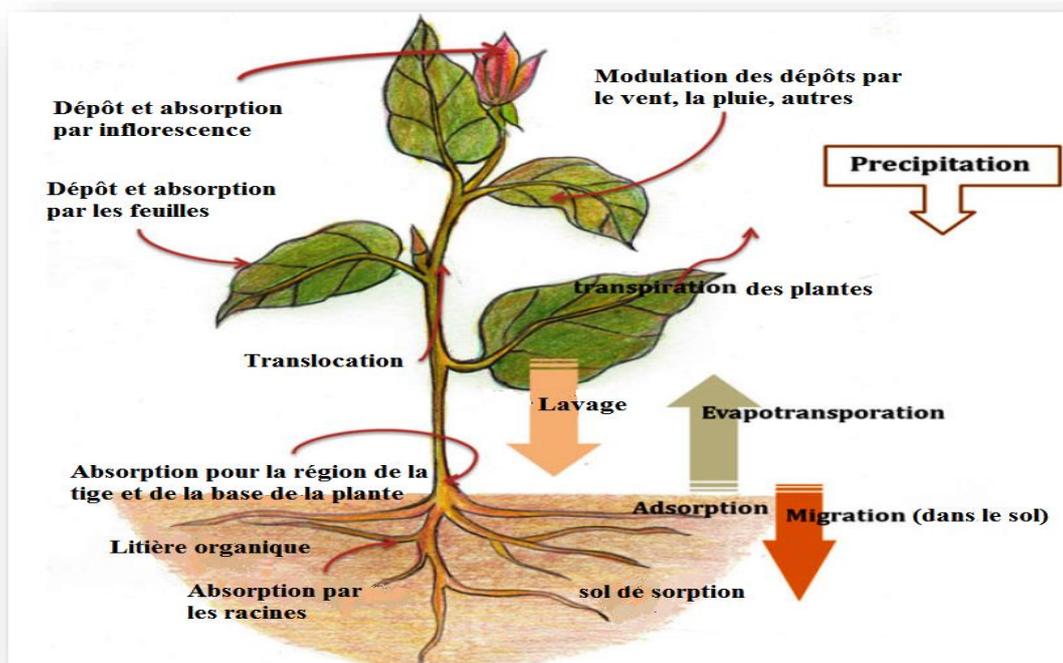


Figure 11 Voies de contamination des plantes par les radionucléides [27].

## II.6.Exemple de plantes accumulatrices : Famille des *Asteraceae* (*COMPOSEAE*).

La famille des *Asteraceae* est une famille de plantes dicotylédones. Elle est aussi appelée « famille de l'Aster » ou encore « Composées » et a pour nom scientifique *ASTERACEAE* Martinov (1820) ou encore *COMPOSITAE* Giseke (1972). Le mot « Aster » du grec signifie étoile, en relation avec la forme de la fleur (figure 12). La famille des *Astéraceae* est la plus large famille de Spermatophytes mais également l'une des plus évoluées. Elle contient 1 530 genres et plus de 23 000 espèces [28].



Figure 12 Quelques espèces de la famille des *Astéraceae*[28].

Les plantes de la famille des *Astéraceae* se rencontrent sur toute la surface de la terre. C'est une famille cosmopolite avec une diversification plus importante au niveau des régions sèches (bassin méditerranéen, sud de l'Afrique, Mexique, l'Amérique du Sud et sud-ouest des Etats-Unis) [28].

La famille des *Astéraceae* compose principalement de plantes herbacées, d'espèces ligneuses et plus rarement, des arbres. Elles sont majoritairement vivaces mais peuvent parfois être annuelles ou bisannuelles dont le cycle de végétation s'étale sur deux années civiles [28]. Ces plantes sont composées de :

### II.6.1. Racine.

La racine est une structure généralement souterraine. Elle sert à maintenir la plante dans le sol et permet l'absorption de l'eau et divers substances. Cette absorption se fait par des poils absorbants. Les *Astéraceae* sont capables de vivre plusieurs années grâce à un appareil végétatif particulier : les parties souterraines tubérisées. Lorsqu'elles sont annuelles ou bisannuelles, les racines sont majoritairement sous forme de racines pivotantes [28].

### II.6.2. Tige.

La tige est la partie de la plante qui porte les feuilles et les bourgeons, c'est une structure généralement aérienne, dressée et cylindrique. Les feuilles sont attachées à la tige par le pétiole au niveau des nœuds. Les *Astéraceae* sont principalement des plantes à tiges dressées mais possèdent aussi des plantes à rhizomes (tiges souterraines)[28].



Figure 13 Différents types de tiges [28].

### II.6.3. Feuilles.

Les feuilles des *Astéraceae* sont principalement simples et profondément découpées. Elles peuvent être penninervées, palmatinervées, lobées ou dentées[28] (Figure14).

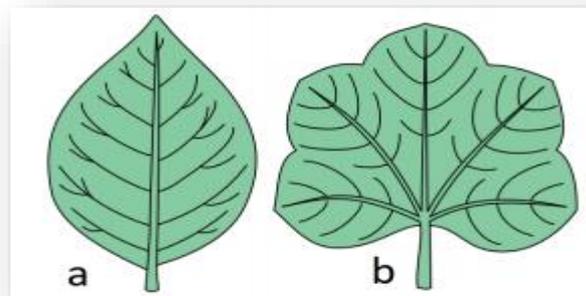


Figure 14 Nervations pennées (a) et palmés (b) [28].

#### **II.6.4.Appareil sécréteur.**

Les *Astéraceae* font partie des plantes qui possèdent un appareil sécréteur. Cet appareil apparait sous deux formes possibles [28]:

-Soit les tiges possèdent des cellules et des canaux sécréteurs à essence ou des poils sécréteurs. Cela leur confère une odeur aromatique particulière.

-Soit les tiges possèdent des laticifères. Elles sécrètent du latex où un suc blanchâtre observé à la cassure de la tige.

#### **II.6.5.Appareil reproducteur.**

L'appareil reproducteur est constitué par une ou plusieurs fleurs dont la fonction est de produire de nouvelles graines qui assureront la dissémination de l'espèce [28].

#### **II.6.6.Fleur.**

Les fleurs des *Astéraceae* sont appelées fleurons de couleur blanche, jaunâtre, verdâtre ou rosée. Ce sont des fleurs de taille réduite, sessiles (dépourvues de pédoncule). Elles sont soit actinomorphes avec une symétrie radiale, soit zygomorphes avec une symétrie bilatérale. La formule florale de la plupart des *Asteracea* est du type  $5S + 5P + 5E + 2C$ , c'est-à-dire que la fleur est composée de cinq sépales, cinq pétales, cinq étamines et deux carpelles [28].

### **II.7.Présentation de radionucléides étudiés.**

#### **II.7.1.Uranium.**

L'uranium (U) est un radionucléide naturel émetteur alpha, très abondant dans l'écorce terrestre. C'est un métal lourd possédant six isotopes naturels connus, allant de  $^{233}\text{U}$  à  $^{238}\text{U}$ , dont les demi-vies varient entre 69 ans et 4,47 milliards d'années. Parmi ces isotopes,  $^{238}\text{U}$  est l'isotope le plus abondant dans la nature (~99,275%), suivi de  $^{235}\text{U}$  (~0,720%), et de  $^{234}\text{U}$  (~0,005%). Dans le sol, l'uranium est principalement (80-90%) présent à l'état d'oxydation +6 sous forme de cation uranyle ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) [27].

L'uranium a joué un rôle important dans l'histoire de l'humanité. Il y a eu un certain nombre d'applications de cet élément et de ses produits de désintégration dans plusieurs domaines et principalement dans la production d'énergie. Malheureusement, l'uranium peut également être utilisé dans les armes de destruction massive, qui représentent toujours une menace potentielle pour la planète [29].

L'extraction, le traitement et la valorisation de l'uranium ont entraîné de graves problèmes environnementaux. En effet, ces procédés ont eu certains impacts sur la qualité des eaux de surface et souterraines, du sol, de l'air et du biote, notamment par leur contamination. Des mesures correctives appropriées sont donc, nécessaires. L'accent est désormais mis sur leur réhabilitation.

### **II.7.2.Strontium.**

Le (Sr) est un élément métallique alcalino-terreux (groupe II), mou et argenté présent dans l'eau et le sol. Il possède quatre (04) isotopes stables, à savoir  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$  et 30 isotopes radioactifs, le plus connu étant le  $^{90}\text{Sr}$ , un émetteur bêta dont la période de demi-vie est de 28,8 ans[30]. Le minerai de strontium se trouve généralement dans la nature sous forme de minéraux comme la célestine ( $\text{SrSO}_4$ ) et la strontianite ( $\text{SrCO}_3$ ). Cependant, il peut former une variété de composés solubles ou non dans l'eau.

Le strontium radioactif Sr-90 est un produit de la fission nucléaire et se retrouve dans l'environnement au cours d'essais d'armes nucléaires ou lors d'accidents nucléaires (ex. accident de Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011)). De plus, certaines activités anthropiques ont conduit au rejet et à l'élimination des déchets de strontium dans l'environnement, ce qui a un impact sur les sols et les eaux souterraines [31].

Le strontium est un analogue chimique du calcium et crée donc, un déséquilibre métabolique. En effet, une fois absorbé par le corps humain, le Sr-90 provoque le cancer des os, la leucémie et le ramollissement des tissus situés autour de l'os et de la moelle osseuse avec des effets durables. En raison de sa toxicité élevée et de sa capacité à être facilement impliqué dans les processus de migration géochimique et biologique, le Sr-90 est un radionucléide particulièrement dangereux [31].

### **II.7.3.Césium.**

Le Césium (Cs) est un métal alcalin (groupe I) et se trouve dans l'environnement sous forme de cation univalent. Le Cs-133 est le seul isotope stable parmi ses 40 isotopes connus (allant de Cs-112 au Cs-151). Les principaux isotopes radioactifs sont le Cs-137 (produit de fission) d'une demi vie de 30,2ans et le Cs-134 (produit d'activation) [32].

Comme le Sr-90, le Cs-137 est un produit de fission qui se retrouve dans l'environnement au cours d'essais d'armes nucléaires ou lors d'accidents nucléaires (ex. accident de Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011)). Ce qui a entraîné la contamination de grandes zones dans le monde.

Le Cs-137 représente alors, un danger pour la santé humaine et l'environnement que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans le sol. Il agit soit directement sur les organismes vivants, soit à travers la chaîne alimentaire ou les deux à la fois. Il provoque des effets radiotoxiques lorsqu'il est absorbé [33]. L'atténuation de la toxicité du césium nécessite le contrôle l'absorption des radionucléides par les plantes et par conséquent également de contrôler les propriétés du sol. Alternativement, l'accumulation de césium dans les plantes peut servir à diminuer le césium dans l'environnement.

## Introduction.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire du département des Déchets Radioactifs du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). Notre objectif est d'étudier le phénomène de phytoremédiation de certains radioéléments par une plante de la famille des *Astéraceae*. Le choix de l'étude s'est porté sur une espèce appelée *Crépis Rubra*. Les radioéléments d'intérêt sont le césium stable (Cs-133), le Strontium stable (Sr-87) et l'uranium naturel (U-238). Le sol choisi est sol provenant du site du CRNA. L'analyse du sol et des plantes est effectué par une technique d'analyse spectrométrique par ICP-EOS.

## I. Matériels et méthodes.

### I.1. Conditionnement du sol .

Le sol utilisé dans ce travail provient du site du CRNA. Avant utilisation, une quantité de ce sol à subir certaines opérations.

#### I.1.1. Tamisage.

Le sol a subi un tamisage pour le débarrasser de tous les débris (gravats, feuilles mortes etc.) avec des tamis de calibre inférieur ou égal à 5mm, (figure 15).



Figure 15 Tamisage du sol.

### **I.1.2.Aération et humidification.**

Pour assurer l'équilibre biologique du sol, celui-ci a été étalé pour aération à l'air libre pendant une période d'environ trois semaines intercalée, chaque 72 h environ, par son humidification par un léger arrosage avec de l'eau (figure 16).



Figure 16 Aération et humidification du sol.

