

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer  
et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE de MAGISTER  
en Sciences de la Mer

Spécialité : Gestion et Surveillance de l'Environnement Marin et Littoral

Thème :

Etude de la répartition de la radioactivité naturelle et artificielle, et de la minéralogie  
dans les carottes de sédiments, dans la baie de Bou-Ismail.

Présenté par :

M. REZGUI Walid

Devant le jury composé de :

|                                |                            |              |
|--------------------------------|----------------------------|--------------|
| M. BOULAHIDID Mostefa          | Professeur (ENSSMAL)       | Président    |
| M. CHALGHOUM Chabane           | Professeur (FC/USTHB)      | Examineur    |
| M <sup>me</sup> . HOUMA Fouzia | Professeur (ENSSMAL)       | Examinatrice |
| M. NOUREDDINE Abdelkader       | Maître de Recherche (CRNA) | Promoteur    |
| M. BELAMRI Mohamed             | Maître de Recherche (CRNA) | Invité       |

Le : 16/05/2013.

## REMERCIEMENTS

Antérieurement et à tout moment je remercie Notre Dieu.

Je remercie très vivement mes parents et frères et toute ma famille pour leur encouragement et leur aide.

Au terme de ce travail, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui par leur aide, leurs conseils, leur compétence ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Que soient particulièrement remerciés les membres de jury :

Mon directeur de Mémoire, **Mr NOUREDDINE Abdelkader**, Maître de Recherche et Directeur de la Division de l'Environnement, de la Sécurité et des Déchets Radioactifs (DESDR) au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), d'avoir accepté, de diriger et de suivre constamment la progression de ce travail, par ses suggestions, conseils et ses critiques constructives.

**M. BOULAHIDJ Mestafa**, Professeur à l'ENSSMAL qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

**M<sup>me</sup> HOUMA Fouzia**, Professeur à l'ENSSMAL, **M. CHALGHOUM**, Professeur à la Faculté de la Chimie à l'USTHB, qui ont accepté très aimablement de participer à ce jury et d'examiner ce travail.

**M. BELAMRI Mohamed**, Directeur de la Division des Techniques Nucléaires au CRNA, à lui rendre un hommage tout particulier d'avoir accepté notre invitation.

Je remercie aussi **TAIEB Djamel**, **MAACHE Mustapha**, **MENNACER Mohamed** du laboratoire d'Impacts Radiologiques de la DESDR du CRNA, **HOCINI Nadia**, **MAMI Mohamed**, **AZAM Samia** du Laboratoire de Sédimentologie de la DESDR au CRNA, **ZIANE Kamel** du laboratoire de Minéralogie au CRNA, Le personnel de l'ENSSMAL et du CRNA particulièrement ceux de la bibliothèque, Mes collègues **INAL Ahmed**, **ABDERHAMENE Khaled**, **CHERIET Walid**, **HARMOUCHE Abd Essamie**, **SAMI Habib**, **BOUAFIA Soufiane**, **MESSAD Réda**, **BADRI Omar...**

## RESUME

La radioactivité naturelle existe depuis des milliards d'années dans les différents compartiments de l'environnement. De plus après la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale et avec l'avènement de l'industrie nucléaire, la radioactivité artificielle a été introduite dans l'environnement.

Pour comprendre l'interaction et le comportement des radioéléments vis-à-vis du milieu marin nous avons prélevés deux carottes de sédiment le 12 et le 13 Mai 2011 à bord du bateau Baba Arroudj en face de l'embouchure de l'oued Mazafran (baie de Bou-Ismaïl) au moyen d'un carottier tube de type « UWITEC ». Les techniques de conditionnement des échantillons et d'analyse sont ceux du laboratoire d'Impacts Radiologiques et du laboratoire de minéralogie du CRNA.

Les éléments radioactifs d'intérêt identifiés et mesurés par la technique de spectrométrie gamma, sont de l'ordre de huit : le plomb 210, l'uranium 238, le plomb 212, le plomb 214, le bismuth 214, le césium 137, l'actinium 228 et le potassium 40.

Les constituants chimiques des sédiments sont identifiés et mesurés par analyse en Fluorescence X. Ces minéraux sont, par ordre d'abondance : le SiO<sub>2</sub>, l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, le CaO, le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, le MgO, le K<sub>2</sub>O, le Na<sub>2</sub>O, le TiO<sub>2</sub>, le SO<sub>3</sub>, le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et enfin le MnO.

Les spectres de l'analyse minéralogique signalent la présence du Quartz, de la Calcite, et des types d'Argiles.

Une interprétation générale a été faite pour essayer de trouver une relation entre les différents comportements des radioéléments, les constituants chimiques et minéralogique.

**Mots clés :** Radioactivité, Carottes sédimentaires, Constituants chimiques, Minéraux, Baie de Bou-Ismaïl.

## الملخص:

يوجد النشاط الإشعاعي في الطبيعة بمختلف أجزائها البيئية منذ ملايين السنين، ثم إنه بعد الحرب العالمية الثانية و في عصر الصناعات النووية (القرن العشرين) أدى ذلك إلى إضافة عناصر مشعة جديدة يطلق عليها "عناصر إشعاعية اصطناعية". و من أجل فهم تفاعل و سلوك هذه العناصر المشعة، الطبيعية منها و الاصطناعية، في الوسط البحري قمنا بأخذ "جزرتين" رسوبيتين بتاريخ 12 و 13 مايو 2011 على متن باخرة "بابا عروج" التابعة للمدرسة العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل في واجهة مصب وادي "مازا فران" بخليج "بوسماعيل" بواسطة جهاز "أخذ جزرات" من نوع إيويثاك، و قد تم دراسة و تحليل هذه الجزرات بمخبر التأثيرات الإشعاعية و مخبر علم المعادن التابعين لمركز البحث النووي بالجزائر.

ثمانية عناصر مشعة تم تعيينها و قياس تركيزها في كل من الجزرتين و هم: اليورانيوم 238 و الرصاص 210 و 212 و 214 و البيسميث 214 و السيزيوم 137 و الأكتينيوم 228 و أخيرا البوتاسيوم 40.

إحدى عشر مكونا كميائيا تم تحديد نسبته عن طريق دراسة أطيف الإشعاع X و هم: ثاني أكسيد السيليسيوم و ثلاثي أكسيد الألمنيوم و أكسيد الكالسيوم و ثلاثي أكسيد الحديد و أكسيد المغنيزيوم و أكسيد البوتاسيوم و أكسيد الصوديوم و ثنائي أكسيد التيتان و ثلاثي أكسيد الكبريت و في الأخير أكسيد المانغانز.

أيضا الأطيف تشير إلى وجود مكونات معدنية من نوع الكوارتز و الكلس و أنواع من معدن الأرجيل.

**الكلمات المفتاحية:** النشاط الإشعاعي، الجزرات الرسوبية، المكونات الكميائية، المعادن، خليج بوسماعيل

## **Abstract**

Natural radioactivity has been around for billions of years in different environmental compartments. Also after the second world and little with the advent of the nuclear industry, artificial radioactivity was introduced into the environment.

To understand the interaction and behavior of radionuclide's in the marine environment we have two sediments cores collected on 12 and 13 May 2011 on board the boat Baba Arroudj opposite the mouth of the valley Mazafran (Bay of Bou-Ismaïl) through a tube core barrel type "UWITEC". Packaging techniques and sample analysis are those in the laboratory of Radiological Impacts and laboratory of mineralogy in the Nuclear Research Center of Algiers.

Interest Radioactive elements are identified in the order of eight: plumb -210, uranium-238, plumb 212, plumb 214, bismuth-214, cesium-137, actinium-228 and potassium 40.

Eleven chemical components of sediments from the Carrot I are identified and measured by X-ray fluorescence. These minerals are, in order of abundance:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and finally  $\text{MnO}$ . Spectra mineralogical analyzes indicate the presence of Quartz, Calcite, and types of clays.

**Clays Words:** Radioactivity, Sediments Cores, Minerals, Bay of Bou-Ismaïl.

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction**..... 1

---

## CHAPITRE I: GENERALITES

---

|   |    |
|---|----|
| 1. Notions de base sur la radioactivité.....                        | 3  |
| 1.1. Désintégration radioactive.....                                | 3  |
| 1.2. Différents processus d'émission radioactive.....               | 3  |
| 1.2.1. Radioactivité alpha ( $\alpha$ ).....                        | 3  |
| 1.2.2. Radioactivité bêta ( $\beta$ ).....                          | 4  |
| 1.2.3. Radioactivité gamma ( $\gamma$ ).....                        | 4  |
| 1.2.4. Radioactivité par émission de neutrons.....                  | 5  |
| 1.3. Loi de désintégration.....                                     | 5  |
| 1.4. Notion d'équilibre séculaire.....                              | 6  |
| 2. Origines de la radioactivité dans l'environnement.....           | 7  |
| 2.1. L'origine naturelle.....                                       | 7  |
| 2.2. L'origine artificielle.....                                    | 10 |
| 2.2.1. Les origines volontaires.....                                | 11 |
| 2.2.1.1. Tests d'armes nucléaires.....                              | 11 |
| 2.2.1.2. Installations nucléaires.....                              | 13 |
| 2.2.2. Les origines involontaires : les accidents nucléaires.....   | 14 |
| 2.2.3. Les formes des radionucléides artificiels.....               | 15 |
| 3. Voies de transfert de la radioactivité dans l'environnement..... | 17 |
| 3.1. Voies de transfert atmosphérique.....                          | 17 |
| 3.2. Voies de transfert aquatique.....                              | 18 |
| 4. Rappels de minéralogie.....                                      | 20 |

---

## CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

---

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. Situation géographique.....   | 22 |
| 2. Le réseau hydrographique..... | 23 |
| 3. Cadre géomorphologique.....   | 24 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Morphologie sous marine de la baie Bou-Ismaïl..... | 24 |
| 4. Sédimentologie de la baie de Bou-Ismaïl.....         | 25 |
| 5. Sources de pollution dans la baie de Bou-Ismaïl..... | 26 |

---

### CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES

---

|  |    |
|--|----|
| 1. Campagne d'échantillonnage et travaux à bord.....                                 | 28 |
| 1.1. Prélèvement de sédiment.....  | 28 |
| 2. Travaux réalisés au laboratoire.....  | 31 |
| 2.1. Préparation des échantillons.....   | 31 |
| 2.2. Analyse par la spectrométrie gamma.....   | 32 |
| 2.2.1. Principe.....   | 32 |
| 2.2.2. Appareillage.....   | 33 |
| 2.2.2.1. Le détecteur germanium hyper pur (Ge HP).....                               | 33 |
| 2.2.2.2. Alimentation Haute-Tension.....   | 34 |
| 2.2.2.3. Alimentation Basse –Tension.....  | 34 |
| 2.2.2.4. Le Préamplificateur.....  | 34 |
| 2.2.2.5. L'Amplificateur.....  | 34 |
| 2.2.2.6. Le codeur (ou convertisseur) analogique-numérique.....                      | 34 |
| 2.2.2.7. Le système d'acquisition.....   | 35 |
| 2.2.3. Résolution en énergie.....  | 37 |
| 2.2.4. Efficacité de détection.....  | 38 |
| 2.2.5. Calcul du rendement de détection.....   | 39 |
| 2.2.6. Bruit de fond.....  | 44 |
| 2.2.7. Calcul d'activité.....  | 45 |
| 2.2.8. Limite de détection.....  | 47 |
| 2.3. Evaluation de la vitesse de sédimentation.....                                  | 48 |
| 2.3.1. Evaluation de la vitesse de sédimentation au moyen du $^{210}\text{Pb}$ ..... | 48 |
| 2.3.2. Evaluation de la vitesse de sédimentation au moyen du $^{137}\text{Cs}$ ..... | 50 |
| 2.4. Analyse par Spectrométrie d'émission des rayons X .....                         | 50 |
| 2.4.1. La source.....  | 53 |
| 2.4.2. La porte-échantillon.....   | 54 |
| 2.4.3. Système dispersif, détecteur et électronique de mesure.....                   | 54 |
| 2.4.4. Pratique de l'analyse.....  | 55 |
| 2.4.4.1. Préparation des échantillons.....   | 55 |

---

## CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

|  |    |
|--|----|
| I. Les éléments radioactifs.....                     | 58 |
| 1. Processus dans la Carotte I.....                  | 58 |
| 1.1. Le Plomb 210.....                               | 58 |
| 1.2. L'Uranium 238.....                              | 59 |
| 1.3. Le Plomb 212.....                               | 60 |
| 1.4. Le Plomb 214.....                               | 61 |
| 1.5. Le Bismuth 214.....                             | 61 |
| 1.6. Le Césium 137.....                              | 62 |
| 1.7. L'Actinium 228.....                             | 63 |
| 1.8. Le Potassium 40.....                            | 64 |
| 2. Processus dans la carotte II .....                | 64 |
| 2.1. Le Plomb 210.....                               | 64 |
| 2.2. L'Uranium 238.....                              | 66 |
| 2.3. Le Plomb 212.....                               | 67 |
| 2.4. Le plomb 214.....                               | 68 |
| 2.5. Le bismuth 214.....                             | 69 |
| 2.6. Le césium 137.....                              | 69 |
| 2.7. L'actinium 228.....                             | 70 |
| 2.8. Le potassium 40.....                            | 71 |
| II. Les constituants chimiques de la carotte I.....  | 78 |
| III. Les constituants minéralogiques de la carotte I | 86 |
| <b>Conclusion</b> .....                              | 89 |

**Bibliographie**

**Annexes**

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Chaîne de désintégration de l'Uranium -238  | 8  |
| Figure 2: Chaîne de désintégration de l'Uranium -235  | 8  |
| Figure 3: Chaîne de désintégration du Thorium -232  | 9  |
| Figure 4: Cycle du combustible nucléaire dans le cas de l'alimentation d'une centrale électrogène à eau légère (B.W.R ou P.W.R)   | 13 |
| Figure 5: les différentes voies de transfert atmosphérique  | 18 |
| Figure 6: les différentes voies de transfert aquatique  | 19 |
| Figure 07: Situation géographique de la baie de Bou-Ismaïl  | 22 |
| Figure 08: Réseau hydrographique de la baie de Bou-Ismaïl   | 23 |
| Figure 09 : Topographie de la baie de Bou-Ismaïl  | 25 |
| Figure 10 : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl   | 26 |
| Figure 11 : Les principaux rejets dans la baie de Bou-Ismaïl  | 27 |
| Figure 12: Carte de positionnement des stations de carottage  | 28 |
| Figure 13: Le Carottier UWITEC et ses accessoires utilisés dans le  | 29 |
| Figure 14: Les tubes PVC de conditionnement des carottes  | 30 |
| Figure 15 : Matériels utilisés dans le découpage des carottes   | 31 |
| Figure 16: Exemple d'un spectre de rayonnement gamma : spectre de l'échantillon C <sub>50-8cm</sub> de la première carotte.       | 33 |
| Figure 17: Synoptique d'une chaîne de spectrométrie Gamma   | 35 |
| Figure 18: Détecteur GeHP avec le cryostat et le réservoir à azote  | 36 |
| Figure 19 : Courbes d'efficacités du Standard de sol préparé pour le détecteur 2  | 44 |
| Figure 20: Spectre de comptage d'un bruit de fond du détecteur N° 2 pendant deux jours.   | 45 |
| Figure 21: Distribution des nombres d'impulsions et de bruit de fond observés après un nombre infini de mesures de même durée (t) | 47 |
| Figure 22: Schéma de principe de la fluorescence X en compétition avec l'effet Auger  | 51 |
| Figure 23: Constitution d'un spectromètre de fluorescence X séquentiel à dispersion en longueur d'onde                            | 52 |
| Figure 24: Tube à rayon X   | 54 |
| Figure 25: Le spectromètre de fluorescence X de type MagixPro   | 56 |
| Figure 26 : Distribution des concentrations de l' <sup>210</sup> Pb en fonction de la profondeur                                  | 59 |
| Figure 27 : Distribution des concentrations de l' <sup>238</sup> U en fonction de la profondeur                                   | 60 |
| Figure 28: Distribution des concentrations du <sup>212</sup> Pb en fonction de la profondeur                                      | 60 |
| Figure 29: Distribution des concentrations du <sup>214</sup> Pb en fonction de la profondeur                                      | 61 |
| Figure 30: Distribution des concentrations du <sup>214</sup> Bi en fonction de la profondeur                                      | 62 |
| Figure 31: Distribution des concentrations du <sup>137</sup> Cs en fonction de la profondeur                                      | 63 |
| Figure 32: Distribution des concentrations de l' <sup>228</sup> Ac en fonction de la profondeur                                   | 63 |
| Figure 32: Distribution des concentrations du <sup>40</sup> K en fonction de la profondeur  | 64 |
| Figure 33: Distribution des concentrations du <sup>210</sup> Pb en fonction de la profondeur                                      | 65 |
| Figure 34: Distribution de Ln ( <sup>210</sup> Pb <sub>exc</sub> ) en fonction de la profondeur                                   | 66 |
| Figure 35: Distribution des concentrations de l' <sup>238</sup> U en fonction de la profondeur                                    | 67 |
| Figure 36: Distribution des concentrations du <sup>212</sup> Pb en fonction de la profondeur                                      | 68 |
| Figure 37: Distribution des concentrations du <sup>214</sup> Pb en fonction de la profondeur                                      | 68 |
| Figure 38: Distribution des concentrations du <sup>214</sup> Bi en fonction de la profondeur                                      | 69 |
| Figure 39: Distribution des concentrations du <sup>137</sup> Cs en fonction de la profondeur                                      | 70 |
| Figure 40: Distribution des concentrations de l' <sup>228</sup> Ac en fonction de la profondeur                                   | 70 |
| Figure 41: Distribution des concentrations du <sup>40</sup> K en fonction de la profondeur  | 71 |
| Figure 42: Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Jijel en 2001                               | 73 |
| Figure 43: Distribution de radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Annaba 1999  | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 44: Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Annaba en 2004                                   | 75 |
| Figure 45: Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Alger en 2001                                    | 76 |
| Figure 46 : Distribution des concentrations du $^{210}\text{Pb}$ en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.                     | 77 |
| Figure 47 : Distribution des concentrations du $^{212}\text{Pb}$ en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.                     | 77 |
| Figure 48 : Distribution des concentrations du $^{137}\text{Cs}$ en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.                     | 77 |
| Figure 49 : Distribution des concentrations du $^{228}\text{Ac}$ en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.                     | 77 |
| Figure 50 : Distribution des concentrations du $^{40}\text{K}$ en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.                       | 77 |
| Figure 51 : Distribution des pourcentages de la matière brûlée en fonction de la profondeur dans la carotte I                          | 80 |
| Figure 52 : Distribution des pourcentages de l'oxyde de sodium en fonction de la profondeur dans la carotte I                          | 80 |
| Figure 53: Distribution des pourcentages de l'Oxyde du magnésium en fonction de la profondeur dans la carotte I                        | 80 |
| Figure 54: Distribution des pourcentages de l'oxyde d'Aluminium en fonction de la profondeur dans la carotte I                         | 81 |
| Figure 55: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Silicium en fonction de la profondeur dans la carotte I                         | 81 |
| Figure 56: Distribution des pourcentages de Pentoxyde de Phosphore en fonction de la profondeur dans la carotte I                      | 81 |
| Figure 57: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Potassium en fonction de la profondeur dans la carotte I                        | 82 |
| Figure 58: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Calcium en fonction de la profondeur dans la carotte I                          | 82 |
| Figure 59: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Titane en fonction de la profondeur dans la carotte I                           | 82 |
| Figure 60: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Manganèse en fonction de la profondeur dans la carotte I                        | 83 |
| Figure 61: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Soufre en fonction de la profondeur dans la carotte I                           | 83 |
| Figure 62: Distribution des pourcentages de l'oxyde de Fer en fonction de la profondeur dans la carotte I                              | 83 |
| Figure 63: Corrélation entre $\text{TiO}_2$ et $\text{K}_2\text{O}$  | 84 |
| Figure 64: Corrélation entre $\text{K}_2\text{O}$ et $\text{CaO}$  | 84 |
| Figure 65: Corrélation entre $\text{TiO}_2$ et $\text{CaO}$  | 84 |
| Figure 66: Corrélation entre $\text{MgO}$ et $\text{SO}_3$   | 84 |
| Figure 67: Corrélation entre $\text{SiO}_2$ et $\text{Al}_2\text{O}_5$   | 84 |
| Figure 63: Spectres des six échantillons de la carotte I analysée par diffraction X au CRNB  | 86 |
| Figure 64: Les différents spectres des cinq échantillons analysés par diffraction de la carotte du Sud de la Sardaigne (Athmani, 2008) | 88 |
| Figure 65 : Spectres des phases dominantes à la profondeur (0-0.5cm) cm de la carotte sédimentaire du Sud de la Sardaigne              | 88 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tableau 1:</b> Principaux radionucléides cosmogéniques   | <b>9</b>  |
| <b>Tableau 2:</b> Quantité de radioactivité en PBq encore présente en 2000  | <b>12</b> |
| <b>Tableau 3:</b> radioactivité artificielle dégagée dans l'environnement après l'accident  | <b>14</b> |
| <b>Tableau 4:</b> Tableau comparatif des activités des principaux radioéléments rejetés par certains accidents et essais nucléaires | <b>15</b> |
| <b>Tableau 5:</b> Principaux radionucléides artificielles   | <b>16</b> |
| <b>Tableau 6:</b> Fiche de prélèvements des carottes  | <b>29</b> |
| <b>Tableau 7:</b> Pics d'énergie des radioéléments émetteurs gamma avec leur probabilité d'émission pour l'Eu-152 et le Ba-133      | <b>39</b> |
| <b>Tableau 8:</b> Rendements de détection des différentes masses.   | <b>41</b> |
| <b>Tableau 9:</b> Pics d'énergie des radioéléments émetteurs gamma pour l'Eu-152  | <b>42</b> |
| <b>Tableau 10:</b> Rendements de détection des différentes masses du standard   | <b>43</b> |
| <b>Tableau 11:</b> Les énergies en keV correspondant aux radioéléments d'intérêt déterminés dans ce travail                         | <b>46</b> |
| <b>Tableau 12 :</b> Les échantillons de l'étude minéralogique   | <b>57</b> |
| <b>Tableau 13:</b> Résultats des activités de Radium 226 et du Pb-210 en excès  | <b>65</b> |
| <b>Tableau 14:</b> Tableau récapitulatif des valeurs maximales, minimales et moyennes des différentes carottes                      | <b>73</b> |
| <b>Tableau 15:</b> Abondances des différents acides dans chaque couche sédimentaire de la carotte I                                 | <b>85</b> |

## INTRODUCTION

La radioactivité naturelle existe depuis des milliards d'années, dans les différents compartiments de l'environnement. Celle-ci est transférée par différentes voies au milieu marin et se retrouve dans l'eau, le sédiment, la matière en suspension et le biote. De plus, depuis 1945, date des premiers essais nucléaires atmosphériques, effectués à travers le monde, et aussi avec l'avènement de l'industrie nucléaire, la radioactivité artificielle a été introduite dans l'environnement en général et en particulier dans le milieu marin.

A l'égard de cette situation, les chercheurs des différentes disciplines en relation avec l'environnement et la mer ont contribué à l'étude du (des) comportement(s) de tous les radionucléides vis-à-vis du milieu récepteur et ses composantes physiques, biologiques...

Ces études demandent une stratégie précise et méthodologique à travers tous les centres de recherche mondiaux pour fixer les normes, comparer les résultats, etc. Cette association internationale des centres de recherche qui est sorti de la prise de conscience publique a abouti à l'installation des réseaux de surveillance nationaux et internationaux représentés par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, qui recommande les principes de sûreté de l'homme et de l'environnement.

Après des années d'étude et d'expérience, le comportement et le devenir de plusieurs radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement est défini avec une unanimité autour de deux effets principaux, l'un positif et l'autre négatif. L'utilisation de ces radionucléides comme des traceurs pour l'étude de plusieurs processus naturels telle que la sédimentation, la circulation des masses d'eau marine, la détection des gisements, la paléoclimatologie, c'est l'effet positif. L'effet négatif est limité à l'effet des radionucléides de types artificiels sur la perturbation de la santé du milieu et de l'homme.

La présente étude s'inscrit dans l'évaluation du degré de la radioactivité que se soit naturelle ou artificielle de la baie de Bou-Ismaïl (Ouest d'Alger). Cette baie fait partie du bassin occidental de la mer Méditerranée, cette dernière est une mer semi-fermée qui se trouve dans une situation de vulnérabilité vis-à-vis d'une éventuelle contamination. Cette mer est caractérisée par une faible précipitation et une évaporation importante. Elle reçoit un apport important d'eau atlantique à travers le détroit de Gibraltar en provoquant un courant dit

«courant algérien » qui joue un rôle important dans la dynamique et le transport des masses d'eaux méditerranéennes.

Nous avons prélevé deux carottes de sédiment marin à des profondeurs respectives de 30 et 50 mètres en face de l'embouchure de l'Oued Mazafran en baie de Bou-Ismaïl. Le sédiment marin constitue une bonne mémoire des différents événements environnementaux passés du fait de leur capacité de rétention et de fixation des éléments décantant à travers la colonne d'eau.

Cette conception méthodologique a pour but la compréhension des différents processus en exploitant les traceurs radioactifs et pour surveiller le degré de radioactivité et le devenir des radionucléides d'intérêt dans cet environnement marin et sédimentaire. Aussi, nous avons profité de l'occasion pour étudier les compositions chimiques de chaque couche de carotte prélevée, ainsi leur minéralogie en essayant de faire sortir les différentes corrélations existantes entre les minéraux, les compositions chimiques et les radioéléments d'intérêt.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier présente quelques notions fondamentales de la radioactivité, ses origines dans l'environnement et les voies de cheminement de cette radioactivité pour qu'elle arrive au milieu marin. Dans le deuxième chapitre on expose la zone d'étude. Le matériel utilisé et les techniques de prélèvement des échantillons, de conditionnement et d'analyse par spectrométrie gamma, par spectrométrie de fluorescence X et diffraction X sont exposés dans le troisième chapitre, et les résultats et leurs discussions sont présentés dans le dernier chapitre.

## CHAPITRE I : GENERALITES

### 1. Notions de base sur la radioactivité

#### 1.1. Désintégration radioactive

Les éléments chimiques de la matière peuvent avoir plusieurs isotopes dont l'état est stable dans le temps ou instable.

Les éléments instables appelés radioéléments, radionucléides, ou encore radio-isotopes, subissent des transformations spontanées en autres éléments radioactifs ou stables par un réarrangement de nucléons. Lors de cette transformation, une énergie se libère sous forme de rayonnement particulaire (alpha ou bêta) ou de rayonnement électromagnétique (gamma) d'où on trouve l'origine de la radioactivité ou le processus de désintégration radioactive.

#### 1.2. Différents processus d'émission radioactive

##### 1.2.1. Radioactivité alpha ( $\alpha$ )

Le rayonnement alpha provient de l'expulsion du noyau radioactif d'une particule alpha, qui est le noyau d'Hélium ( ${}^4_2\text{He}$ ), composé de deux protons et de deux neutrons. Ce type d'émission correspond à la désintégration des noyaux lourds, de nombre atomique pour la plupart supérieur à 82, présentant un surplus de charges positives.