Des quantités de ce sol ont été prélevées pour déterminer certaines de ses caractéristiques ; le taux d'humidité, la teneur en matière organique (MO) et le pH et la capacité d'échange cationique (CEC).

### **I.1.3.pH.**

Pour mesurer le pH du sol séché et tamisé ainsi que de l'eau distillée ont été utilisés. Le protocole est le suivant :

- Prendre 20g du sol et 50mL d'eau distillée dans un bécher de 100mL.
- Agiter pendant 5 minutes puis laisser reposer pendant 30 minutes ensuite mélanger avant d'immerger l'électrode du pH- mètre dans la solution.

### I.1.4. Taux d'humidité.

Le taux d'humidité du sol permet de déterminer le pourcentage massique (%) d'eau dans le sol étudié, c'est-à-dire la masse d'eau présente par rapport à 100 grammes de sol sec.

La méthode utilisée dans ce travail est la méthode gravimétrique qui consiste à :

-Peser dans un creuset en porcelaine préalablement calciné à 1000°C dans un four à moufle et refroidi dans un dessiccateur, environ 1 g de sol tamisé à 0.2mm de calibre ;.

-Sécher le creuset avec l'échantillon à l'étuve à 105°C, pendant 24 heures, ;

-Peser l'ensemble, après refroidissement dans le dessiccateur.

Le taux d'humidité se calcule par la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{msh - mss}{mss - mv} \cdot 100 \dots \dots \dots (1).$$

Le facteur d'humidité (Fh) représente la proportion de la masse sèche du sol contenue dans la masse humide.

$$Fh = 1 + \frac{(msh - mss)}{(mss - mv)} \dots \dots \dots (2).$$

**msh** : masse de la capsule plus l'échantillon séché à l'air.

**mss** : masse de la capsule plus l'échantillon séché à 105°C.

**mv** : masse de la capsule vide.

Tel que, les masses données sont la moyenne de 5 prélèvements:

<b>msh</b>	<b>mss</b>	<b>mv</b>
<b>17,6037</b>	<b>17,5832</b>	<b>16,6033</b>

### I.1.5. Teneur en matière organique (MO)

La matière organique (MO) est la matière produite par les êtres vivants (végétaux, animaux, champignons et micro-organismes). La matière organique compose leurs organes (tige, coquille, muscles, etc.).

La principale méthode pour déterminer directement et aisément la teneur en matières organiques (MO) d'un échantillon de sol est la perte au feu. La perte au feu (PAF) est la perte de poids d'un échantillon après calcination, rapportée au poids initial.

Le protocole de la perte au feu utilisé est le suivant :

- Prendre le creuset préalablement calciné et contenant l'échantillon (1g).
- Mettre le creuset et l'échantillon dans un four à moufle à 400°C pendant 1h et augmenter progressivement jusqu'à 1000°C pendant 3h. Dans notre cas l'augmentation s'est faite à pas de 4°C.
- Retirer le creuset puis le peser après refroidissement dans un dessiccateur..

Le calcul de la matière organique MO% par la formule suivante :

$$MO(\%) = 100 * \frac{(m_{ss} - m_{sc})}{(m_{ss} - m_v)} \dots \dots \dots (3).$$

**m<sub>sc</sub>** : masse de la capsule plus l'échantillon après calcination( luzack,al 1997), tel que:

mss	m <sub>sc</sub>	m <sub>v</sub>
65,9351	65,8845	63,9099

### I.1.6. Capacité d'échange cationique.

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure du pouvoir d'un sol à retenir et échanger des cations. Il s'agit d'un indicateur relatif du potentiel de fertilité d'un sol.

Dans le cadre d'une analyse de sol, la CEC est estimée à l'aide des teneurs en K, Mg et Ca. Les teneurs observées sont converties en milliéquivalents par 100 g de sol (még/100g) et additionnées pour l'estimation de la CEC ( voir ANNEXE 2).

$$CEC = \sum Ca + K + Mg \dots \dots \dots (4).$$

## I.2.Culture de l'*Astéraceae* dans un sol contaminée.

### I.2.1.Préparation des pots.

Pour pouvoir étudier la phytoremédiation dans les mêmes conditions pour les différents éléments d'intérêt, des pots de même dimension ont été choisis. En effet, dix (10) pots de 20 cm de diamètre ont été remplis avec deux (02) Kg de terre chacun (Figure 17).



Figure 17 Préparation des pots.

### I.2.2.Mis en terre des plantes.

L'espèce de la famille des *Astéraceae* appelée *Crépis Rubra* a été choisie pour cette étude, c'est une espèce herbacée vivace du genre *Crépis* typiquement méditerranéenne d'une couleur rose ou rose-violacé des ligules. c'est une plante annuelle ou bisannuelle, dont les fleurs roses rappellent de par leur forme celles du pissenlit. On lui prête d'ailleurs la même facilité de culture. Sa floraison a lieu d'avril à août selon la date de semis, elle dure plusieurs semaines [34].

Dans chacun des pots précédents, un plant de *Crépis Rubra* a été mis en terre. L'arrosage avec de l'eau de chaque pot se fait régulièrement, jusqu'à ce que les racines prennent dans le sol (Figure 18).



Figure 18 Mise en terre des plantes.

### I.2.3. Contamination des pots :

Pour contaminer le sol destiné à l'étude de la phytoremédiation, trois éléments ont été choisis. Un isotope du césium (Cs), un isotope du strontium (Sr) et l'uranium naturel (U-238). Les isotopes du Cs et du Sr sont des isotopes stables, le  $^{133}\text{Cs}$  et le  $^{87}\text{Sr}$ , respectivement.

Les trois contaminants sont utilisés sous forme liquide.

- L'U sous forme nitrate d'uranyle ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de pureté 99 %. (Malkinkradt) ;
- le Sr sous forme de nitrate ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) de pureté 99% (FLuka) ;
- le Cs sous forme Chlorure de Cs, de pureté 99% (FLuka) ( $\text{CsCl}$ ).

Chaque solution a été préparée dans un (01) litre d'eau distillée (voir ANNEXE 3).

Pour chaque élément, trois concentrations de contamination sont choisies. Le tableau 4 regroupe les différentes concentrations utilisées. Pour chaque élément, trois pots lui sont réservés chacun correspondant à une concentration.

Tableau 4 Les différentes concentrations choisies pour la contamination des pots.

Concentration	U (mg/kg sol)	Sr (mmol/l)	Cs (mmol)
Blanc	0	0	0
1	1.5	1	0.05
2	3	30	0.5
3	6	80	3

#### I.2.4. Prélèvement des échantillons des plantes.

-Les échantillons de plantes sont prélevés des pots et pesés. Le prélèvement se fait à partir des tiges, des feuilles et des fleurs pour chaque échantillon.

-Le prélèvement se fait à partir d'une série de 3 pots pour chaque élément (U, Cs, Sr) à des concentrations différentes.

Où, la fréquence des prélèvements est la suivante :

Tableau 5 La fréquence de prélèvement.

Jours	0	7	15	21	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

#### I.3. Analyse par Torche à Plasma (ICP-OES).

L'analyse par Spectrométrie à Emission Optique couplée à la Spectrométrie à Induction Plasma (ICP-OES) est une technique destructive. En effet, avant le passage à l'analyse, l'échantillon est d'abord minéralisé.

La minéralisation est la mise en solution des matrices solides. Les échantillons solides de l'environnement sont minéralisés en utilisant l'une des trois techniques suivantes :

- La minéralisation acide à chaud en système ouvert.
- La minéralisation par micro-ondes.
- La minéralisation par fusion alcaline(35).

Dans cette étude, c'est la technique de minéralisation par micro-onde qui a été appliquée aussi bien pour le sol que pour la plante d'intérêt.

### **I.3.1.Principe.**

La minéralisation assistée par micro-ondes est utilisée pour tous types d'échantillons solides dans le but de solubiliser les éléments à analyser. Ces éléments peuvent être organiques (analyses ICP : spectrométrie à plasma à couplage inductif, absorption atomique, four graphite etc..) ou inorganiques analyse ultérieure en HPLC, GCMS etc). L'échantillon est soumis à une attaque acide couplée à une montée en température rapide sous pression générée par les ondes. La matrice de d'échantillon est détruite et libère les éléments en solution [36].

La minéralisation par micro-ondes offre certains avantages comme:

-Le système offre une sécurité optimale en détectant, en continu, les paramètres critiques de réaction, ex. Température et pression.

-Tous les composants électriques sont à l'extérieur des réacteurs pressurisés et du champ des micro-ondes. Ainsi, la contamination des échantillons ou la destruction des capteurs, est impossible.

-Il n'y a pas de travail supplémentaire car aucun capteur, à l'intérieur des réacteurs, ne doit être monté, démonté ou nettoyé après chaque minéralisation [37] .

### **I.3.2.Procédure de minéralisation du sol.**

La minéralisation du sol a été effectuée en utilisant le protocole « Microwave Digestion of Soil » [ NF ISO 12914,Mars 2012, AFNOR]

-3,5g à 4g du sol séché est pesé et placé dans une bombe de minéralisation en téflon. 2,5mL de HNO<sub>3</sub> à 65% puis 7,5mL de HCl 37% sont ajoutés.

-La bombe reste ouverte pendant environ 5 à 10min afin d'assurer l'élimination de toutes vapeurs produites.

-La bombe est refermée et mise à chauffer durant 30 min au micro-onde, afin de bien solubiliser l'ensemble de l'échantillon. Les paramètres de chauffage sont automatiquement réglés, 20 à 30 minute après l'arrêt automatique du micro-onde, la bombe est retirée et laisser pour refroidissement avant de l'ouvrir, afin éviter la formation de mousses et des éclaboussures.

-L'échantillon ainsi minéralisé est d'abord filtré sur du filtre de verre puis dilué et complété jusqu'à 25mL avec l'eau distillée. Enfin, il est versé dans un flacon brun bien fermé qui sera par la suite analysé par l'ICP-EOS (torche à plasma).

### **I.3.3.Procédure de minéralisation des plantes.**

-La minéralisation des plantes a été effectuée en utilisant le protocole« Microwave Digestion of Dried Plants »[ NF ISO 12914,Mars 2012, AFNOR]

-300 mg de matières sèches sont pesés et placés dans des bombes de minéralisation en Téflon. (Figure 19 et 20). 5mL d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ , 65%) puis 2mL de peroxyde d'hydrogène ou eau oxygénée  $\text{H}_2\text{O}_2$  (35%) sont ajoutés dans chacune d'elle.



**Figure 19 Pesées des plantes sèches.**

-Les bombes restent ouvertes pendant environ 5 à 10minutes, afin d'assurer l'élimination de toutes vapeurs produites.

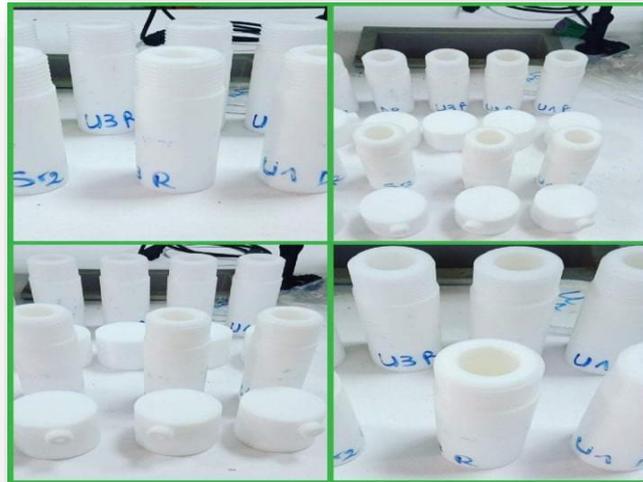


Figure 20 Bombes de digestion.

-Les bombes sont refermées et mises à chauffer durant 30 min au micro-onde (Figure 21) afin de bien solubiliser l'ensemble de l'échantillon. Les paramètres de chauffage sont automatiquement réglés.



Figure 21 Micro-ondes.

-20 à 30 minute après l'arrêt automatique de la micro-onde, les bombes sont retirées et laissées pour refroidissement (Figure 22) avant de les ouvrir, afin d'éviter la formation de mousses et des éclaboussures.



**Figure 22 Refroidissement des bombes de digestion.**

-Les échantillons ainsi minéralisés sont d'abord filtrés sur du filtre de verre puis dilués et complétés jusqu'à 25mL avec l'eau distillée (Figure23). Enfin, ils sont versés dans des flacons bruns bien fermés qui seront par la suite analysés par l'ICP-EOS (torche à plasma). Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux 14, 15, 16 et 17 (voir ANNEXE 6).



**Figure 23 Filtration des échantillons minéralisés.**

### I.3.4.Principe de l'ICP-OES.

La Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP (ICP-OES) repose sur l'excitation thermique des ions dans le plasma et l'analyse de la lumière émise par ces ions excités (Figure24).

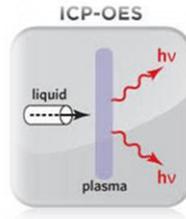


Figure 24 Excitation thermique des ions dans la plasma.

La solution est aspirée à travers un tuyau d'une pompe péristaltique vers le nébuliseur dans lequel elle est transformée en aérosols. Ces aérosols passent dans le plasma induit d'argon à une température de 8000 à 9000°C où ils subissent une atomisation, une ionisation et une excitation. (Figure 25).

Une lumière est alors émise par ces ions excités. Chaque élément émet des longueurs d'onde caractéristiques. Les longueurs d'onde sont alors séparées, identifiées et leurs intensités mesurées par un spectromètre. La concentration élémentaire est ensuite déterminée par confrontation à une calibration externe.

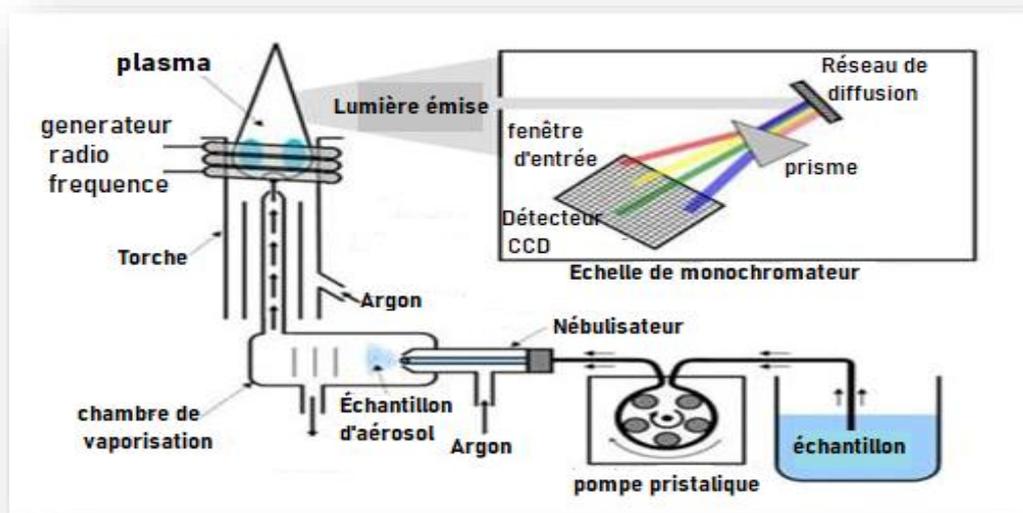


Figure 25 schéma représentant du principe de fonctionnement de l'ICP-OES.

### I.3.5. Mise en marche de l'ICP-OES et analyse.

La détermination des concentrations des radionucléides est réalisée par ICP-OES de marque (iCAP7000 ICP Spectrometre) (Figure 26 ).



Figure 26 Appareil de l'ICP-OES.

Après minéralisation des échantillons (sol ou plante) et préparation des solutions étalon (voir ANNEXE 4 et 5), l'appareil est mis en marche selon les étapes suivantes :

- La hotte est mis en marche (qui permet d'évacuer la chaleur produite par le plasma) ;
- Les tuyaux de la pompe péristaltique sont mis dans leur emplacement ;
- La vanne d'argon est ouverte ;
- Le refroidisseur est mis en route;
- L'ordinateur est allumé et le logiciel iTEVA analyste est lancé. Là, on accède à la commande pour allumer le plasma. Après l'avoir allumé; on attend une demi-heure qu'il soit stabilisé. A travers l'iTEVA analyste logiciel, on programme l'appareil. On sélectionne les différents éléments à analyser suivant leur longueur d'onde, on détermine l'ordre de passage et le type (standard, échantillon) des solutions à passer. Une fois le programme est effectué, on lance l'analyse.

Avant l'analyse des échantillons, on étalonne l'appareil avec les solutions étalons préparées en s'assurant de la bonne linéarité de la droite d'étalonnage pour chaque élément (figure 27).

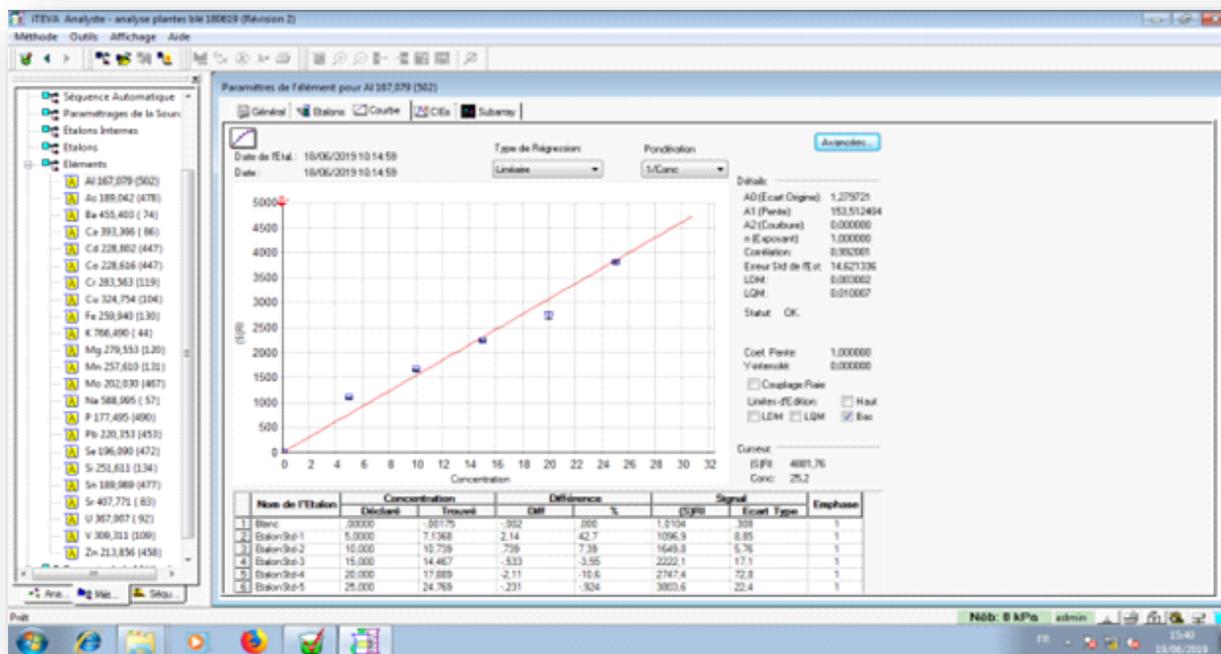


Figure 27 Exemple d'une courbe d'étalonnage.

## II. Résultats et discussions.

### II.1. Résultats des caractéristiques physico-chimiques du sol et des plantes.

Le tableau 6 récapitule les différentes caractéristiques du sol.

Tableau 1 Les caractéristiques du sol.

H%	MO%	pH	CEC
2,09%	2,5%	7,8	183,746

#### La matière organique du sol.

Le taux de la matière organique ( MO%) trouvé du sol étudié est de 2.5%. Il indique que le sol est pauvre en matière organique. C'est la teneur optimal pour avoir un sol fertile (Doucet,2006p174).

#### Le pH du sol.

La mesure du pH du sol étudié est de 7.8 ce qui indique que c'est un sol de nature faiblement alcaline.

#### La capacité d'échange cationique du sol (CEC) .

La mesure du CEC des éléments du sol étudié est de 183,746 meq/100g indique que la texture du sol est argileuse. D'après la littérature, Les sols argileux ont un taux de CEC élevé [38].

## II.2.Résultats de l'analyse minéralogique (ICP-OES).

Les résultats donnés par l'ICP-OES ou torche à plasma couvrent une large gamme d'éléments du tableau périodique avec leurs longueurs d'ondes respectives.

### II.2.1.Résultats de l'analyse minéralogique du sol

Le tableau 7 suivant donne les concentrations des différents éléments contenus dans le sol étudié.

Tableau 7 Concentrations des éléments dans le sol.

Eléments	Concentration [ppm]	Eléments	Concentration [ppm]
Mg	8443	Zn	646
Al	47443	Ga	2,7
Si	183554	Br	39
P	74	Rb	88
K	13665	Sr	283
Ca	45712	Y	20,9
Ti	5375	Zr	223
Cr	72	Nb	6,8
Mn	910	Mo	3,1
Fe	51686	Pb	154
Co	17,5	Th	15,6
Ni	27,5	U	4,4
Cu	16,9		

L'analyse minéralogique du sol montre qu'il est riche en minéraux (Ca, Mg, K etc.) et qu'il contient des métaux lourds tels que le Pb et de l'U.

### II.2.2.Résultats de calcul de quantités de contaminants absorbées par la plante.

Les résultats des masses de l'uranium, le strontium et le césium absorbées par la plante sont obtenus à partir de la conversion des résultats de l'analyse minéralogique des plantes contaminées (voir ANNEXE 6,7,8).

### II.2.2.1. Masses d'uranium absorbées.

Tableau 2 Masses d'uranium absorbées par la plante.

Temps (j)	U(1,5mg/kg sol)			U(6 mg/kg sol)		
	C <sub>1</sub> [ppm]	mph (µg)	m <sub>abs</sub> (µg/g)	C <sub>1</sub> [ppm]	mph (µg)	m <sub>abs</sub> (µg/g)
0	0,0120	1,1	1	0,0120	1,1	1
7	0,0023	0,21	0,192	-	-	-
15	0,0375	3,44	3,125	0,238	21,82	19,83
21	0,0140	1,28	1,167	-	-	-
30	6,350	582,14	529,17	nd	nd	nd
45	nd	nd	Nd	nd	nd	nd
90	nd	nd	Nd	0,0102	0,94	0,85
120	nd	nd	Nd	0,0513	4,70	4,275
135	nd	nd	Nd	-	-	-
150	nd	nd	Nd	0,0057	0,523	0,475
180	0,0481	4,41	4	0,0121	1,11	1,01

nb: non détectable ; (-) : donnée non fournie.

Pour l'uranium, les résultats des masses absorbées par la plante n'ont été obtenus que pour les concentrations de (1,5 mg U /kg de sol) et (6 mg U /kg de sol) à cause d'un problème technique de l'appareil (ICP-OES).

Les résultats du tableau 8 donnant les masses du U accumulées dans la plante, montrent des valeurs relativement faibles et même indétectables (la valeur de 529,17µg/g étant aberrante et n'est pas prise en considération). Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'uranium n'a pas été transloqué dans les parties aériennes de la plante et pourrait y être adsorbé sur les racines. A noter que dans cette étude, les analyses ont été réalisées sur le mélange de feuilles, tiges et fleurs.

La nature du sol est un facteur important qui influe sur la mobilité de l'uranium. Les principaux facteurs qui régissent le transfert de l'uranium du sol vers la plante sont :

- Le pH du sol : l'uranium est très pH dépendant. En effet, plus le pH est important sa mobilité est réduite puisque il forme des complexes avec les minéraux du sol qui favorisent la rétention de l'uranium dans les racines [39][40]. Le pH du sol utilisé dans notre étude est un pH alcalin.

- La CEC étant importante (183,746 meq) c'est-à-dire que le sol est argileux et donc l'uranium y est adsorbé. D'où la non disponibilité de l'uranium pour la plante [40].