La réaction de désintégration est exprimée par l'équation suivante :



Où :

$({}^A_Z X)$  : est le noyau qui subit la désintégration ;

$({}^{A-4}_{Z-2} X)$  : est le noyau formé après désintégration ;

$({}^4_2 \text{He})$  : est la particule alpha émise.

Q : est l'énergie cinétique après le processus. Il résulte de l'équation  $E=mc^2$  que le bilan Q s'exprime à l'aide des masses des différents partenaires (Charles, 2007) :

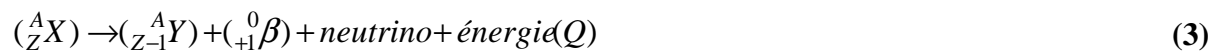
$$Q = [M({}_Z^AX) - M({}_{Z-2}^{A-4}X) - M(\alpha)]c^2 \quad (2)$$

Une transformation alpha décale l'élément dans la classification périodique de Mendeleïev de deux cases vers la gauche et de quatre cases vers le bas (Caillot, 2002).

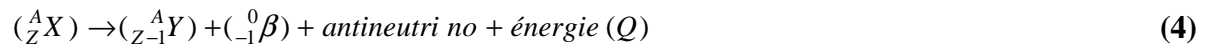
### 1.2.2. Radioactivité bêta ( $\beta$ )

Cette désintégration a lieu lorsque le noyau présente un excès de neutrons ou de protons. Comme résultante on a l'émission d'une particule positive ou négative.

On parle d'émissions bêta+ ( $\beta+$ ) lorsque le noyau a un excès de protons et se traduit par leurs transformations en neutrons. Cette transition est exprimée par la réaction :



L'émission ( $\beta-$ ) est spécifique au noyau présentant un excès de neutrons qui entraîne leurs transformations en protons, suivant la réaction :



La radioactivité est isobarique c'est-à-dire qu'elle conserve le nombre de masse A (Charles, 2007).

Une transformation bêta (-) donne naissance à un élément qui se trouve, par rapport à l'élément « père », une case plus bas et plus à droite. L'émission bêta (+) donne naissance à un élément qui se trouve, par rapport à l'élément père, également une case plus bas mais plus à gauche (Caillot, 2002).

### 1.2.3. Radioactivité gamma ( $\gamma$ )

Contrairement à l'émission alpha et bêta, le rayonnement gamma est une onde électromagnétique, issu du noyau de l'atome fils et correspond à une désexcitation de ce dernier. L'émission gamma est obtenue lors des transitions du noyau d'un état excité à un état fondamental ou moins excité. Avec un excès d'énergie, le noyau va alors émettre plusieurs rayonnements gamma d'énergie déterminée et caractéristique du noyau.

L'émission gamma seule ne donne pas naissance à une transmutation, sauf si elle est accompagnée d'une émission alpha ou bêta. Autrement dit, l'élément reste dans la même case

de la classification de l'élément excité (on dit métastable) prend son énergie en donnant un photon (Caillot, 2002) :



Les énergies des rayonnements gamma émis par les noyaux sont le plus souvent dans la gamme d'énergie de 100 keV à 1 MeV, alors que les photons de domaine visible ont des énergies de l'ordre de 2 à 3 eV. Les photons gamma émis par les noyaux ont donc des énergies environ  $10^5$  fois plus grande que ceux du domaine visible (Charles, 2007).

#### 1.2.4. Radioactivité par émission de neutrons

Certains noyaux dans des états de grande excitation peuvent se désexciter par émission de neutrons (Charles, 2007). Ces neutrons sont très rarement émis spontanément par un isotope, ce sont des particules non chargés qui ne perdent leur énergie qu'après des chocs multiples (Caillot, 2002). C'est le cas des produits de fission :  ${}^{85}\text{As}$ ,  ${}^{135}\text{Sb}$ ,  ${}^{89}\text{Br}$ ,  ${}^{137}\text{I}$ ,  ${}^{87}\text{Br}$ . Ces nucléides appelés « noyaux précurseurs », jouent un rôle capital dans le contrôle des réacteurs (Charles, 2007).



#### 1.3. Loi de désintégration

Selon la loi fondamentale de désintégration des noyaux radioactifs, le taux de transformation d'un radioélément par les différents processus radioactifs est proportionnel au nombre d'atomes présents. Cette décroissance radioactive suit une loi exponentielle et est exprimée comme suit :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (7)$$

Où :

$dN/dt$  : est le taux de désintégration ;

$\lambda$  : est la constante de désintégration radioactive.

L'intégration de l'équation (7) conduit à la loi exponentielle :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (9)$$

Où :

$N$  : est le nombre de noyaux radioactifs non désintégrés à l'instant ( $t$ ) ;

$N_0$  : le nombre initial de noyaux à l'instant ( $t_0$ ),  $t = 0$ ;

$t_{1/2}$  : le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux instables se réduit à moitié seulement par désintégration radioactive ; c'est le temps de demi-vie d'un radionucléide instable.

Chaque isotope est caractérisé par une vitesse de désintégration ou activité radioactive, proportionnelle au nombre de noyaux instables ( $N$ ), présents à un temps  $t$ . L'activité d'un radionucléide est donnée donc par l'équation suivante (multiplication de l'équation (5) par  $\lambda$ ) :

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (10)$$

$A_0$  : c'est l'activité initiale

L'unité de l'activité est le Becquerel ( $Bq = 1 \text{ des/s}$ )

La durée de vie moyenne d'un isotope radioactif est donnée par (Caillot, 2002):

$$\tau = \frac{1}{A_0} \int_0^{\infty} t A \lambda dt \quad (11)$$

A tort, elle est souvent confondue avec la période  $T$ , quelques calculs simples montrent que :

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

Et donc :

$$T = \tau \ln 2 \quad (13)$$

#### 1.4. Notion d'équilibre séculaire

Si la période de l'élément radioactif père  $(T_{1/2})_1$  est nettement supérieure à celle du fils  $(T_{1/2})_2$  ou bien  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ , et si on développe l'équation 5 et on procède à certaines simplifications

(Friedlander, 1981) , on arrive à l'expression  $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$  ou  $A_1 = A_2$  après un temps  $t$  égal approximativement à 10 fois la période radioactive de l'élément fils, c'est un équilibre radioactif (équilibre séculaire) où l'élément radioactif père et son descendant ont la même activité.

## 2. Origines de la radioactivité dans l'environnement

La radioactivité dans l'environnement (continental ou marin) a une double origine, l'une naturelle et l'autre artificielle. Cette radioactivité peut avoir des répercussions sur les êtres vivants, en cas d'une exposition à ces rayonnements, dépassant une certaine limite.

### 2.1. L'origine naturelle

La contribution de la radioactivité naturelle (découverte en 1896 par Becquerel) à l'environnement est divisée en deux catégories :

- La première catégorie concerne **les radionucléides primordiaux** qui font partie des éléments constitutifs du globe (demi-vie relativement longue).

Ces radionucléides primordiaux sont classés en deux grands groupes, le premier concerne les radionucléides produits ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ ,  $^{187}\text{Re}$ ...) et le second concerne ceux qui résultent de la décroissance des quatre séries radioactives ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) (figure 1, 2 et 3).

Le radioélément produit le plus important, le Potassium 40 ( $^{40}\text{K}$ ), émetteur bêta et gamma, avec une demi-vie de  $1,27 \times 10^9$  ans. Sa contribution dans le milieu marin est estimée à 90 % avec une concentration d'environ 12,24 Bq/L (Riley, 1975).

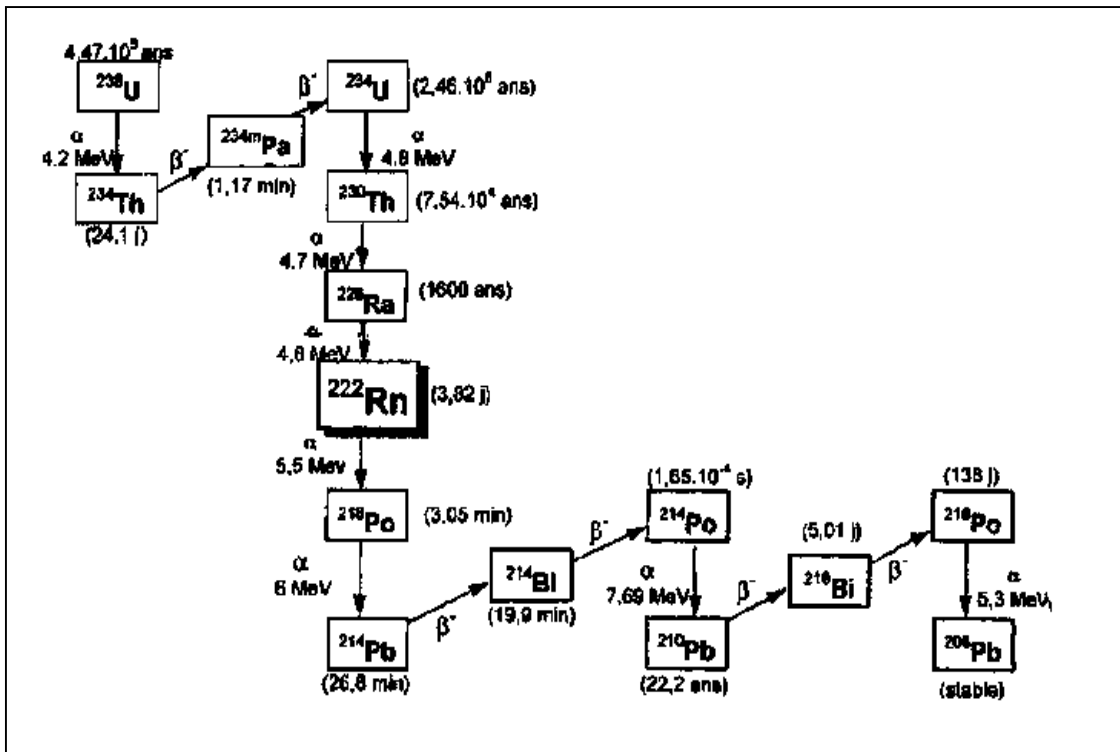


Figure 1: Chaîne de désintégration de l'Uranium -238 (Freidlander et al, 1981)

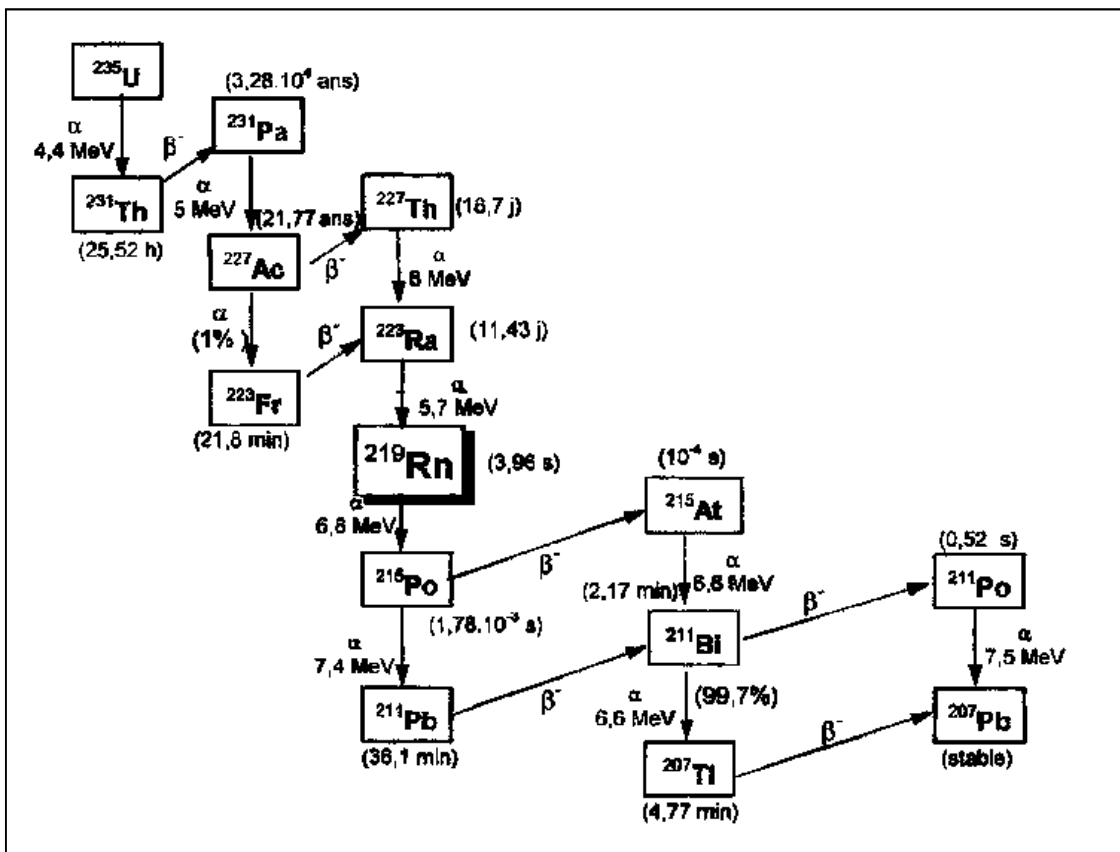
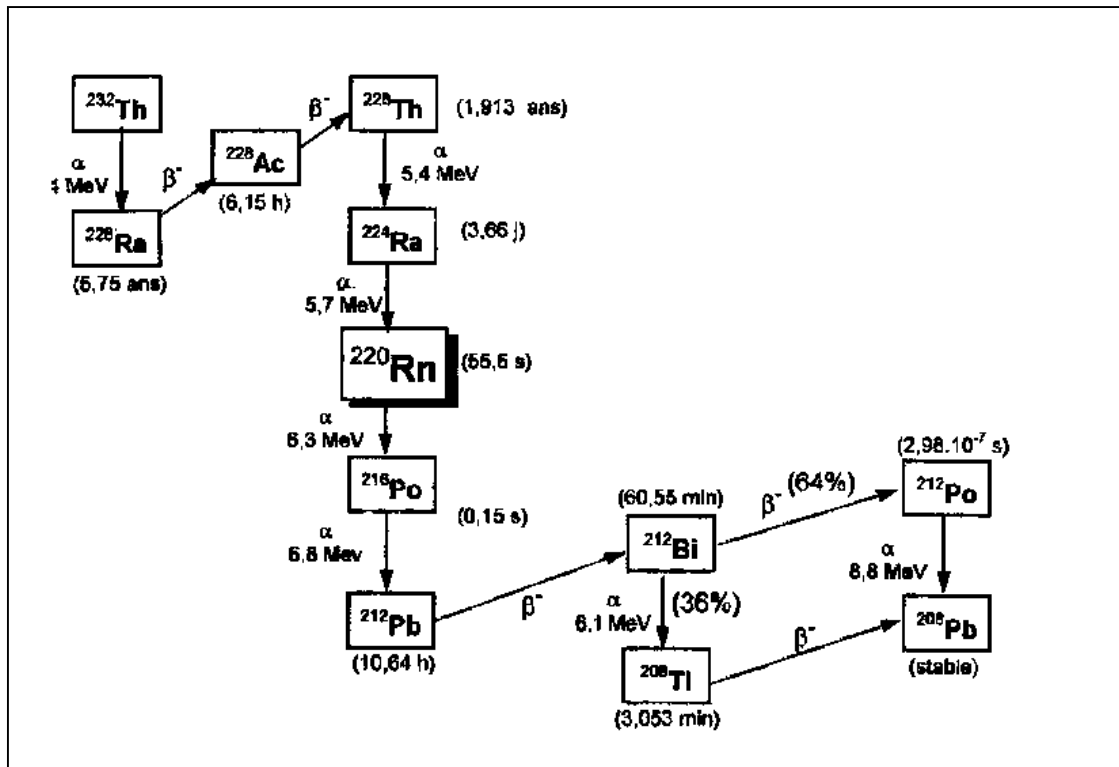