- Un sol pauvre en matière organique réduit la disponibilité de l'uranium pour la plante (MO=2,5%) [41] [42].

- Les microorganismes réducteurs de métaux transforment l'uranium de sa forme oxydé, soluble et mobile en une forme réduite, insoluble et immobile [43].

D'autres facteurs peuvent influencer sur le comportement de l'uranium dans la plante à savoir la nature de la plante, son âge et la quantité d'irrigation du sol [40].

### II.2.2.2. Masses de strontium absorbées .

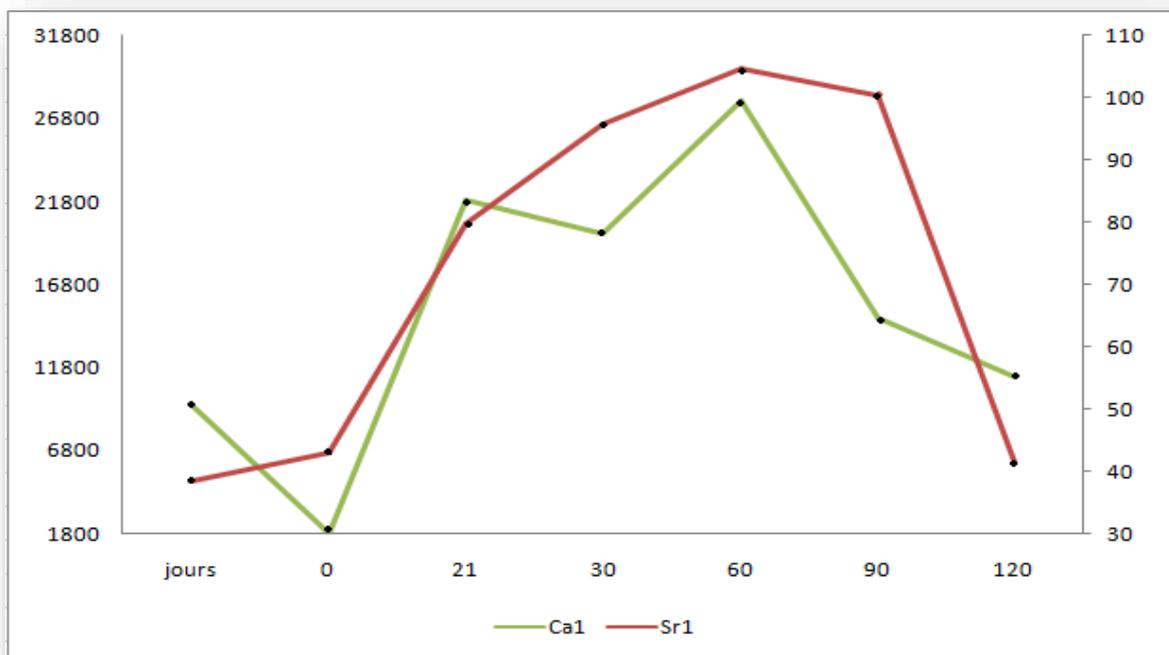


Figure 28 concentrations de strontium (1mmol.L<sup>-1</sup>et calcium absorbés par la plante.

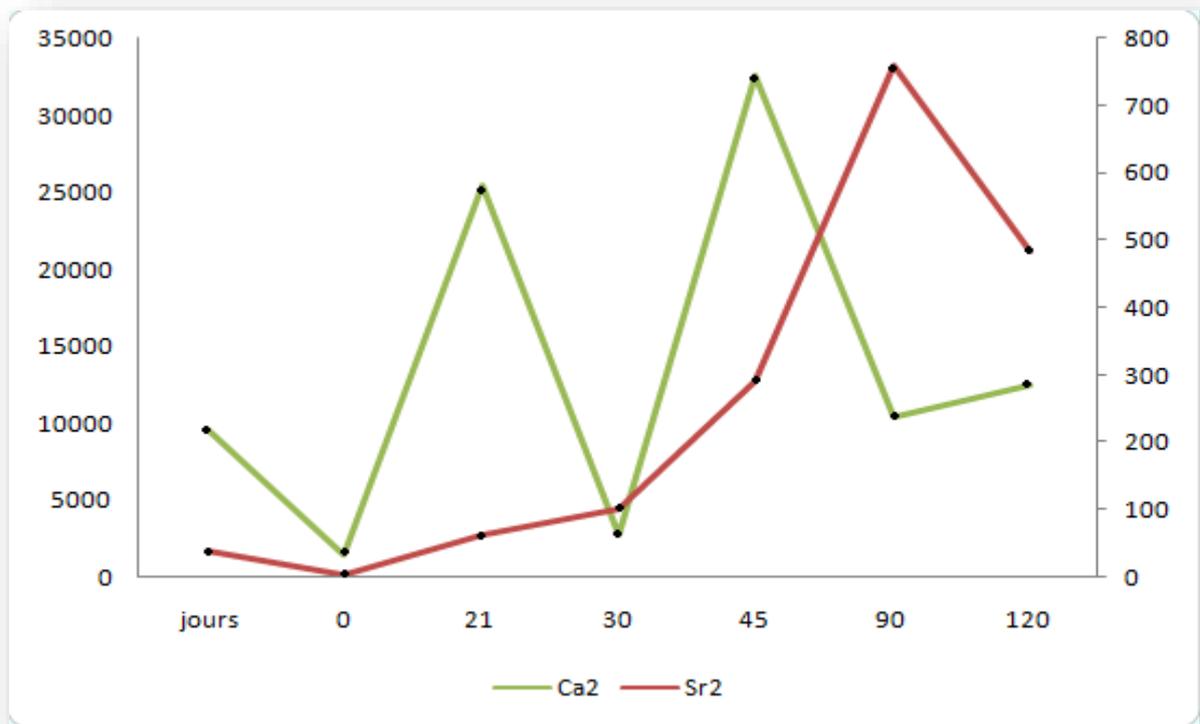


Figure 1 Masses de strontium (30mmol.L<sup>-1</sup>) et de calcium absorbées par la plante .

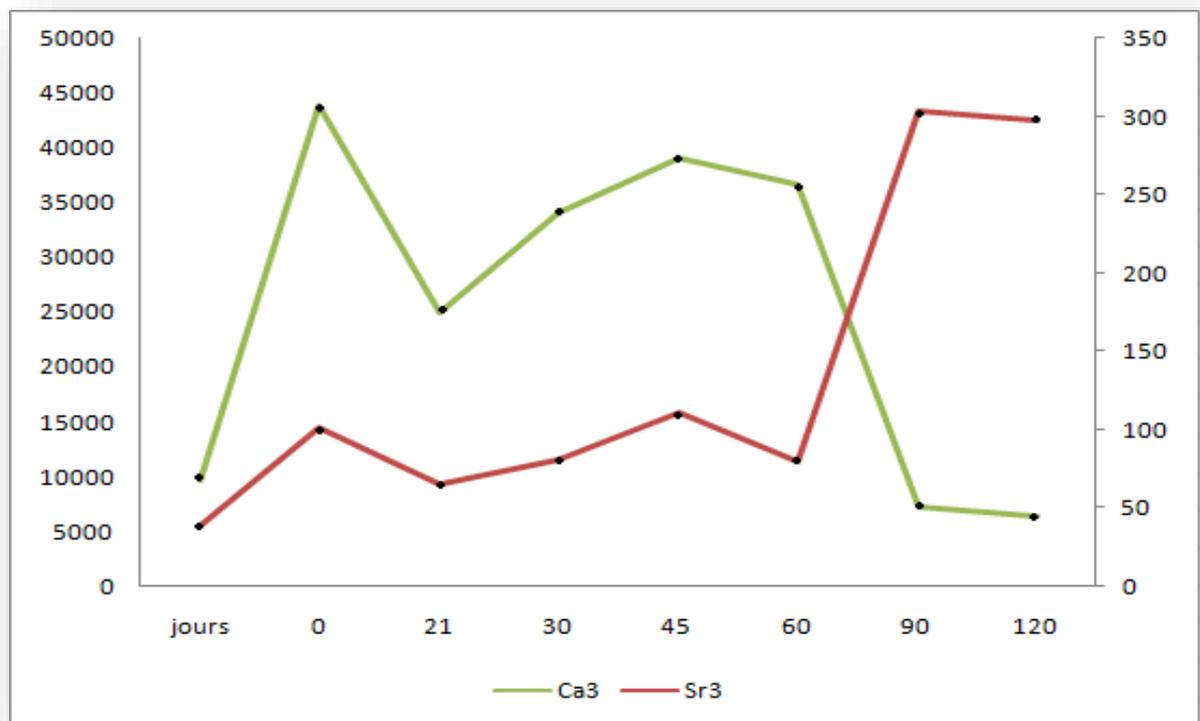


Figure 2 Masses de strontium (80mmol.L<sup>-1</sup>) et calcium absorbées par la plante.

Les tableaux 20,21 et 22 (ANNEXE 8) donnant les masses du Sr absorbées par gramme de plante montrent que l'absorption dépend de la concentration dans le sol. En effet, l'accumulation du Sr dans la plante est d'autant plus importante que la concentration dans le sol est élevée.

Des études ont montré que le Sr est moyennement mobile dans le sol et qu'il se transfère dans les plantes que sous sa forme soluble [44].

De plus, plusieurs facteurs influencent sa disponibilité végétale tels que : la teneur en matière organique, certains minéraux argileux et la teneur en Ca échangeable [45].

Enfin, la sélectivité des plantes a fait que le Sr est d'autant plus accumulé que sa concentration est élevée dans le sol [46].

Ces tableaux renferment, en plus de celles du Sr, les quantités de calcium absorbées simultanément, par la plante. Les résultats de ces tableaux sont représentés par les figures 28, 29 et 30 précitées respectivement, nous montrent une similitude de comportement entre le Sr et le Ca.

Le strontium étant un alcalino-terreux du groupe II dans le tableau périodique tout comme le calcium (Ca)[47].

Selon la littérature, l'effet de cette analogie est attribué à la compétition ionique du calcium et du strontium [48]. Cette compétition est mise en évidence dans les tableaux cités ci-dessus.

De plus, la faible teneur en matières organiques de notre sol a favorisé cet échange, sachant que quand la matière organique est importante la préférence d'un même métal peut être modifiée [48].

## II.2.2.3. Masses de césium absorbées

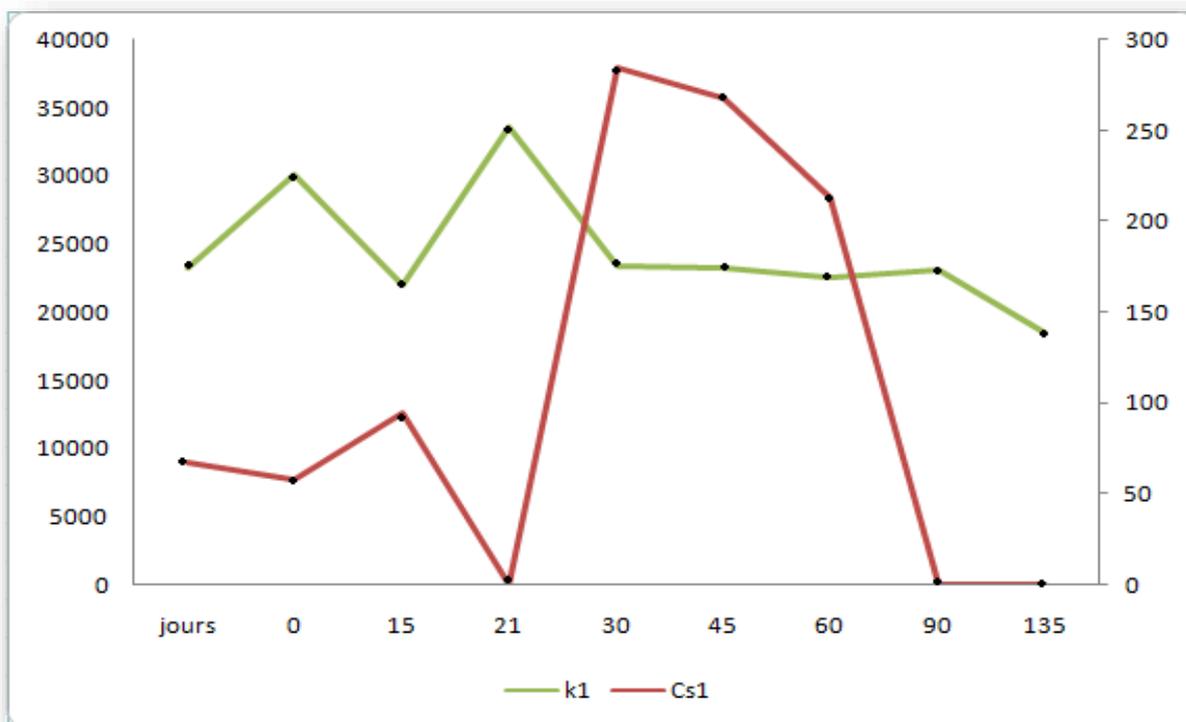


Figure 31 Masses de césium (0,05mmol) et potassium absorbées par la plante.