Figure 2: Chaîne de désintégration de l'Uranium -235 (Freidlander et al, 1981)



**Figure 3:** Chaîne de désintégration du Thorium -232 (Freidlander et al, 1981)

Ces trois familles radioactives, après une succession d'émission alpha ou bêta, aboutissent à des isotopes stables de Plomb. L'Uranium 238, avant de se transmuter en Plomb 206 stable, passe par l'intermédiaire de quatorze éléments fils tous radioactifs. L'Uranium 235 génère onze éléments fils tous radioactifs avant d'aboutir au Plomb 207 qui est stable. Le Thorium 232 génère au cours du temps dix éléments fils avant d'aboutir à l'isotope stable le Plomb 208 (Caillot, 2002).

- La deuxième catégorie (partie de moindre importance) concerne **les rayonnements cosmiques** (solaires et galactiques) qui conduisent, lors de leurs interactions avec les différents constituants de l'atmosphère, à la formation de radionucléides appelés **cosmogéniques** (Eisenbud, 1973 in Amiard-Triquet et Amiard, 1980), comme le montre le tableau N° 1.

**Tableau 1:** Principaux radionucléides cosmogéniques

| Élément | $^{10}\text{Be}$   | $^{14}\text{C}$ | $^3\text{H}$ | $^{22}\text{Na}$ | $^{35}\text{S}$ | $^7\text{Be}$ | $^{33}\text{P}$ | $^{32}\text{P}$ | $^{35}\text{Cl}$ |
|---------|--------------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Période | $2,7 \cdot 10^6$ a | 5570 a          | 12,5 a       | 2,6 a            | 87 j            | 53 j          | 25 j            | 14,2 j          | 1 h              |

Par ordre d'importance de décroissante au point de vue de leur participation à la radioactivité naturelle de l'eau de mer on peut distinguer les radionucléides ou groupes de radionucléides suivants (Ancellin et al, 1979):

- Le Potassium  $^{40}\text{K}$  et le Rubidium  $^{87}\text{Rb}$ , représentent respectivement 90% et 1% environ de la radioactivité de l'eau de mer ;
- L'Uranium et le Thorium ainsi que les divers isotopes auxquels ils donnent naissance au cours de leur décroissance radioactive ;
- Le groupe des radionucléides secondaires, présents en quantité faible ou très faible, tel que l'Indium 115, le Lanthane 138, le Lutétium 176, etc., ainsi que les radionucléides créés par l'action des rayons cosmiques (Carbone 14 principalement).

La radioactivité des sédiments résulte principalement de la présence, en plus ou moins grande abondance, de Potassium  $^{40}\text{K}$  et d'éléments du groupe Uranium -Thorium, ainsi que de leurs descendants ; elle peut être en moyenne pour un sédiment ordinaire de l'ordre de 296 Bq/kg à 370 Bq/kg.

Enfin les organismes vivants présentent de même une certaine radioactivité naturelle principalement due au Carbone  $^{14}\text{C}$  et surtout au Potassium  $^{40}\text{K}$  existant dans les tissus.

La radioactivité moyenne des algues résultant de la présence de Potassium  $^{40}\text{K}$  peut être de l'ordre de 74 Bq/kg à 111 Bq/kg.

## 2.2. L'origine artificielle

L'homme par ses activités industrielles a été la cause d'apparition de nouveaux radionucléides. Après la deuxième guerre mondiale, un apport continu de ce type de radionucléides dits « artificiels » présente un plus de radioactivité dans les compartiments de l'environnement.

En effet, Il est fréquent de séparer les **origines volontaires** de la présence de déchets radioactifs dans l'environnement (retombées des explosions nucléaires et rejets des déchets dans divers milieux) et les **origines involontaires** de ces polluants (liées à des incidents ou à des accidents) (Amiard et Amiard-Triquet, 1980).

## 2.2.1. Les origines volontaires

### 2.2.1.1 Tests d'armes nucléaires

Entre 1945 et 1965, cinq-cent-vingt (520) bombes atomiques ont été testées dont plus d'une centaine sur des îles ou des étendues d'eaux importantes (Amiard et Amiard-Triquet, 1980), et entre 1945 et 1990, environ 423 explosions nucléaires ont eu lieu dans l'atmosphère, libérant ainsi plusieurs radionucléides (Holm, 1994 in Arabi, 1997).

Ces essais nucléaires sont effectués principalement par les Etats-Unis, l'URSS, la Grande Bretagne, la France, l'Inde et la Chine.

Il existe deux types de bombes : les bombes A (à fission) et les bombes H ou bombes thermonucléaires (fission-fusion-fission) (Amiard-Triquet et Amiard, 1980) :

Les bombes atomiques « classiques » (A) mettent en jeu la fission d'une charge d'Uranium 235 ou de Plutonium 239. La puissance de ces bombes très faible au début (Hiroshima : 8 kt) atteint maintenant plus de cent fois une bombe unité (20 kt de TNT). L'explosion de ces bombes A libèrent une grande partie du combustible ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{239}\text{Pu}$ ) qui n'a pas réagi (environ 90% soit 10 kg ou 22.2 TBq pour une bombe unité) et des produits de fission (10%). Les neutrons émis lors de l'explosion induisent une radioactivité importante du milieu environnant (produit d'activation).

Une « bombe unité » libère environ un (1) kg de produits de fission, mélange complexe de deux cents radionucléides correspondant à trente-cinq (35) éléments différents. Les produits d'activation ne représentent en général que 25% de la radioactivité due aux produits de fission. Ils varieront selon le lieu de l'explosion (air, sous-marin, terre, souterrain).

Les bombes H : lors de l'explosion, les réactions de fission-fusion-fission s'y succèdent extrêmement rapidement. La quantité de produits de fission formée y est certainement proportionnelle à la puissance de l'engin, par contre, la quantité de produits d'activation doit être beaucoup plus importante que les bombes A.

La dispersion des aérosols radioactifs sera variable selon la puissance de l'engin, le lieu de l'explosion, le climat, la nature et la taille des débris. La contamination du milieu océanique sera directement influencée par les explosions sous marines (<0,1% de l'ensemble des explosions) et par les explosions à la surface des îles. La distribution de la radioactivité à la

suite d'une explosion sous marine dépend de la puissance de l'engin et de la profondeur où a lieu l'explosion (Amiard-Triquet et Amiard, 1980).

La radioactivité encore présente à l'échelle planétaire est donnée dans le tableau 2 (AIEA, 2005 in Noureddine, 2007).

**Tableau 2:** Quantité de radioactivité en PBq encore présente en 2000  
(AIEA, 2005 in Noureddine, 2007)

| Radionucléide     | Période (a) | Rejet global (PBq)* | Rapport de rejet par rapport au Sr-90 | Entrée à l'océan (PBq) | Inventaire de l'océan-2000 (PBq) |
|-------------------|-------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| $^3\text{H}$      | 12.33       | 186000              | 299                                   | 112693                 | 13300                            |
| $^{14}\text{C}$   | 5730        | 213                 | 0.3424                                | 129                    | 128                              |
| $^{90}\text{Sr}$  | 28.78       | 622                 | 1                                     | 377                    | 151                              |
| $^{137}\text{Cs}$ | 30.07       | 948                 | 1.52                                  | 603                    | 251                              |
| $^{239}\text{Pu}$ | 24110       | 6.52                | 0.0105                                | 4.00                   | 4.0                              |
| $^{240}\text{Pu}$ | 6563        | 4.35                | 0.007                                 | 2.6                    | 2.6                              |
| $^{241}\text{Pu}$ | 14.35       | 142                 | 0.2283                                | 86                     | 13.7                             |

(PBq)\* =  $10^{-12}$  Bq

La contamination due aux tests d'armes nucléaires est globale contrairement aux rejets d'effluents gazeux ou liquides qui est locale ou régionale, mais de niveau plus élevée (Noureddine, 2007).

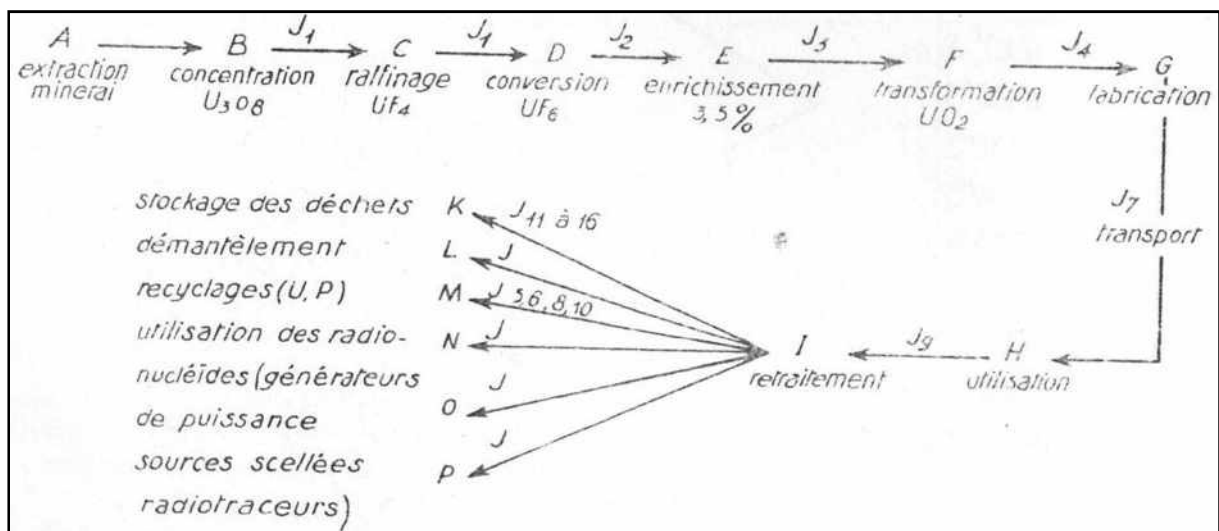
Dans les cas des explosions nucléaires, les radionucléides les plus importants et potentiellement les plus dangereux pour les organismes aquatiques éloignés du site d'essai sont le Strontium 90, le Césium 137, le Carbone 14, le Tritium et les Actinides sans toutefois négliger quelques produits d'activation ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ , etc.). Pour les organismes vivants ou séjournant à proximité du site d'essai et qui ont résisté aux effets thermique et de souffle, la liste des radionucléides ayant éventuellement une action néfaste est considérablement plus

longue puisqu'elle comprend les radio-isotopes à vie courte ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{Ba}$ ,  $^{131}\text{I}$ , etc.) (Amiard-Triquet et Amiard, 1980).

### 2.2.1.2. Installations nucléaires

Parmi ces installations, il y a les centrales nucléaires et les usines de traitement du combustible. Ces installations contribuent beaucoup dans l'apport en radioactivité artificielle à travers les rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux (Arabi, 1997).

L'utilisation de la fission nucléaire comme source d'énergie nécessite toute une série d'opérations industrielles dont l'ensemble forme le cycle de combustible nucléaire. La figure 4 montre le cas de cycle de combustible en vue de l'alimentation d'une centrale électronucléaire à eau légère.



**Figure 4:** Cycle du combustible nucléaire dans le cas de l'alimentation d'une centrale électrogène à eau légère (B.W.R ou P.W.R) (Amiard-Triquet et Amiard, 1980)

Chacune de ces étapes de combustible nucléaire produits des résidus industrielles et cause l'apparition à des degrés divers, des risques de pollution radioactive dans l'environnement aquatique (Amiard-Triquet et Amiard, 1980).

### 2.2.2. Les origines involontaires : les accidents nucléaires

Les accidents nucléaires sont peu nombreux, et parmi les plus importants du point de vue radiologique, on cite les cas suivants :

- **Accident de Windscale** : survenu le 8-12 Octobre 1957 en Grande Bretagne, montrant la radioactivité dégagée dans l'environnement, voir tableau 3.

**Tableau 3:** radioactivité artificielle dégagée dans l'environnement après l'accident

(Dunster, 1958, in Eisenbud, 1973 ; in Amiard et Amiard-Triquet, 1980)

| Radioélément      | Activité (Ci) |
|-------------------|---------------|
| $^{131}\text{I}$  | 20 000        |
| $^{137}\text{Cs}$ | 600           |
| $^{89}\text{Sr}$  | 80            |
| $^{90}\text{Sr}$  | 9             |

- **Accident de Tree Mile Island (TMI)**: survenu le 28 Mars 1979 aux U.S.A

Ces deux accidents ne présentent qu'un danger au niveau local (Noureddine, 2007).

- **L'Accident de Tchernobyl**: le 26 Avril 1986 à 1h23 en U.R.S.S. (Ukraine), a présenté un danger à travers l'Europe entière.

En plus de ces origines involontaires, s'ajoutent la radioactivité produite par les réacteurs électronucléaires embarqués et par les engins spatiaux équipés de réacteurs ou de générateurs radio-isotopiques (Amiard-Triquet et Amiard, 1980). Aussi certains accidents survenus lors des transports de matières radioactives par voie maritime, aérienne, par rail et surtout par route, ont entraîné la contamination locale de divers milieux aquatiques (Eisenbud, 1973 in Amiard-Triquet et Amiard, 1980).

Certaines activités humaines vont réintroduire dans l'environnement divers radionucléides naturels présents dans la lithosphère. Ce seront, par exemple, les usines de phosphates, les

centrales thermiques fonctionnant au charbon, les premières étapes du cycle du combustible nucléaire (mines, usines de concentration, etc.) (Amiard-Triquet et Amiard, 1980).

A cet effet, les radioéléments rejetés par les accidents et essais nucléaires sont résumés et comparés dans le tableau 4.

**Tableau 4:** Tableau comparatif des activités des principaux radioéléments rejetés par certains accidents et essais nucléaires (Paakola, 1989 in Arabi, 1997)

| Radionucléide     | Période  | Quantités radioactives libérées en (Bq.10 <sup>15</sup> ) |               |                      |                      |
|-------------------|----------|---|---------------|----------------------|----------------------|
|                   |          | Windscale<br>(1957)                                       | TMI<br>(1979) | Tchernobyl<br>(1986) | Essais<br>nucléaires |
| <sup>89</sup> Sr  | 50,5 j   | 0,00500   | -             | 80                   | 90,000               |
| <sup>90</sup> Sr  | 28,6 ans | 0,00022   | -             | 8                    | 600                  |
| <sup>131</sup> I  | 8,05 j   | 0,60000   | 0,00055       | 260                  | 700,000              |
| <sup>132</sup> Te | 78,2 j   | 12,00000  | -             | 48                   | 70,000               |
| <sup>133</sup> Xe | 5,25 j   | 0,00120   | 55,5          | 1700                 | 1900,000             |
| <sup>134</sup> Cs | 2,06 ans | 0,04600   | -             | 19                   | -                    |
| <sup>137</sup> Cs | 30,2 ans | -   | -             | 38                   | 960,000              |

### 2.2.3. Les formes des radionucléides artificiels

Les radionucléides rejetés peuvent être classés en trois catégories (Ancellin et al, 1979):

- 1. Les produits de fission** qui résultent de la cassure de radionucléides fissiles tels que l'Uranium (<sup>235</sup>U), (<sup>233</sup>U), le Plutonium 239. Ces produits de fission sont souvent des éléments radioactifs dont la masse atomique est plus ou moins voisine de 100. Certains se présentent en phase liquide (Cérium 144, Césium 137, Ruthénium 106, Zirconium 95, Strontium 90...) d'autres en phase gazeuse (Krypton, 1985 in Ancellin et al, 1979) ; certains peuvent être soit en phase gazeuse, soit en phase liquide (Iode <sup>131</sup>I, Iode <sup>129</sup>I). Ils se forment au sein même du combustible du réacteur – Uranium ou Plutonium – et

restent en principe localisés dans le cœur de ce réacteur jusqu'au moment où intervient le traitement du combustible ;

2. **Les produits d'activation** qui résultent du bombardement par les neutrons d'éléments stables présents dans les gains des combustibles, les circuits et enceintes des réacteurs, les fluides caloporteurs, etc. C'est par exemple le cas du fer  $^{50}\text{Fe}$ , du Cobalt  $^{60}\text{Co}$ , du Manganèse 54, du Zinc 65, du Tritium, etc. ;
3. **Les transuraniens**, essentiellement représentés par le Plutonium 238 et 239, l'Américium et le Curium.

Le tableau 5 résume les différentes formes de radioéléments artificiels.

**Tableau 5:** Principaux radionucléides artificielles (Kathren, 1984 in Arabi, 1997)

| Produits de fissions |                       | Produits d'activations |          | Transuraniens     |          |
|----------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|----------|
| Radionucléide        | Période               | Radionucléide          | Période  | Radionucléide     | Période  |
| $^{90}\text{Sr}$     | 28,6 ans              | $^{60}\text{Co}$       | 5,3 ans  | $^{238}\text{Pu}$ | 87,8 ans |
| $^{137}\text{Cs}$    | 30,2 ans              | $^{65}\text{Zn}$       | 244 j    | $^{240}\text{Pu}$ | 6537 ans |
| $^{89}\text{Sr}$     | 50,5 j                | $^{51}\text{Cr}$       | 28 j     | $^{241}\text{Pu}$ | 14,9 ans |
| $^{91}\text{Y}$      | 58,8 j                | $^{54}\text{Mn}$       | 312 j    | $^{241}\text{Am}$ | 433 ans  |
| $^{95}\text{Zr}$     | 64 j                  | $^{55}\text{Fe}$       | 2,7 ans  | $^{242}\text{Am}$ | 163 j    |
| $^{95}\text{Nb}$     | 35,2 j                | $^{59}\text{Fe}$       | 45 j     | $^{244}\text{Cm}$ | 18 ans   |
| $^{99}\text{Tc}$     | $2,1 \cdot 10^9$ ans  | $^{58}\text{Co}$       | 71 j     |                   |          |
| $^{103}\text{Ru}$    | 39,4 j                | $^{63}\text{Ni}$       | 100 ans  |                   |          |
| $^{106}\text{Ru}$    | 368 j                 | $^{110}\text{Ag}$      | 250 j    |                   |          |
| $^{125}\text{Sb}$    | 2,77 ans              | $^{134}\text{Cs}$      | 2,06 ans |                   |          |
| $^{131}\text{I}$     | 8,04 j                |                        |          |                   |          |
| $^{129}\text{I}$     | $1,57 \cdot 10^7$ ans |                        |          |                   |          |
| $^{136}\text{Cs}$    | 13 j                  |                        |          |                   |          |
| $^{140}\text{Br}$    | 12,8 j                |                        |          |                   |          |
| $^{141}\text{Ce}$    | 32,5 j                |                        |          |                   |          |
| $^{144}\text{Ce}$    | 285 j                 |                        |          |                   |          |
| $^{154}\text{Eu}$    | 8,5 ans               |                        |          |                   |          |
| $^{155}\text{Eu}$    | 4,96 ans              |                        |          |                   |          |

### **3. Voies de transfert de la radioactivité dans l'environnement**

Les radionucléides provenant de diverses sources sont transférés dans les différents compartiments de l'environnement (atmosphère, lithosphère, hydrosphère et biosphère) selon leurs comportements vis-à-vis des propriétés du milieu récepteur.

Les radionucléides sont soumis d'abord à des dispersions dans le milieu où ils se trouvent puis à des distributions dans des différents compartiments de l'environnement, et ils se présentent à l'état de gaz, de vapeur, de particules, d'aérosol et de matière en suspension (Noureddine, 2007).

Ces radionucléides atteignent l'environnement marin par deux voies (Kathren, 1984 in Noureddine, 2007):

#### **3.1. Voies de transfert atmosphérique**

Cette voie concerne essentiellement les aérosols provenant des retombées nucléaires, des rejets d'effluents gazeux, ainsi que les rayonnements naturels qui émanent du sol sous différentes formes (Noureddine, 2007).

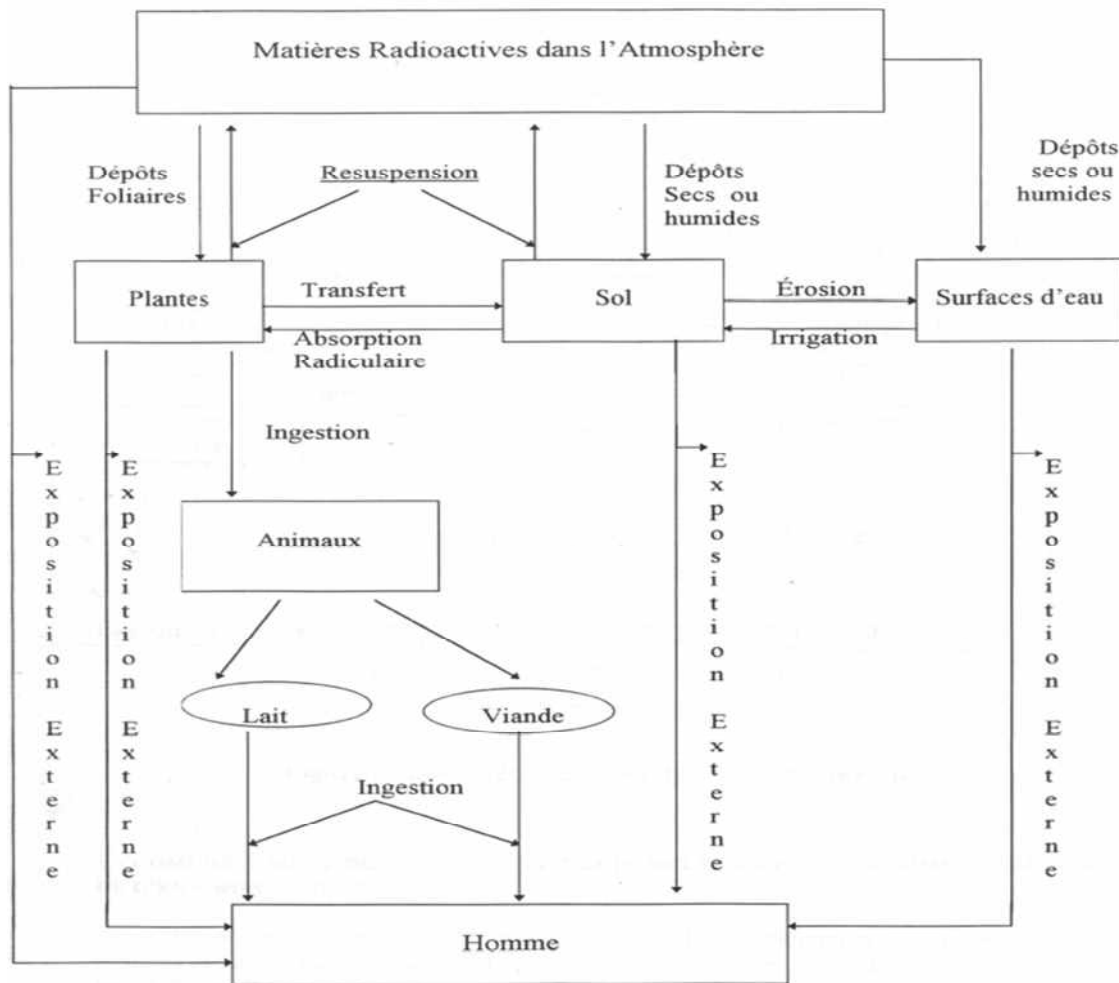
La dispersion et la diffusion sont deux processus fondamentaux régissant le transfert de ces matières radioactives dans l'atmosphère.

Les matières radioactives dispersées dans l'atmosphère se transfèrent vers les milieux terrestres et aquatiques par dépôt sec et humide.

Ce transfert dépend des conditions climatiques, la nature des sols et les propriétés physico-chimiques des radionucléides (IAEA, 1981 in Noureddine, 2007).

Les matières radioactives déposées au sol ont deux comportements ; elles peuvent rester fixées en surface ou introduites dans les couches sous-terraines pour arriver aux nappes phréatiques. Ainsi l'érosion des terres contenant des radionucléides entraîne leur transfert vers les eaux de surfaces adjacentes et par utilisation de ces eaux, les radionucléides sont retrouvés à nouveau dans le sol.

Les matières radioactives arrivées au sol peuvent se retrouver dans l'atmosphère par le processus de la remise en suspension, le tout est résumé dans la figure 5.