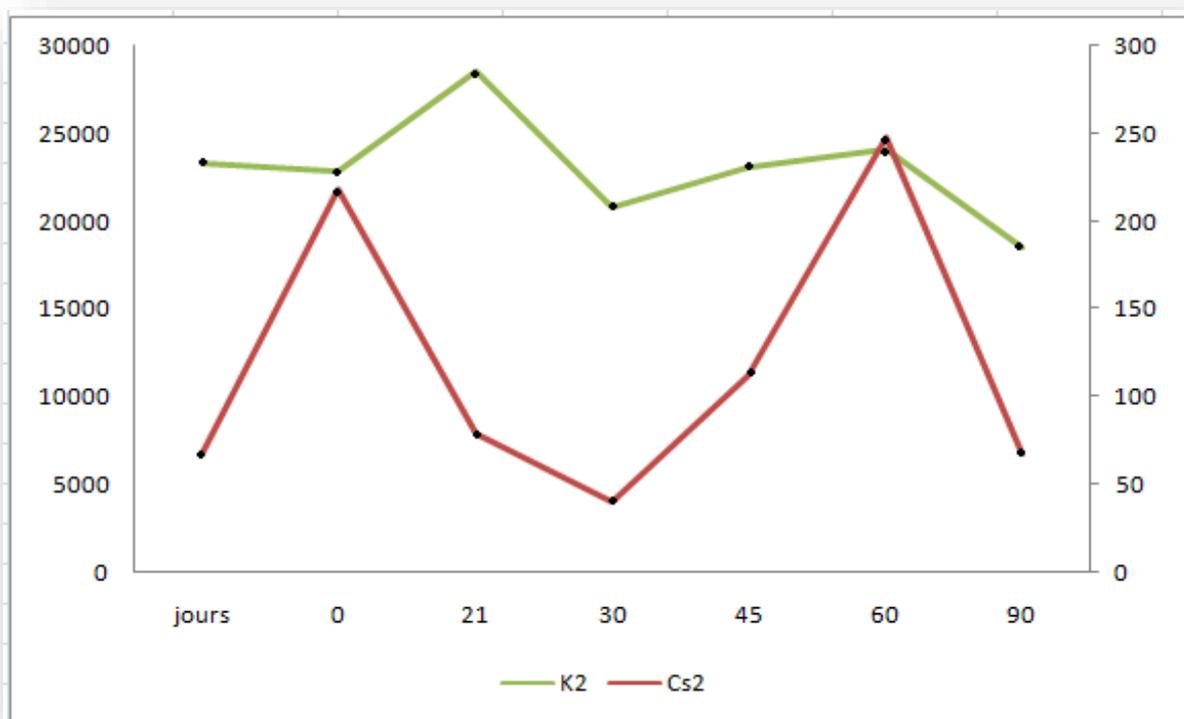


Figure 32 Masses de césium (0,5mmol) et potassium absorbées par la plante.

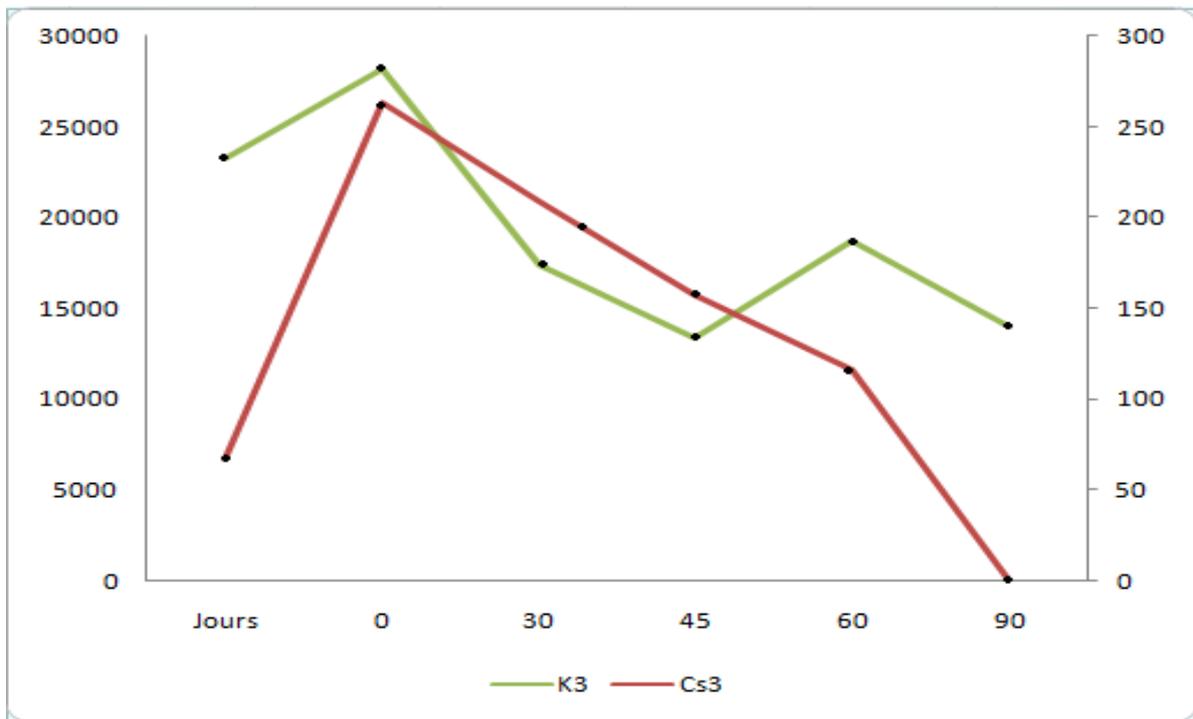


Figure 33 Masses césium (3mmol) et potassium absorbées par la plante .

Les résultats dans les tableaux 23,24 et 25 (ANNEXE 8) donnant les masses de Cs absorbées par gramme de plante montrent des comportements similaires pour les différentes concentrations dans le sol.

En effet, quel que soit la concentration du Cs dans le sol, son absorption par la plante est plus ou moins importante en fonction du temps. Par contre, cette absorption est d'autant plus importante que sa concentration dans le sol est élevée. Quel que soit la teneur du césium dans le sol et le compartiment végétal considéré (racine, feuille, tige etc.), le processus du transfert sol- plante a été trouvé, dépendant de plusieurs facteurs dont le principal est la teneur en argile du sol. En effet, le césium peut être adsorbé de manière irréversible sur les argiles et, par conséquent, ne peut pas être transféré à la plante. Cependant, la matière organique présente dans le sol et son potentiel de minéralisation peuvent modifier cette adsorption, rendant le césium plus disponible pour le transfert [32]. De plus, les vaisseaux du xylème agissent comme une barrière au niveau des racines, sachant que le transfert sol-plante débute à ce niveau-là[49].

Enfin, plusieurs travaux ont montré que les plantes sont sélectives et ont tendance à absorber l'élément présent en concentration élevée dans le sol [39].

Ces tableaux renferment, en plus de celles du Cs, les quantités du potassium absorbées simultanément, par la plante. Les résultats de ces tableaux sont représentés par les figures 31,32 et 33 précitées respectivement, nous montrent une similitude de comportement entre le Cs et le K.

Le césium étant un alcalin du groupe I dans le tableau périodique tout comme le potassium (K)[50].

Comme pour le Sr et le Ca, le Cs est un analogue chimique du K et donc, ils ont le même comportement chimique dans l'environnement. De ce fait, cette analogie fait que le Cs a le même comportement chimique que le K dans les différents compartiments de l'environnement, ainsi que dans les plantes[47]. Avec des propriétés chimiques et électrochimiques très proches de celles du potassium, le césium jouerait un rôle biochimique similaire à celui de cet élément chez les organismes vivants (Garnier-Laplace et al., 2000 ; Koulikov et Meili, 2003 ).

Outre sa disponibilité dans le sol, le transport du césium est également influencé par des propriétés propres à la plante. Généralement, les flux d'éléments chez les végétaux étant régulés par des transporteurs. Du fait de l'analogie avec le potassium, le césium est supposé emprunter les voies de transport dédiées à ce macronutriment.

### CONCLUSION.

La contamination du sol par les radionucléides peut présenter un risque important pour la santé humaine et l'environnement d'où la nécessité d'un assainissement et d'une restauration adéquats.

La phytoremédiation est une nouvelle technique de décontamination alternative écologique et peu coûteuse aux autres techniques de décontamination.

L'objectif de ce travail a été d'étudier le comportement d'une espèce de plante de la famille des *Asteraceae*, à savoir la *Crepis Rurba*, vis-à-vis de trois radioéléments : l'U, le Cs-133 et le Sr-87.

Les caractéristiques physico-chimiques du sol montrent que c'est un sol légèrement alcalin, sa Capacité d'Echange Cationique (CEC) reflète une texture argileuse à faible teneur en matières organiques.

Les analyses minéralogiques par l'ICP-EOS ont montré que :

- le sol est riche en minéraux (Ca, Mg, K etc.), qu'il contient des métaux lourds tels que le Pb et de l'U ;

- la plante est elle aussi, riche en minéraux et qu'elle a un comportement sélectif vis-à-vis des différents éléments. De plus, le Cs et le Sr s'accumulent dans la plante, de manière compétitive avec leurs homologues chimiques, le K et le Ca respectivement. L'U quant à lui, s'avère, probablement, s'accumuler dans les racines ou reste adsorbé sur les argiles du sol.

Comme le temps consacré à ce travail est relativement court alors que l'étude des plantes est un domaine complexe et requiert des périodes assez longues, les résultats obtenus ne sont qu'un aperçu du phénomène de phytoremédiation. Ce mémoire n'est qu'un travail préliminaire à d'autres études qui pourraient être menées et développées ultérieurement, dans le domaine.

### **PERSPECTIVES.**

La Phytoremédiation est un domaine très complexe. Des recherches sont toujours en cours dans le monde.

Ce travail peut être amélioré par d'autres études. En effet, pour obtenir une efficacité de la phytoremédiation, plusieurs méthodes peuvent être prises en compte à savoir :

- le génie génétique ;
- les activités microbiennes ;
- l'ajout des engrais au sol ;
- l'ajout des chélatants (ex. acide citrique)
- les variations du pH, le potentiel redox et la complexation des métaux (disponibilité des métaux).

- [1]. **BOUCHAIB.S, BOUGEUTOUCHE.Y**, Effet de compost sur l'évolution de la rétention en eau à la capacité au champ d'un sol argileux, Université Abdrrahmane Mira Bejaia(2014),75p.
- [2]. **HENRY D.F**, FUNDAMENTALS OF SOIL SCIENCES, JOHN WILEY & SONS, (1990), 382 p.
- [3]. **RAY R.W, NYLE C.B**, The Nature And Propreties of Soil, Persan global, (2017), 1105p.
- [4]. **JEAN-LOUIS.M**, Chimie et la Nature (Phytoremédiation des sols contaminés),edp sciences, (2012), p 158- 184.
- [5]. **Lémiere.Bet al**, Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes (Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau), BRGM, (2001), 87 p.
- [6]. **RodiguerzEugenio.N et al**, SOIL POLLUTION A HIDDEN REALTY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNATED NATIONS, (2018), 142p.
- [7]. **MARNISSIA.A**, Etude de la radioactivité du matériaux de construction d'un chambre construite avec du brique contenant du phosphogypse,Ingenieur de l'eau tunis, (2007), .
- [8]. **AGOUAR.K,AIT ABDELMALEK.T**, Etude de la radioactivité naturelle et artificielle dans le sédiment superficiel de la baie d'Alger, Aménagement du littoral,(1994).
- [9]. **Assemblée générale**,Etude des effets des rayonnements ionisants : sources et effets biologiques, Rapport de la Comité scientifique de nations unies, (1982), 25p.
- [10]. **BENICHOUS**, Radiation naturelle des matériaux de construction en sable de la cote de W. Tlemcen,Université de telemcen, (2013), 82p.
- [11]. **Melquiot.P**, 1001 Mots et Abréviations de l'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE, Reconsult, (2010),192p.
- [12]. **SABA.D**, Les radionucléides et le plomb émis par une usine de fertilisants au Liban : Etude de leurs mobilités dans les sols et les plantes pour une évaluation du risque sanitaire, Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, (2019), 154 p.
- [13]. **NOURLM, HADDIOULA**, Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds, Maghrebian Journal of Pure And Applied Sciences, (2016), p 47-58.

- [14]. **Rehman Hakeem.K et al**, Soil remediation and plants prospects and challenges, Elsevier,(2015), 724 p.
- [15].**COLOMBANO.S et al**, Quelles techniques pour quels traitements-Analyses coûts-bénéfices, Rapport final, Brgm, (2019), 399 p.
- [16]. **Kirpichtchikova.T**, Phytoremédiation par Jardins Filtrants d'un sol pollué par des métaux lourds : Approche de la phytoremédiation dans des casiers végétalisés par des plantes de milieux humides et étude des mécanismes de remobilisation /immobilisation du zinc et du cuivre, Thèse de doctorat Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, (2009), 265 p.
- [17]. **Ghosh.M, Singh, S.P**, "A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products", Appl. Ecol. Environ. Res., 3, (2005), p 1 – 18.
- [18]. **Madrid F., Liphadzi M.S., Kirkham M.B.**, "Heavy metal displacement in chelate-irrigated soil during Phytoremediation", J. Hydrol., 272, (2003), p 107-119.
- [19]. **Prasad, M.N**, "Phytoremediation of Metal-Polluted Ecosystems: Hype for Commercialization", Russ. J. Plant Physiol., 50, (2003), p 686 – 700.
- [20]. **Salt.D.E, Smith.R.D, Raskin. I**, "Phytoremediation", Annu. Rev. Plant Physiol., 49, (1998), p643 – 648.
- [21]. **Kabata-Pendias.A, Pendias.H**, "Trace Elements in Soils and Plants", CRC Press, Boca Raton, (2001), 413p.
- [22]. **Tremel-Schaub.A, Feix. I**, "Contaminations des sols - Transfert des sols vers la plantes", EDP Sciences, ADEME Ed., Angers, (2005), 413 p.
- [23].**Chevrier.E**,La phytoremédiation, Une solution d'avenir pour le Quebec, M.Env, (2013), 91p.
- [24].**Vavasseur.A, Richaud.P,Misson-Pons.J**, Des plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux, BIOFUTUR 259, (2009), p 37-40.
- [25]. **Johana**,Introduction to phytoremediation, PPT, (2000).
- [26]. **Hénault-Ethier.L**, LA PHYTORMEDIATION, Société québécoise de phytotechnologie, (2016), 28p.

- [27]. **Gupta.D et al**, Radionuclides: Accumulation and Transport in Plants, Springer International Publishing, (2016), 22p.
- [28]. **FILLEUL.E**, Les Astéracées : description botanique, biologique et étude de plantes médicinales et toxiques- Thèse de docteur en pharmacie, (2019), 135p.
- [29]. **Gupta.D, Walther.C**, Uranium in plants and the environnement, springer, 253p.
- [30]. **Gupta.D et al**, Radiostrontium transport in plants and phytoremediation, Springer, (2018), 13p.
- [31]. **Gupta.D, Walther.C**, Behaviour of strontium in plants and the environnement, springer, (2018), 170p.
- [32]. **Gupta.D, Walther.C**, Impact of cesium on plants and the environnement, Springer, (2017), 319p.
- [33]. **Burger.A, Lichtscheidl.I**, Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation, Elsevier, (2018), p 1459-1485.
- [34]. <https://www.fermedesaintemarthe.com/A-19870-crepis-rose-nt.aspx#:~:text=Le%20cr%C3%A9pis%20rose%20est%20une,attire%20de%20nombreux%20insectes%20butineurs.> [En ligne].
- [35]. **Habibi.A**, Analyse rapide des actinides par couplage chromatographie liquide/ICP-MS et de Sr-90 par compteur proportionnel à gaz, dans les échantillons de l'environnement, en situation post-accidentelle, Thèse de doctorat de chimie analytique et radiochimie, (2015), 265p.
- [36]. **Laure.J, Gaëlle.U**, Digesteur micro-ondes, IGE, (2017).
- [37]. <https://www.gazettelabo.fr/archives/pratic/2007/125berghof.htm>. [En ligne].
- [38]. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols : un outil de surveillance à long terme, INRA, Gis sol, (2016), 4p.
- [39]. **Huhle B, Heilmeier H, Merkel B**. Potentiel de Brassica juncea et Helianthus annuus dans la phytoremédiation de l'uranium. Dans : Merkel BJ, Hasche-Berger A. (eds) Uranium, Mining and Hydrogeology. Springer, Berlin, Heidelberg, (2008).

- [40]. **MF Abdel-Sabour** ,Uranium Fixation and Removal from Different Soil Types :Review. J NuclEneSci Power GeneratTechnol, (2014) p3.
- [41].**Chang.P, Kim,K W, Yoshida.S, Kim.SY**, Uranium accumulation of crop plants enhanced by citricacid,Review.EnvironmentalGeochemistry and Health, Springer, (2005), p 529-538.
- [42]. **Garnier-Laplace.J, Colle.C, Morello.M**, FICHE RADIONUCLEIDE Uranium naturel et environnement, IRSN, (2010), 16p.
- [43]. **McCullough.J, Hazen.T, Benson.S**, Bioremediation of metals and radionuclides: What it is and How it works, NABIR, (1996), 58p.
- [44]. **Dubchak.S**, Distribution of Strontium in Soil : Interception, Weathering, Speciation, and Translocation to Plants, (2018), 10p.
- [45]. **Gerzbek.M.H, Artner.Ch, Horak.O, Muck.K**, Results of Field Studies on  $^{90}\text{Sr}$  and Stable SR soil-to-plant transfer Paper presented at the XXI Ind annual meeting of, (1991).
- [46]. **GUIBOURDENCHE.L**, Cycle de strontium de le complexe SOL-VIGNE-FRUIT-VIN : Apport des rapports stables  $^{88/86}\text{Sr}$  et radiogenetiques  $^{87/86}\text{Sr}$ , Maitrise en sciences de la terre, (2018), 113p.
- [47]. **Siroux.B**, Interaction d'un système césium, strontium/matière organique naturelle/argiles des sols. De la décontamination à la remédiation, Thèse de doctorat de Sciences de la terre et de l'environnement, (2017), 180p.
- [48]. **Gupta.K, Deb.U, Walther.C, Chatterjee.S**, Strontium in the Ecosystem: Transfer in Plants via Root System. Dans : Gupta D., Walther C. (eds) Behavior of Strontium in Plants and the Environment. Springer, Cham, (2018) , p1-18.
- [49]. **Colle.C, Adam.C, Garnier-Laplace.J, Roussel-Debet.S**, FICHE RADIONUCLEIDE Césium $^{137}$  et environnement, IRSN, (2005), 29p.
- [50]. **Essassi.E.M**, LES SCIENCES PHYSIQUES ET LE TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS CHIMIQUES : UNE HISTOIRE COMMUNE PHYSICAL SCIENCES AND PERIODIC TABLE OF CHEMICAL ELEMENTS: COMMON HISTORRY, Moroccan Journal of Heterocyclic Chemistry, (2019), p 1-38.

# ANNEXES

## ANNEXE 1: Matériels et produits utilisés.

### Matériels:

- 1) Tamis à calibre entre 2 et 5mm.
- 2) Balance électrique.
- 3) Creusets en porcelaine.
- 4) Etuve.
- 5) Dessiccateur.
- 6) Four à moufles.
- 7) Béchers.
- 8) pH-mètre.
- 9) Pots.
- 10) Bombes à téflon pour micro-ondes.
- 11) Micro-ondes Berghof.
- 12) Entonnoirs.
- 13) Filtres en verre.
- 14) Bouteilles en verre brun.
- 15) Spectromètre à plasma à couplage inductif ICP-OES.

### Produits:

- Eau distillée.
- Solutions contaminantes :
  - Nitrate d'uranyle ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de pureté 99 %.
  - Nitrate de strontium ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) de pureté 99%
  - Chlorure de Cs de pureté 99%.
- Plantes (Marguerite commune).
- Solutions acides :
  - HCl, 37%.
  - HNO<sub>3</sub> 65%.
  - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35%.
- Solution d'étalonnage multiéléments.

## ANNEXE 2: Méthodologie de calcul de la CEC.

Les teneurs de Ca, K et Mg sont tirées à partir des résultats par ICP-OES du sol (**tableau7**).  
sont données en [ppm] c'est à dire : [mg.Kg<sup>-1</sup>].

Pour passer de [mg.Kg<sup>-1</sup>] au [méq.100g<sup>-1</sup> de sol] il faut d'abord passer au [mg.100g<sup>-1</sup> de sol]:

Pour (m)<sub>1</sub> [mg] on a : 1Kg = 1000g

et pour (m)<sub>2</sub> [mg] on a : 100g

$$\text{donc } m_2 = \frac{m_1 \times 100}{1000} \dots \dots \dots (5).$$

Ensuite on va passer de [mg/100g de sol] au [méq.100g<sup>-1</sup> de sol].

### Compréhension:

**méq:** est l'unité d'un nombre de charges négatives.

$$1 \text{ méq} = \frac{1}{1000} = 10^{-3} \text{ mmol de charges négatives.}$$

-Par exemple:

n [méq.100g<sup>-1</sup> de sol] de K donne l'information suivante:

-100g de sol renferme n méq c'est à dire n mmol de charges négatives permettant de fixer les ions K<sup>+</sup>, à partir de là, on peut calculer n (méq) de l'élément d'où:

$$\begin{aligned} n \left[ \frac{\text{méq}}{100\text{g}} \text{ desol} \right] &= \frac{m \left[ \frac{\text{mg}}{100\text{g}} \text{ desol} \right] \times 10^{-3}}{(M \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right])} = n[\text{mol}] \times 10^{-3} \\ &= n[\text{mmol}] \dots \dots \dots (6). \end{aligned}$$

### ANNEXE 3: Préparation des solutions de contamination du sol.

Trois solutions de radionucléides ont été préparées dans le but de contaminer le sol d'intérêt.

Une quantité de 1 litres, respectivement d'uranium (U-238), de césium (Cs-133) et de strontium (Sr-87) est préparée. Le tableau 4 regroupe les quantités respectives qui devraient être utilisées pour contaminer le sol.

Tableau4 Concentrations de radionucléides prévues dans le sol

Radionucléides	Concentration
Sr	1 mmol.L <sup>-1</sup>
	30 mmol.L <sup>-1</sup>
	80 mmol.L <sup>-1</sup>
Cs	0.05 mmol
	0.5 mmol
	3 mmol
U	1.5 mg.Kg <sup>-1</sup>
	3 mg.Kg <sup>-1</sup>
	6 mg.Kg <sup>-1</sup>

#### Calcul des quantités correspondantes en mg.

Pour sa contamination, le sol devrait avoir les concentrations respectives en radioéléments du tableau 4. Pour cela, nous devons déterminer les quantités correspondantes respectives en mg à diluer dans 1l d'eau pour atteindre ces mêmes concentrations.