**Figure 5:** les différentes voies de transfert atmosphérique (Hammadi, 1996)

### 3.2. Voies de transfert aquatique

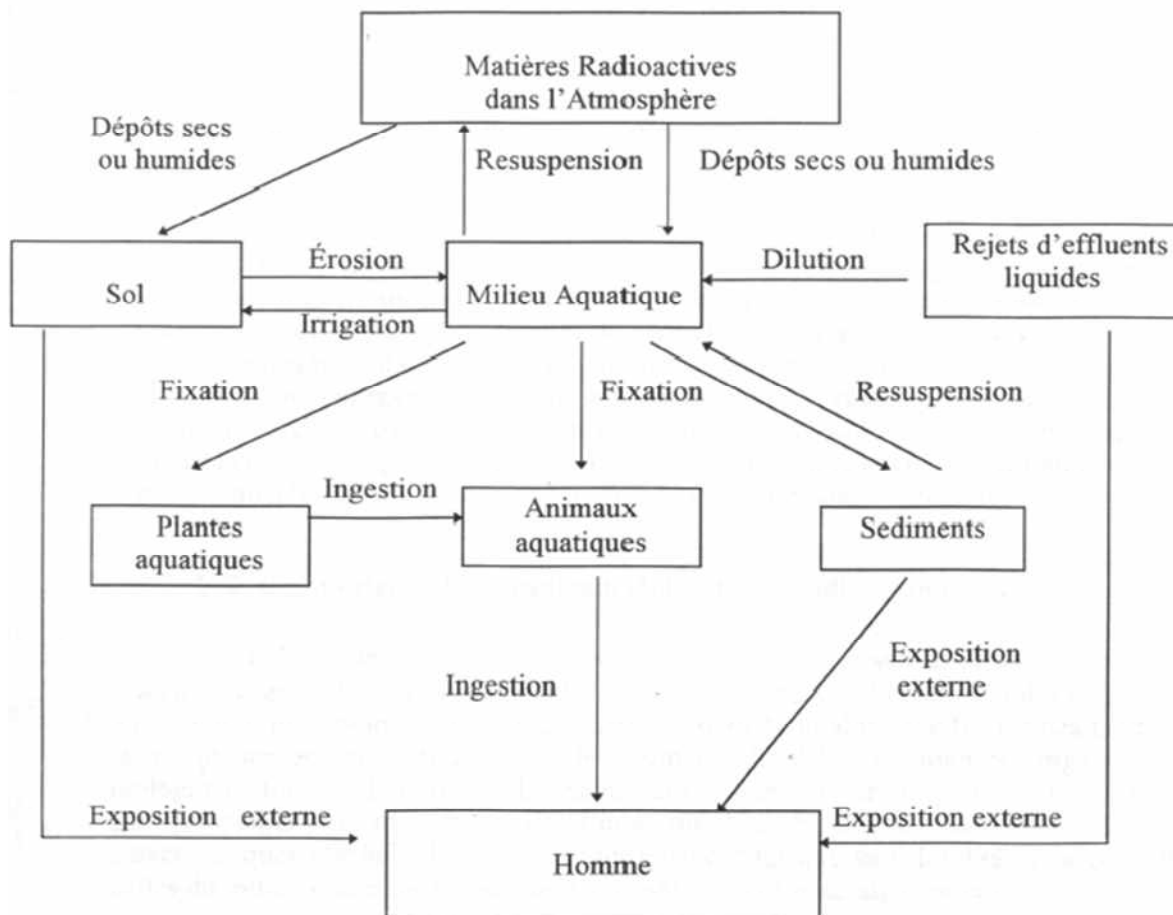
Les matières radioactives qui arrivent au milieu aquatique en provenance des retombées atmosphériques, du lessivage des sols et des rejets d'effluents liquides, vont transférer suivant deux types d'actions qui dépendent de la forme sous laquelle les radionucléides se présentent.

- les formes solubles : qui sont soumis à une action de dilution suivi d'une dispersion dans l'eau ;
- les formes insolubles : qui subissent une action de fixation sur les formes colloïdales, les matières organiques ou biologiques (plancton) finissent par la suite de se déposer au fond de l'eau par gravitation.

Ces propriétés sont essentielles pour le choix de l'échantillon à analyser, de la quantité à prélever, ainsi que des techniques de conditionnement et de préparation de l'échantillon.

Le transfert du milieu aquatique vers le sol et l'atmosphère se fait respectivement par les pratiques d'irrigation et le phénomène de remise en suspension des sédiments.

Pendant ces transferts, par ses deux voies (atmosphérique et aquatique), des matières radioactives peuvent passer dans la chaîne alimentaire et atteindre l'homme par la consommation d'animaux aquatiques ou d'eau potable contaminés. Il est atteint aussi par son exposition directe à la radioactivité (figure 5 et 6).



**Figure 6:** les différentes voies de transfert aquatique (Hammadi, 1996)

#### 4. Rappels de minéralogie<sup>1</sup>

Un minerai est une substance homogène, issue de réactions physico-chimiques naturelles et caractérisée par ses propriétés cristallographiques. Cette Définition très générale n'exclut ni les liquides, ni les gaz qui se rencontrent sur ou dans l'écorce terrestre. Toutefois, les minéraux, dans des conditions de pression et de température normales, sont habituellement solides. Ils se présentent sous deux états différents :

- L'état cristallin, caractérisé par la répétition régulière d'un motif élémentaire constitué d'atomes, d'ions ou de molécules ;
- L'état amorphe caractérisé par un désordre total dans la répartition des constituants.

On dit qu'un minéral est homogène quand il présente les mêmes propriétés physiques, structurales et chimiques en tout point. Il faut toutefois noter que l'on connaît quelques exceptions où la dureté, par exemple, varie suivant la direction.

Les minéraux prennent naissance, comme tout composé chimique, dans des conditions de pression et de température bien définies. Cela se fait à la suite de réactions entre solides, liquides et gaz présents dans un milieu naturel (milieu minéral ou organisme vivant).

Un minéral se définit par les huit principales propriétés qui suivent.

- a. Sa **cristallographie** définit le système cristallin auquel il appartient, son groupe spatial, le nombre minimal de molécules de sa maille élémentaire, ainsi que ses paramètres, ses raies de diffractions, ses macles (assemblage régulier de deux ou plusieurs individus cristallins de même nature).
- b. Ses propriétés physiques définissent sa dureté, sa densité, sa (ses) couleur (s), la couleur de sa trace, sa transparence, son éclat, ses plans de clivage, sa cassure, sa luminescence, sa phosphorescence, son ou ses indices de réfraction, l'angle des axes optiques, le signe optique.
- c. Ses propriétés chimiques fournissent sa composition donc sa formule, son comportement vis-à-vis des acides ou les solvants, sa fusibilité, et éventuellement les moyens de nettoyage.

---

<sup>1</sup> **Jean-Pierre ROUCAN, 1994**, Minéraux naturels, Traité Constantes physico-chimiques, Techniques de l'Ingénieur.

- d. Sa genèse et sa paragenèse<sup>1</sup> nous renseignés sur ses conditions de formation et surtout sur son environnement minéral.
- e. Son étymologie fait parfois référence à une de ses propriétés, mais aussi, le plus souvent au lieu de sa première découverte. Parfois, il est dédié à un minéralogiste ou à son inventeur.
- f. Il peut être intéressant de connaître ses principaux gisements car, il peut être abondant ici et rare ailleurs.
- g. Ses utilisations sont parfois importantes et peuvent faire de ce minéral un minéral.
- h. La liste des minéraux qui lui rassemblent permet d'éveiller l'attention et de ne pas se laisser abuser par une observation trop rapide.

De point de vue chimique, les minéraux sont soit des éléments ou corps simples, soit des composés plus ou moins complexes. Leur composition est tantôt fixe, tantôt variable à l'intérieur de limites bien définies : il y a alors une solution solide entre deux pôles extrêmes.

Il n'est pas rare que l'usage attribue des dénominations particulières pour des valeurs précises de la composition [comme chez les feldspaths plagioclasiques<sup>2</sup>].

Un minéral est aussi défini par l'arrangement géométrique périodique de ses atomes, sa structure cristalline.

---

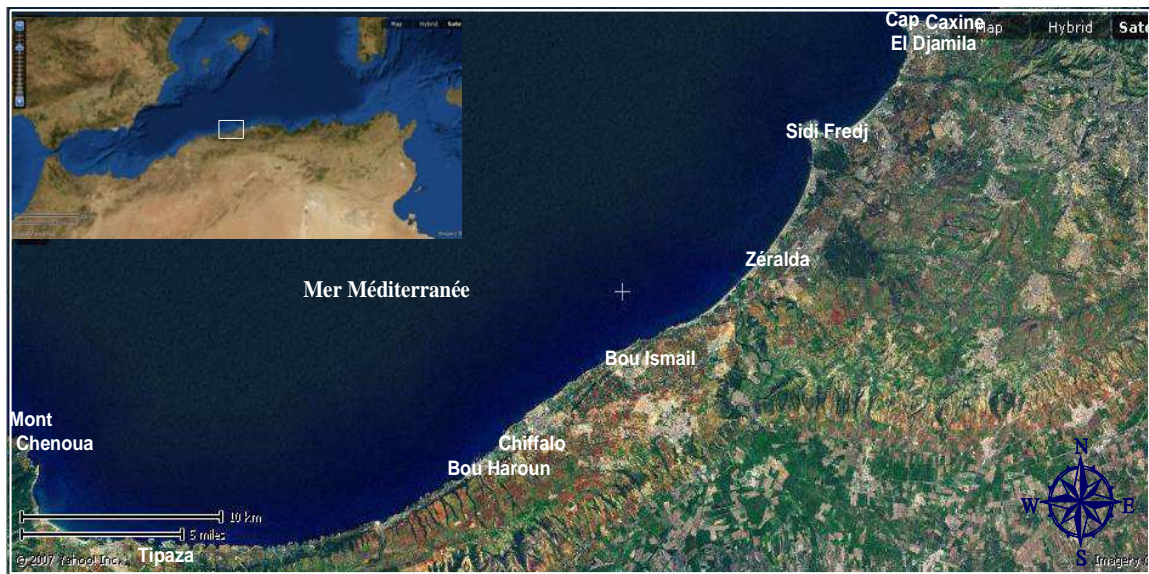
<sup>1</sup> Paragenèse : association de minéraux dans une roche donnée, présentant une communauté d'origine et résultant de processus géologiques et géochimiques donnés.

<sup>2</sup> Minéraux contenant du Calcium et du Sodium.

## CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### 1. Situation géographique

La baie de Bou-Ismaïl est située à l'Ouest d'Alger entre 2°20' E et 2° 55' E, d'une superficie de 342 km<sup>2</sup>, est délimitée à l'Ouest par le massif de Chenoua et à l'Est par le massif de La Bouzaréah. L'ouverture de la baie s'oriente selon un axe Nord-Ouest d'environ 40 km, voir figure 7.



**Figure 07:** Situation géographique de la baie de Bou-Ismaïl

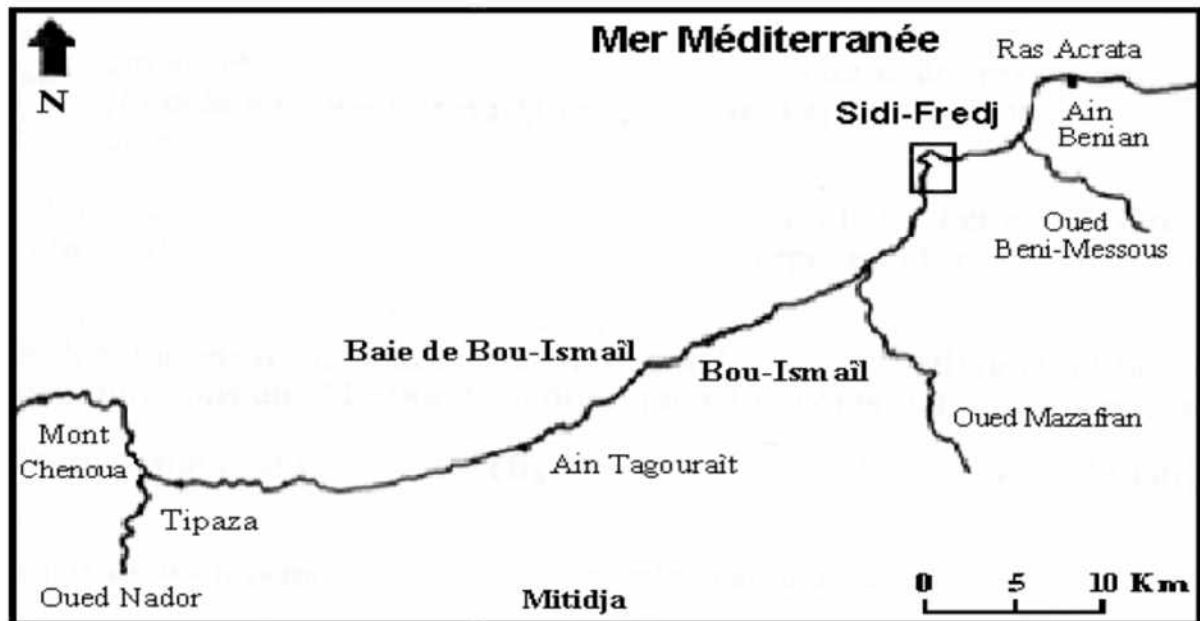
On peut diviser la baie de Bou-Ismaïl en quatre zones géographiques :

- **La baie d'El Djamila** : limitée à l'Est par Ras Acrata et à l'Ouest par la presqu'île de Sidi Fredj. Elle est caractérisée par une côte basse sableuse et de nombreuses formations dunaires ;
- **Le secteur de Sidi Fredj-Oued Mazafran** : environ 12 km de ce secteur sont des plages ;
- **Une côte rocheuse**, faisant suite au secteur ci-dessus, de 30 km de longueur, la limite à l'Ouest est Tipasa ;

- **La baie de Chenoua** où se jette l'oued Nador, elle est bordée dans sa partie Ouest par le massif du Chenoua. Tout le fond de cette baie est occupé par une plage de sables fins.

## 2. Le réseau hydrographique

Les principaux oueds qui se jettent en baie de Bou-Ismaïl sont : l'oued Nador dans la baie du Chenoua, l'oued Mazafran et l'oued de Beni-Messous en baie d'El Djamila (figure 08).