#### a- Solution d'uranium (U-238)

La solution d'intérêt est une solution de nitrate d'uranyle, [UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O] avec 99.678% de pureté (Malkinkradt).

On détermine la quantité du nitrate d'U à utiliser. Pour le sol, on considère qu'on aura environ 2 kg dans un pot. Les quantités de nitrate d'uranyle calculées et diluées dans 1l d'eau, sont données dans le tableau 9.

Tableau 9 Masses totales de l'UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O en solution

U -238 (mg.Kg <sup>-1</sup> sol)	Masse d'U (mg.2Kg <sup>-1</sup> sol)	Masse de nitrate d'U (mg) correspondante	Masse de nitrate d'U/pureté (mg)
1,5	3	6,328	6,348
3	6	12,657	12,698
6	12	25,314	25,396

**Calcul de la masse de nitrate d'U correspondante au 2 kg de sol utilisé**

Exemple :

$$1 \text{ mmol de nitrate d'U} = 1 \text{ mmol d'U}$$

$$502,119 \text{ g} = 238,03 \text{ g}$$

$$X = 12 \text{ mg}$$

En prenant en compte la pureté, on a :

$$X \times 100 / 99,678 = [\text{mg}]$$

**b- Solutions de strontium (Sr-87)**

La solution d'intérêt est une solution de nitrate de strontium ( $\text{Sr}(\text{NO}_2)$ ) avec 99 % de pureté (Merck).

Les quantités de nitrate de strontium calculées et diluées dans 1L d'eau sont données dans le tableau 10.

**Tableau 10 Masses totales du  $\text{Sr}(\text{NO}_2)$  en solution.**

Sr-87 (mmol.L <sup>-1</sup> )	Masse de Sr (mg.L <sup>-1</sup> )	Masse de nitrate de Sr (mg.L <sup>-1</sup> )	Masse de nitrate de Sr/ pureté (mg)
1	87,62	211,63	213,77
30	2628,6	6348,9	6443,33
80	7009,6	16930,4	17101,72

Exemple :

$$1 \text{ mmol de nitrate de Sr} = 1 \text{ mmol de Sr}$$

$$211,63 \text{ mg de Sr}(\text{NO}_3)_2 = 87,62 \text{ mg de Sr}$$

$$1 \text{ mmol de Sr} = 87,62 \text{ mg de Sr}$$

$$30 \text{ mmol de Sr} = 87,62 \times 30 = 2628,6 \text{ mg de Sr}$$

**Calcul de la masse de Nitrate de Sr par litre de solution.**

87,62 mg de Sr =====211,63 mg de Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

2628,6 mg de Sr===== X = 6348,9mg de Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

7009,6 mg de Sr===== X = 16930,4 mg de Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

En prenant en compte la pureté, on a :

Exemple (pour 1l de solution) :

211,63×100/99=213,77 mg

**c- Solutions de Césium (Cs-133)**

La solution d'intérêt est une solution de chlorure de césium (CsCl) avec une pureté 99 % (FLuka).

Les quantités de chlorure de césium calculées et diluées dans 1L d'eau sont données dans le tableau 11.

**Tableau 11 Masses totales du CsCl en solution.**

<b>Cs-133 (mmol)</b>	<b>Masse de Cs (mg)</b>	<b>Masse de CsCl (mg)</b>	<b>Masse de CsCl/pureté (mg)</b>
<b>0.05</b>	<b>6,64525</b>	<b>8,418</b>	<b>8,503</b>
<b>0.5</b>	<b>66,4525</b>	<b>84,18</b>	<b>85,03</b>
<b>3</b>	<b>398,715</b>	<b>505,08</b>	<b>510,182</b>

Exemple :

1 mmol de CsCl=====1mmol de Cs

168,36mg de CsCl=====132.905mg de Cs

0.5 mmol de Cs===== 132,905×0,5=66,4525 mg de Cs

**Calcul de la masse de Chlorure de Césium par litre de solution.**

$$6,64525 \text{ mg de Cs} = 168,36 \times 0,05 = 8,418 \text{ mg de CsCl}$$

$$66,4525 \text{ mg de Cs} = 84,18 \text{ mg de CsCl}$$

$$398,715 \text{ mg de Cs} = 505,08 \text{ mg de CsCl}$$

En prenant en compte la pureté, on a:  $8,418 \times 100/99 = 8,503 \text{ mg}$

**ANNEXE 4: Etalonnage de l'appareil.**

Pour pouvoir analyser les échantillons, il faut étalonner l'appareil. Pour cela, on réalise une gamme d'étalonnage suivant les concentrations que l'on veut obtenir.

L'étalonnage de l'ICP-OES est réalisé par un standard d'étalonnage. Cette solution multiéléments a une concentration certifiée de 1000 mg.L<sup>-1</sup> pour 23 éléments (figure34). Ces éléments avec leurs longueurs d'onde respectives sont regroupés dans le tableau 12.



Figure 34 Solution multiéléments d'étalonnage.

Tableau 12 Les longueurs d'ondes des éléments chimiques servant au dosage par ICP-OES.

Elément	Longueur d'onde	Elément	Longueur d'onde
Al	3961	Mn	2949
As	4494	Mo	3176
B	2089	Na	5889
Ba	4934	Ni	3414
Ca	4318	P	1774
Cd	2144	Pb	1822
Co	2311	Se	1960
Cr	2677	Si	2881
Cs	4603	Sn	1899
Cu	3247	Sr	4215
Fe	2599	U	4090
K	7664	V	3093
Mg	2795	Zn	3345

## ANNEXE 5: Préparation des étalons.

-Une série d'étalons (0, 5, 10, 15, 20, et 25 ppm) est préparée à partir de notre solution mère pour analyse.

-On prépare d'abord une solution d'une concentration de 1 mg.L<sup>-1</sup> à partir de la solution multiélément (1000 mg.L<sup>-1</sup>) en introduisant 0.5 mL de cette dernière dans une fiole de 500 mL et on complète avec de l'acide HNO<sub>3</sub> au trait de jauge (pour stabiliser la solution). Cette solution va être considérée comme solution mère pour la préparation des autres étalons.

-Dans une fiole de 50 mL, on introduit le volume nécessaire pour la préparation de chaque étalon et on complète avec de l'acide nitrique HNO<sub>3</sub> au trait de jauge (tableau 13).

Tableau 13 Les Volumes prélevés de la solution mère pour la préparation des étalons.

N° étalon	Concentration [ppm]	Volume prélevé de la solution mère [µL]
Blanc	0	0
1	5	250
2	10	500
4	20	1000
3A	15	750
5	25	1250

## ANNEXE 6: Résultats de l'analyse minéralogique des plantes:

### Résultats de l'analyse des plantes avant contamination du sol (blanc):

Avant que le sol soit contaminé, la plante a fait l'objet d'analyse par ICP EOS et les résultats sont regroupés dans le tableau 14.

Tableau 14 Concentrations des éléments dans la plante non contaminée (blanc) .

Eléments	Concentration [ ppm]	Eléments	Concentration [ppm]	Eléments	Concentration [ppm]
Al	2,587	K	279,0	Sn	0,1743
As	-20,78	Mg	15,90	Sr	0,4614
B	0,3076	Mn	0,1770	U	0,0120
Ba	0,1182	Mo	0,0009	V	-0,0187
Ca	115,6	Na	10,95	Zn	0,9412
Cd	-0,0017	Ni	0,0240		
Co	-0,0024	P	26,27		
Cr	0,0075	Pb	0,0238		
Cs	0,8061	Rb	0,1565		
Cu	0,2121	Se	-0,0022		
Fe	2,920	Si	3,833		

## Résultats d'analyse des plantes après contamination du sol:

Après la contamination du sol les plantes contaminées sont analysées par ICP-OES et les résultats sont représentés dans les tableaux 15, 16 et 17.

### a. Résultats de contamination par l'uranium.

Tableau 15 Concentrations de l'uranium dans la plante après contamination du sol.

Temps	U[ppm] absorbée par la plante	
	[1,5mg.Kg <sup>-1</sup> ]	[6mg.Kg <sup>-1</sup> ]
7	0.0023	-
15	0.0375	0.238
21	0.0140	-
30	6.350	nd
45	Nd	nd
90	Nd	0.0102
120	Nd	0.0513
135	Nd	-
150	Nd	0.0057
180	0.0481	0.0121

nd:non détectable;(-):donnée non fournie

### b. Résultats de contamination par le strontium

Tableau 16 Concentrations du strontium dans la plante après contamination du sol.

Temps (j)	Sr [ppm] absorbée par la plante		
	[1mmol.L <sup>-1</sup> ]	[30mmol.L <sup>-1</sup> ]	[80mmol.L <sup>-1</sup> ]
<b>0</b>	<b>0,4614</b>		
21	0.515	0.0345	1.209
30	0.9586	0,7481	0,7738
45	-	1.133	0.9708
60	1,150	****	1,352
90	1.257	3.480	0.9529
120	1.203	9.102	3.646
135	0.4958	5.794	3.580

(-):donnée non fournie; (\*\*\*\*): élément en saturation dans l'ICP-EOS

### c. Résultats de contamination par le césium.

Tableau 17 Concentrations du césium dans la plante après contamination.

Temps (j)	Cs [ppm] absorbée par la plante		
	[0,05mmol]	[0,5mmol]	[3mmol]
0	0,8061		
15	0.6896	-	-
21	1.131	2.623	
30	nd	0.9438	2.931
45	3.418	0.4812	2.322
60	3,211	1,340	1,894
90	2,558	2,976	1,396
135	nd	0.8113	nd
150	nd	-	-

nd: non détectable.; (-): donnée non fournie.

### **ANNEXE 7: Méthodologie de calcul des quantités absorbées par la plante.**

La masse de la matière sèche utilisée pour l'analyse l'ICP-EOS est  $m_{ps}=300\text{mg}$ .

#### Détermination de la masse humide correspondante à la masse sèche $m_{ps}$ .

Sachant que :

$$100\% m_{ph} = \% \text{ humidité}(H) + \% m_{ps} \dots \dots \dots (7).$$

#### Détermination du taux d'humidité:

A partir de l'équation 7 on déduit l'équation 8

$$H(\%) = \frac{mh - ms}{mh} \cdot 100 \dots \dots \dots (8).$$

Tableau 18 Les masses utilisées des plantes

Elt.	mh (g)	ms (g)	%H	% $m_{ps}$	$m_{phc}$ (g)
Blanc	5,9606	1,4641	75,44	24,56	1,221
U	5,1968	1,4169	72,73	27,27	1,1
Sr	7,1665	1,4407	80	20,00	1,08
Cs	5,5184	1,5346	72,19	27,81	1,5

### Exemple pour U :

$$100g \text{ de plante} = \%H + \% m_{ps}$$

$$100g = 72,73g + 27,27g$$

$$\text{Pour } m_s = 300mg$$

$$\text{On a : } 100g \quad \text{on a } \% m_{ps}$$

$$\text{Pour } X = m_{phc} \quad \text{on a } m_s = 300mg$$

$$X = (100 \times 10^3 \times 300) / \% m_{ps}$$

Ex. pour U :

$$X = (100 \times 10^3 \times 300) / 27,27 \times 10^3 = 1100,11mg = 1.1g$$

Le tableau 19 représente la masse des plantes humides équivalentes à 300mg de plantes sèches

Tableau 19 La masse des plantes humides.

Plantes sèches (300mg)	Plantes humides
(U)	1100,1mg
(Cs)	1500mg
(Sr)	1078,75mg
(Blanc)	1221,5mg

### Calcul des quantités d'U, Cs et de Sr absorbées par la plante

A partir des données d'analyse par la torche à plasma ICP-OES (Annexe 6), on a déterminé la quantité des contaminants absorbée par la plante en  $\mu g \cdot g^{-1}$  de plante.

Soit :

$C_1$ : concentration de l'élément (ppm ou  $\mu g \cdot mL^{-1}$ ) donnée par la torche ;

$m_1$ : masse de l'élément ( $\mu g$ ) ;

$V$ : volume analysé ;  $V = 25mL$  ;

$$m_1(\mu g) = C_1 \times V.$$

On se rapporte à la quantité absorbée par la plante.

**Prenons l'exemple de la plante contaminée par le Strontium:**

**Par rapport à la plante humide:**

Pour : 300 mg=====on a  $m_1=C1 \times V$  [ $\mu\text{g}$ ]

Pour : 1078,75mg ===== on a  $m_{\text{ph}}[\mu\text{g}]$

$$m_{\text{ph}}(\mu\text{g}) = \frac{m_1 \times 1078,75}{300} \dots \dots \dots (9).$$

**Par rapport à 1g de la plante humide**

Pour : 1078,75 (mg) ===== on a :  $m_{\text{ph}}$  [ $\mu\text{g}$ ]

Pour : 1g= 1000mg ===== on a:  $m_{\text{abs}}$

$$m_{\text{abs}}(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_{\text{ph}} \times 1000}{1078,75} \dots \dots \dots (10).$$

Les résultats de l'absorption des éléments par la plante ont donné les résultats des tableaux suivants : tableau 8 pour l'uranium; tableaux 20,21 et 22 pour le strontium et tableau 23,24 et 25 pour le césium.(ANNEXE 8).

**ANNEXE 8: Résultats de calcul de quantités de contaminants absorbées par la plante.**

**a. Masses de strontium absorbées**

Tableau 20 Masses de strontium (1mmol.L<sup>-1</sup>) et calcium (Ca) absorbés par la plante.

Temps (j)	Sr (1mmol.L <sup>-1</sup> )			Ca1		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [ $\mu\text{g}$ ]	m <sub>abs</sub> [ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [ $\mu\text{g}$ ]	m <sub>abs</sub> [ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ]
0(Blanc)	0,4614	46,95	38,45	115,6	11767,1	9633,3
21	0,515	64,38	42,92	21,77	2721,3	1814,2
30	0,9586	119,83	79,88	263,1	32887,5	21925
45	-	-	-	-	-	-
60	1,150	143,75	95,83	238,1	29762,5	19841,7
90	1,257	157,13	104,75	335,1	41887,5	27925
120	1,203	150,38	100,25	177,6	22200	14800
135	0,4958	61,98	41,32	135,4	16925	11283,3

(-) : donnée non fournie.

Tableau 21 Masses de strontium (30mmol.L<sup>-1</sup>) et de calcium (Ca) absorbées par la plante.

Période	Sr2 ( 30mmol.L <sup>-1</sup> )			Ca2		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]
0(blanc)	0,4614	46,95	38,45	115,6	11767,1	9633,3
21	0,0345	4,31	2,88	17,00	2125	1416,7
30	0,7481	93,5	62,33	305,2	38125	25416,7
45	1,133	141,63	94,42	324,0	40500	27000
60	****	****	****	145,5	18187,5	12125
90	3,480	435	290	390,4	48800	32533,3
120	9,102	1137,75	758,5	124,3	15537,5	10358,3
135	5,794	724,25	482,83	149,4	18675	12450

\*\*\*\* : élément en saturation dans l'ICP-EOS.

Tableau 22 Masses de strontium (80mmol.L<sup>-1</sup>) et calcium (Ca) absorbées par la plante

	Sr3(80mmol.L <sup>-1</sup> )			Ca3		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]
0(blanc)	0,4614	46,95	38,45	115,6	11767,1	9633,3
21	1,209	151,13	100,75	526,2	65775	43850
30	0,7738	96,73	64,48	298,6	37325	24883,3
45	0,9708	121,35	80,9	408,9	51112,5	34075
60	1,352	165,63	110,41	469,4	58675	39116,7
90	0,9529	119,11	79,41	439,5	54937,5	36625
120	3,646	455,75	303,83	87,33	10916,3	7277,5
135	3,580	447,5	298,33	76,34	9542,5	6361,7

## b. Masses de césium absorbées

Tableau 23 Masses de césium (0,05mmol) et potassium (K) absorbées par la plante.

Période	Cs (0,05 mmol)			K1		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]
0(blanc)	0,8061	82,05	67,18	279	28399,9	23250
15	0,6896	61,99	57,47	360,5	32407,4	30041,7
21	1,131	101,67	94,25	264,0	23732,5	22000
30	nd	Nd	Nd	402,8	36210,04	33566,7
45	3,418	307,26	284,83	280,1	25179,8	23341,7
60	3,211	288,66	267,58	279	25080,9	23250
90	2,558	229,95	213,17	271,2	24379,8	22600
135	nd	Nd	Nd	277,6	24955,1	23133,3
150	nd	Nd	Nd	222,5	20001,8	18541,7

nd: non détectable.

Tableau 24 Masses de césium (0,5mmol) et potassium (K) absorbées par la plante.

Période	Cs2 (0,5 mmol)			K2		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]
0(blanc)	0,8061	82,05	67,18	279	28399,9	23250
15	-	-	-	-	-	-
21	2,623	23,8	218,58	273,7	24604,4	22808,3
30	0,9438	84,84	78,65	342,6	30798,3	28550
45	0,4812	43,26	40,1	248,6	22348,1	20716,7
60	1,340	120,46	111,67	277	24901,1	23083,3
90	2,976	267,53	248	289,6	26033,8	24133,3
135	0,8113	72,93	67,61	221,8	19938,9	18483,3
150	-	-	-	-	-	-

(-) : donnée non fournie.

Tableau 25 Masses césium (3mmol) et potassium (K) absorbées par la plante .

Période	Cs3 ( 3mmol)			K3		
	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]	C1[ppm]	m <sub>ph</sub> [µg]	m <sub>abs</sub> [µg.g <sup>-1</sup> ]
0(blanc)	0,8061	82,05	67,18	279	28399,9	23250
15	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-
30	2,931	263,48	263,48	338,1	30393,8	28175
45	2,322	208,74	208,74	209,4	18824,2	17450
60	1,894	170,26	157,83	160,8	14455,3	13400
90	1,396	125,49	116,33	224,8	20208,6	18733,3
135	nd	nd	nd	168,4	15138,5	14033,1
150	-	-	-	-	-	-

nd: non détectable ; (-) : donnée non fournie.

# Glossaire chimique

**Adsorption** : Adhérence de molécules (en couche mince) à la surface des corps solides ou des liquides avec lesquels elles sont en contact.

**Agrégat** : Aussi appelés "assemblages élémentaires", les agrégats de sol sont constitués des particules minérales de sol, de ciments (organiques, oxydes et hydroxydes ..) et de vides intra-agrégats. Ils sont visibles à l'œil nu (diamètre de l'ordre du mm).

**Analogues** : espèce chimique ne diffère d'une autre espèce chimique que par le remplacement d'un atome par un autre, et qui présente des propriétés physico-chimique et biologique.

**Biodisponibilité** : L'accessibilité des composés chimiques présents dans l'environnement à un ou plusieurs organismes.

**Boues d'épurations** : résidus du traitement des effluents liquides par des stations d'épuration.

**BTEX ou CAV** : famille de composés contents un cycle benzénique sur le quelle se bronche une large variété de substituant l'acronyme betex est formé des initiale des CAV les plus usuelles (Benzène, Toluène, Éthylbenzène , Xylènes).

**Colloïde** : Particules microscopiques en suspension dans un milieu liquide, généralement de taille comprise entre un nanomètre et un micromètre.

**Erosion** : Ensemble des processus responsables de l'évolution des reliefs engendrés par les déformations de l'écorce terrestre (par ablation, transport et aussi accumulation.

**Exsudats** : Un exsudat est un suintement de liquide organique.

**Isotope** : Toute espèce d'atomes d'un élément chimique ayant le même numéro atomique (nombre de protons) et un comportement chimique presque identique mais avec un nombre différent de neutrons, d'où un poids atomique différent.

**Lixiviât** : liquide résiduel engendré par la percolation de l'eau et des liquides à travers une zone de stockage de déchets, de produits chimiques ou tout simplement un sol contaminé par des polluants.

**Métalloïde** : est un corps simple qui n'est pas un métal, car il ne comporte pas les mêmes caractères physiques que les métaux. Le métalloïde ressemble néanmoins à un métal par ses propriétés ou par son éclat.

**Période de demi-vie:** Temps nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes d'une substance radioactive.

**Résine échangeuse :** L'échangeur d'ions est un matériau solide, capable d'éliminer par adsorption les ions d'une certaine charge (cation ou anion) d'une solution. Ceux-ci sont remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge.

# Glossaire biologique

**Biodégradation :** La décomposition des matières organiques en composants plus simples par les micro-organismes.

**Biodisponibilité :** La biodisponibilité d'un sol est un terme permettant de décrire l'assimilabilité d'un élément nutritif par les plantes.

**Bisannuelles :** Une *plante bisannuelle* est une plante qui accomplit son cycle de vie en deux.

**Biosphère :** Est l'ensemble des organismes vivants et leurs milieux de vie, donc la totalité des écosystèmes présents que ce soit dans la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère.

**Bourgeons :** Les bourgeons sont des organes situés au sommet de la tige (bourgeon apical ou terminal) ou à l'aisselle des feuilles (bourgeons axillaires).

**Biote :** l'ensemble des plantes, micro-organismes et animaux et tous les êtres vivants, bactéries incluses, qui sont présentes dans un lieu ou secteur donné pour constituer le milieu biotique.

**Dentées :** *Feuille* dont le format est plus grand qu'une dent.

**Espèces ligneuses :** Est un végétal qui possède des tiges ayant la nature ou la consistance du bois, c'est-à-dire qui contiennent de la lignine.

**Étamines :** Organe sexuel mâle des végétaux à fleurs comprenant le filet et l'anthère, qui produit et renferme le pollen.

**Feuilles Lobées :** Le lobe est une division arrondie et peu profonde du limbe d'une feuille.

**Foliaire :** Qualifie un segment, c'est-à-dire une petite et/ou une mince foliole. Est foliaire ce qui se rapporte à la feuille, comme une gaine (gaine foliaire), un limbe, une glande, la disposition, une cicatrice, un pigment, etc.

**Géosphère :** Se rapporte plutôt aux parties solides de la Terre, et s'oppose ainsi à l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

**Hydrosphère :** Désigne les zones du globe terrestre occupées par de l'eau ou de la glace. Cette définition inclut donc : les océans, les mers, les cours d'eau, les lacs, les glaciers, les calottes polaires et les eaux souterraines.

**Hyper accumultrices :** Un hyper accumulateur, ou plante hyper accumultrice, est une plante capable de stocker dans ses tissus une quantité élevée, voire très élevée, d'un ou de plusieurs éléments, généralement par le biais de la bioaccumulation.

**Inflorescence :** Correspond au mode de groupement des fleurs d'une plante.

**Ligules :** La ligule d'une gaine foliaire est un appendice membraneux situé dans la tige qui rejoint la feuille.

**Limbe :** Le limbe d'une feuille de végétal est la partie de cet organe située à l'extrémité du pétiole. Cette pièce foliaire est en général très étalée et comporte de nombreuses cellules photosynthétiques, car c'est un organe particulièrement adapté à la capture de l'énergie lumineuse.

**Micro-organisme:** Tout organisme de taille microscopique ou ultramicroscopique.

**Palmatinervées :** Toute feuille dont les nervures partent en éventail (comme flabellée) à partir du pétiole, comme une main segmentée avec plusieurs limbes.

**Pétiole :** Partie de la feuille, généralement rétrécie (C'est la « queue » de la feuille).

**Penninervées :** Se dit d'une feuille dont la nervure principale porte, de part et d'autre, des nervures secondaires disposées comme les barbes d'une plume.

**Plante Annuelle:** Plante dont le cycle de développement complet s'accomplit en un an.

**Rameux:** Comportant de nombreuses ramifications.

**Rhizosphère:** Sol qui entoure et est influencé par les racines d'une plante.

**Sépale :** est l'un des éléments foliacés, généralement verts, dont la réunion compose le calice et supporte la corolle de la fleur.

**Tubérisées :** transformation en tubercule d'une tige ou d'une racine, avec accumulation de réserves nutritives.