**Figure 08:** Réseau hydrographique de la baie de Bou-Ismaïl

- **Oued Mazafran:** Il possède un bassin versant de 1850 km<sup>2</sup>. Il rassemble trois oueds Chiffa, Djer et Bou-Roumi. Son embouchure est entre Douaouda et Zeralda. Le débit massique (solide) est de 1400 à 1800 tonnes/km<sup>2</sup>, tandis que le débit volumique (liquide) est vers 43,8 millions m<sup>3</sup>/an (Gruvel, 1961 in Houma, 2009). Ces apports dépendent du régime hydrologique de l'oued. Il est marqué par un long étiage de Juin au début de Décembre avec des débits représentant 17,38% du débit liquide annuel. Entre Décembre et Avril, ces débits représentent 82.61% du débit liquide annuel.
- **Oued Nador :** Son bassin versant est d'une superficie de 200 à 300 Km<sup>2</sup>, il Constitue la principale source d'apports solide et liquide dans la baie du Chenoua. Il prend naissance à

la jonction des oueds Bou Yersen, Bou Haroun, et oued Merad. Il débouche entre Mont Chenoua et Tipaza. Le débit liquide de cet oued est de 28 millions m<sup>3</sup>/an.

- **Oued de Beni Messous** : Se situe entre El Djamila et Club des Pins, au niveau d'une plage appelée « les dunes » qui fait partie de la baie d' El Djamila , cet oued traverse les communes de Beni Messous et Chéraga d'une longueur de 11.5 Km, ses eaux sont essentiellement des eaux usées domestiques et industrielles, avec un débit des oueds précédemment cités et estimé à 7.7 millions m<sup>3</sup> /an (0,245m<sup>3</sup>/s).

### 3. Cadre géomorphologique

La baie de Bou-Ismaïl est caractérisée par une morphologie côtière diversifiée, composées des côtes rocheuses et falaises, dunes et plages (Grimes, 2004; Grimes, 2003) :

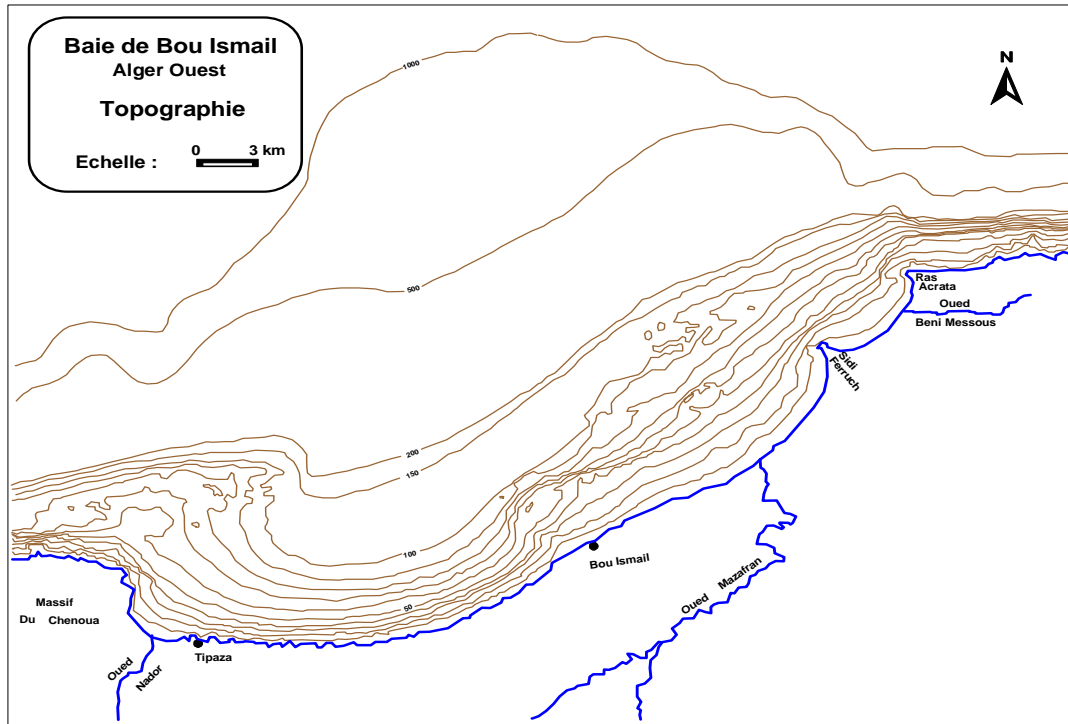
- **Les falaises** : à partir de Douaouda-Marine (vers le Mont Chenoua), c'est le début des zones rocheuses à falaises plus ou moins abruptes taillées dans des grès quaternaires assez friables et sensibles à l'érosion chimique de l'eau de mer (création de lapines)<sup>1</sup>. La falaise la plus importante dans la baie de Bou-Ismaïl est celle de Mont Chenoua qui est situé à l'Ouest de la commune du chef lieu de Tipasa ;
- **Les côtes rocheuses** : il s'agit de formes rocheuses localisées entre Tipasa (les anses) et Bou-Haroun (Rocher plat) ;
- **Les plages** : la baie de Bou-Ismaïl comprend 16 plages dont la plus développée est celle du Colonel Abbès (commune de Douaouda) qui s'étale sur une longueur de 3000m.
- **Les dunes** qui sont adossées aux plages.

#### 3.1.Morphologie sous marine de la baie de Bou-Ismaïl

Le plateau continental de la baie de Bou-Ismaïl présente une extension maximale de 11 km en face du Mazafran. Il est très étroit à proximité des massifs ; il est de 4 Km dans la zone du massif de Chenoua et est de moins de 2 Km dans la zone du massif de Bouzaréah (figure 09).

<sup>1</sup> Article « les grands traits morphologiques de la côte algérienne » Boutiba M (in Grimes, 2003)

La pente est douce avec présence de quelques appointements rocheux localisés au large, Sa déclivité augmente après la première rupture de pente (120 m de profondeur), marquant la limite de ce plateau, au-delà la décroissance est quasi-régulière avec une pente moyenne de plus de 10% menant aux plaines abyssales (2500 m de profondeur) (Leclaire, 1972) (figure 09).



**Figure 09** : Topographie de la baie de Bou-Ismaïl (Leclaire, 1972)

#### 4. Sédimentologie de la baie de Bou-Ismaïl

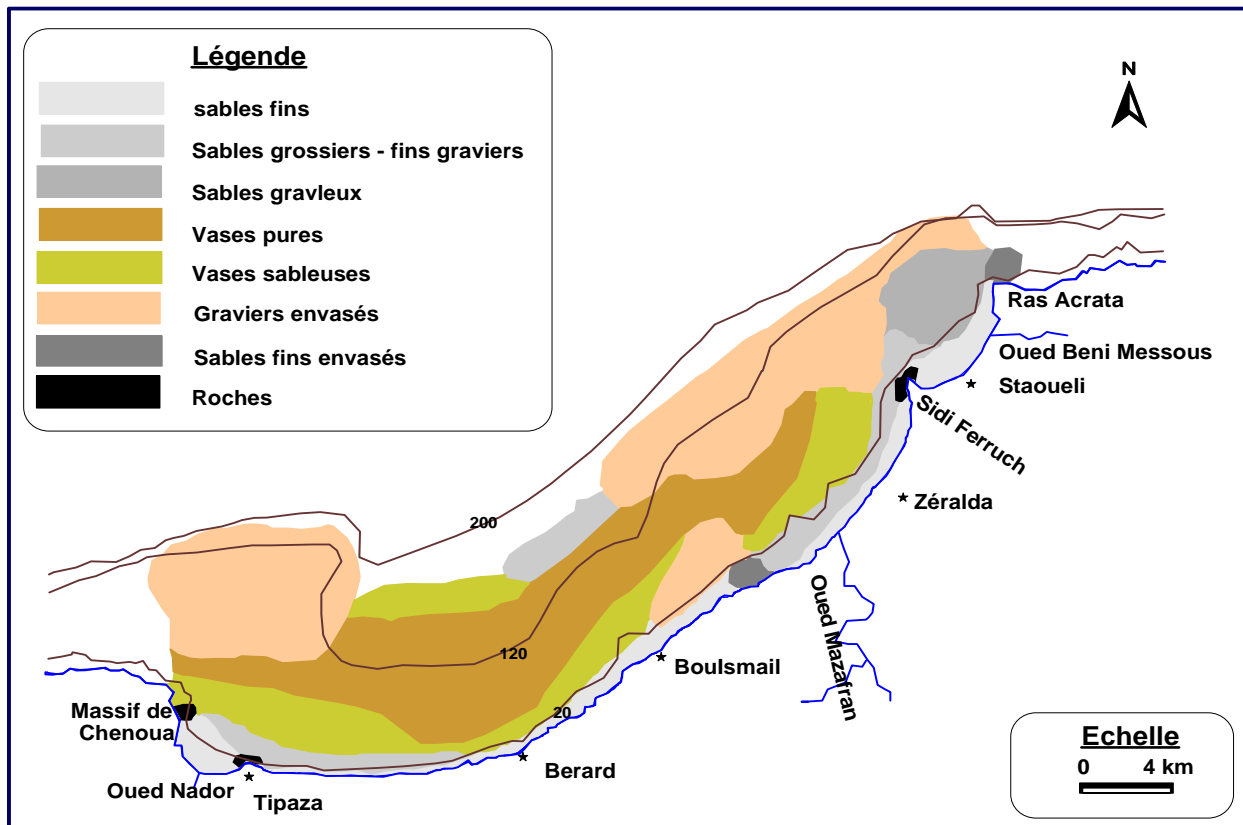
L'analyse des sédiments de la baie de Bou-Ismaïl montre une grande diversité sur le plan sédimentaire. En effet, neuf faciès identifiés : les sables fins, les sables fins envasés, les vases sableuses, les sables graveleux, les graviers envasés, les sables grossiers et fins graviers, les vases pures et le faciès rocheux (figure 10).

L'importance et la répartition de ces faciès ne sont pas identiques en tout point de la baie. Ainsi deux grandes régions « sédimentologiques » sont mis en évidence : la région Est ou orientale et la région Ouest ou occidentale. Chaque région présente des caractéristiques sédimentologies propres. Les vases pures sont très développées dans la région Ouest et forment ainsi une importante vase à littorale, tandis que les graviers envasés sont dans la

région Est. Le faciès des sables grossiers et des fins graviers, le faciès des sables graveleux n'est présent que dans la région orientale (**Leclaire, 1972**).

La dynamique sédimentaire dans la baie de Bou-Ismaïl est régie essentiellement par :

- La dérive littorale due aux houles du Nord-Ouest ;
- La dérive littorale due aux houles du Nord-Est ;
- Les houles du Nord-Est engendrent des courants qui vont reprendre les sédiments au large pour les déposer à proximité et à l'intérieure du port par la passe d'entrée orientée Nord-est (Mokrani, 1998).



**Figure 10** : Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM, 1998 in Houma, 2009)

## 5. Sources de pollution dans la baie de Bou-Ismaïl

Les activités anthropiques dans le littoral de la baie de Bou-Ismaïl entraînent divers types de pollution (figure 11). En effet, l'agriculture qui est bien développée dans la région peut

provoquer la pollution des nappes phréatiques sous-jacentes et les côtes riveraines par utilisation abusive des fertilisants.

Cette région connue aussi par un développement touristique balnéaire et un développement du tissu urbain, aussi les activités des unités industrielles installées près du littoral et les activités portuaires<sup>(2)</sup> contribuent à la pollution de la baie.

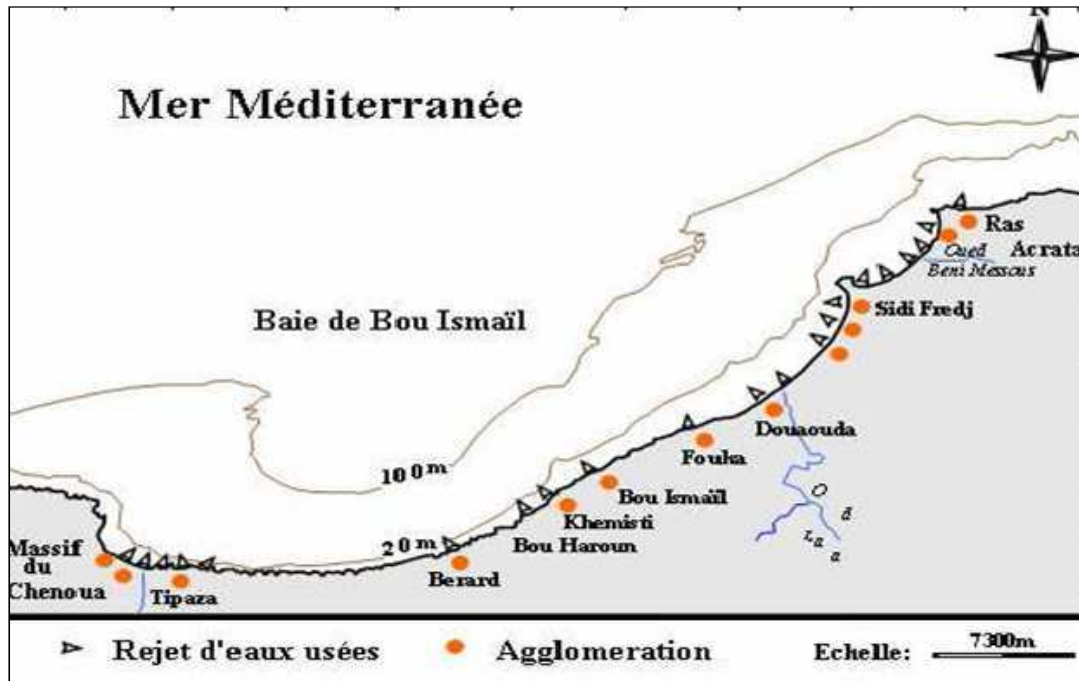


Figure 11 : Les principaux rejets dans la baie de Bou-Ismaïl , Grimes, 2004).

<sup>2</sup> Il y a cinq ports dans la baie de Bou-Ismaïl : port de Tipasa, port de Bou-Haroun, de Khemisti, d'El Djamila, et de Sidi-Fredj. Le port de Cherchell est situé hors de la baie.

## CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

### 1. Campagne d'échantillonnage et travaux à bord

Sur la base des objectifs recherchés dans ce travail, nous avons procédé au prélèvement de deux carottes en face de l'Oued Mazafran en baie de Bou-Ismaïl.

La mission en mer menée conjointement par l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL) et le Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) du Commissariat de l'Energie Atomique (COMENA) s'est déroulée le 12 et 13 Mai 2011 à bord du bateau «Baba Arroudj » de l'ENSSMAL.

#### 1.1. Prélèvement de sédiment

Deux carottes de sédiment ont été prélevées le long d'une radiale dans la baie de Bou-Ismaïl (Wilaya de Tipasa) à l'Ouest d'Alger (figure 12). La première carotte (C<sub>50</sub>) était prélevée le 12 Mai 2011 aux coordonnées 36°44'.000 Nord et 02°48'.094 Est, à la profondeur de 50 m, la longueur de cette carotte est de 22 cm. La deuxième (C<sub>30</sub>) est prélevée le 13 Mai 2011 aux coordonnées 36°43'.518 Nord et 02°47'.633 Est, à la profondeur de 30 m, sa longueur est de 15 cm (tableau 6).

Le bateau est équipé d'un GPS qui nous sert à déterminer le positionnement des stations de prélèvement, et un Echosondeur pour la détermination de la profondeur.

Le carottier utilisé est un carottier tube de type « UWITEC » de un mètre (01m) de longueur et de 8,5 cm de diamètre (figure 13), du CRNA.

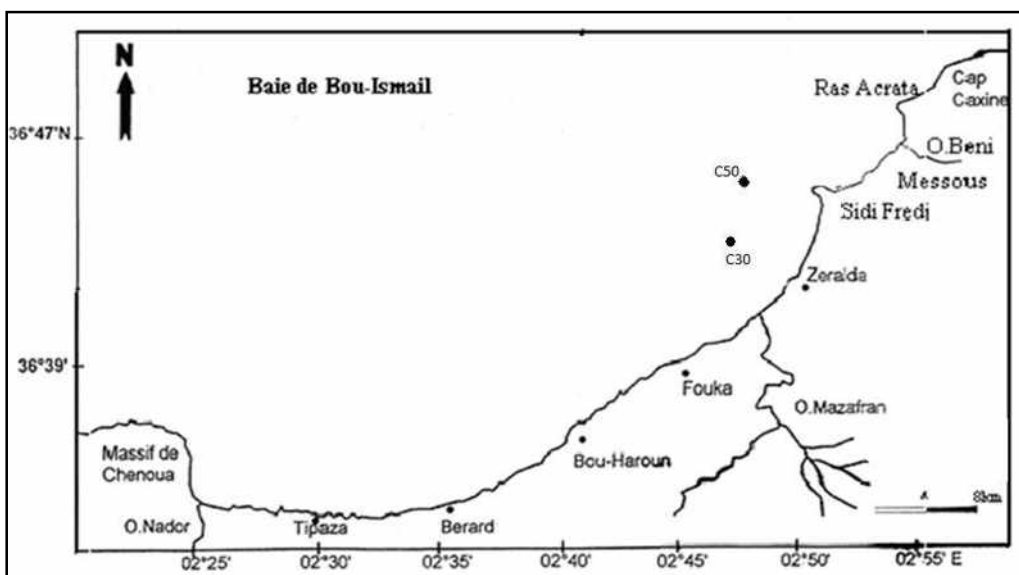
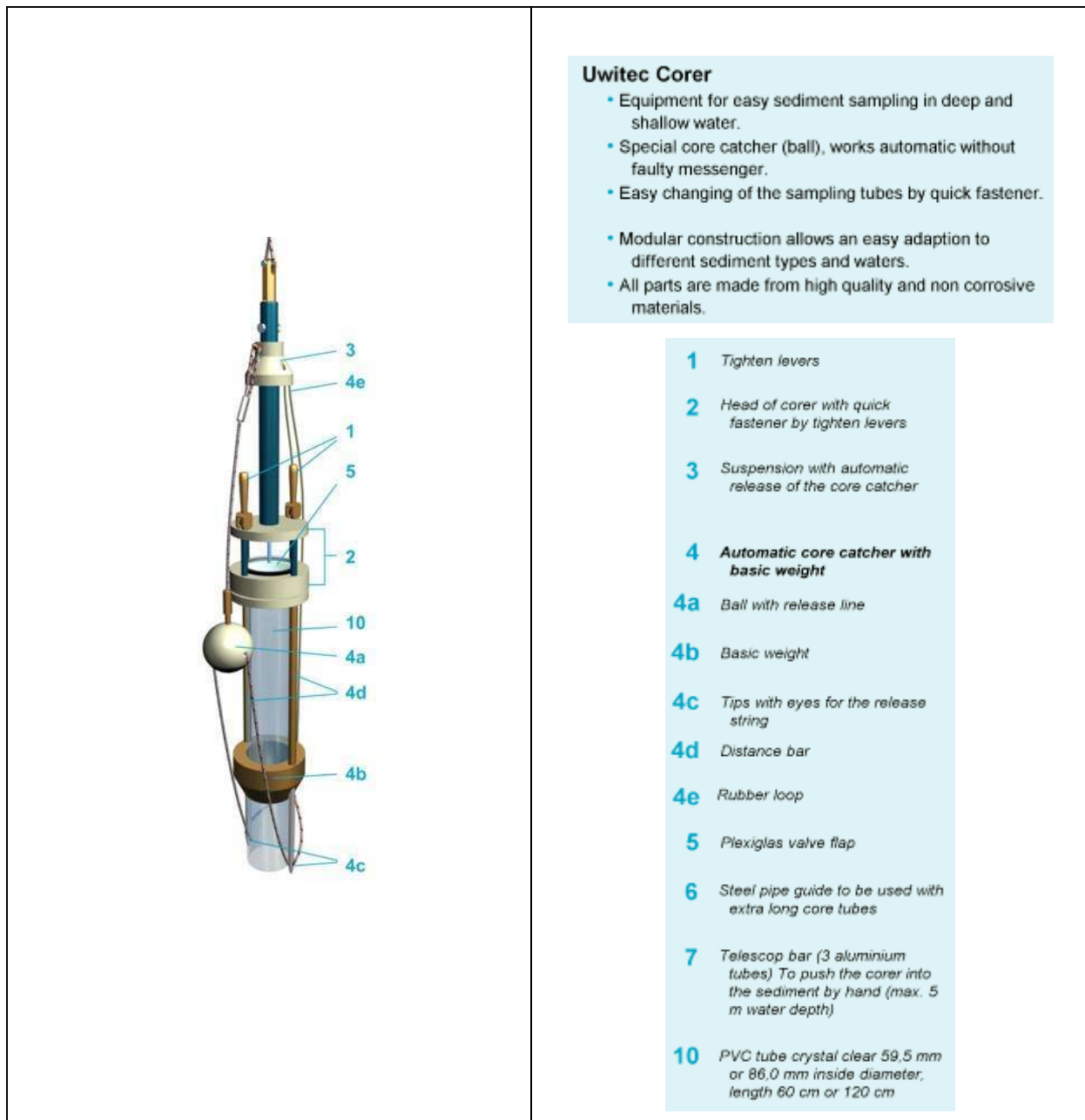


Figure 12: Carte de positionnement des stations de carottage

**Tableau 6:** Fiche de prélèvements des carottes

| Carotte         | Date de prélèvement | Lieu de prélèvement | Coordonnées géographiques    | Profondeur de prélèvement |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|
| C <sub>50</sub> | 12/05/2011          | Baie de Bou-Ismaïl  | N 36°44'.000<br>E 02°48'.094 | 50 m                      |
| C <sub>30</sub> | 13/05/2011          | Baie de Bou-Ismaïl  | N 36°43'.518<br>E02°47'.633  | 30 m                      |



**Figure 13:** Le Carottier UWITEC et ses accessoires utilisés dans le travail (équipement du laboratoire de sédimentologie du CRNA)

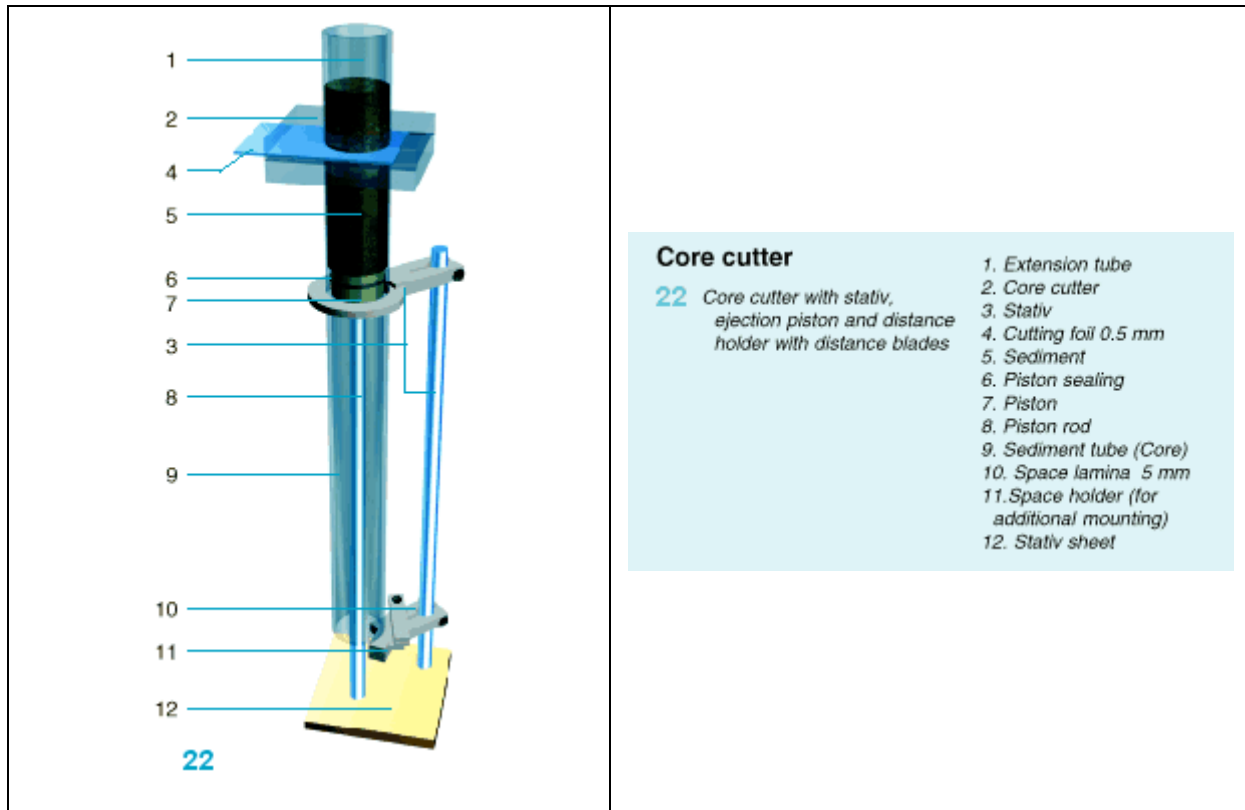
Les carottes ainsi prélevées sont conditionnées dans des tubes en PVC et laissées décantées, voir figure 14, pour pouvoir enlever le surnageant, ces tubes sont transférés au laboratoire des écosystèmes marins et littoraux de l'ENSSMAL à Sidi Fredj.



**Figure 14:** Les tubes PVC de conditionnement des carottes

Les deux carottes ainsi prélevées sont découpées en « couches » d'épaisseurs différentes, à l'aide d'un dispositif spécifique pour bien identifier l'activité précise des radioéléments recherchés et pour étudier la distribution de ces éléments en fonction de la profondeur (figure 15).

- Tranches de 0,5 cm d'épaisseur pour une profondeur allant de 0 à 1 cm ;
- Tranches de 1 cm d'épaisseur pour une profondeur allant de 1 à 10 cm sauf la couche C<sub>30-6cm</sub> qui est de 02 cm d'épaisseur à cause du gastéropode trouvé dans cette couche ;
- Tranches de 2 cm pour une profondeur allant de 10 cm vers la dernière couche.



**Figure 15 :** Matériels utilisés dans le découpage des carottes

Les échantillons (tranches) de chaque carotte sont conditionnés dans des sachets de congélation ensuite étiquetés et pesés à l'état humide (le poids humide ou le poids total).

## 2. Travaux réalisés au laboratoire

### 2.1. Préparation des échantillons

Les travaux au laboratoire des écosystèmes marins et littoraux de l'ENSSMAL à Sidi Fredj sont achevés et les échantillons sont transférés au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger pour faire la préparation « adéquate » des échantillons afin d'analyser au moyen de spectrométrie gamma pour les radioéléments d'intérêt et au moyen de fluorescence X et diffraction X pour identifier les constituants chimiques et minéralogiques de ces carottes.

En effet, chaque aliquote (échantillon) est séché à l'étuve en 60°C, pesé au moyen d'une balance, et broyé à l'aide d'un mortier pour rendre le sédiment sous forme de poudre.

Pour l'analyse en Spectrométrie gamma, les échantillons ainsi préparés sont conditionnés dans des boîtes étanches (boîtes spécifiques) et laissés pendant 21 jours pour que l'équilibre séculaire entre le  $^{226}\text{Ra}$  et ses descendants soit atteinte.

Dès que l'équilibre séculaire est atteint, chaque boîte est passée à une analyse, pendant 48h à 72h parfois plus, par Spectrométrie Gamma au Laboratoire d'Etudes d'Impacts Radiologiques de la Direction de l'Environnement, de la Sûreté, et des Déchets Radioactifs du CRNA.

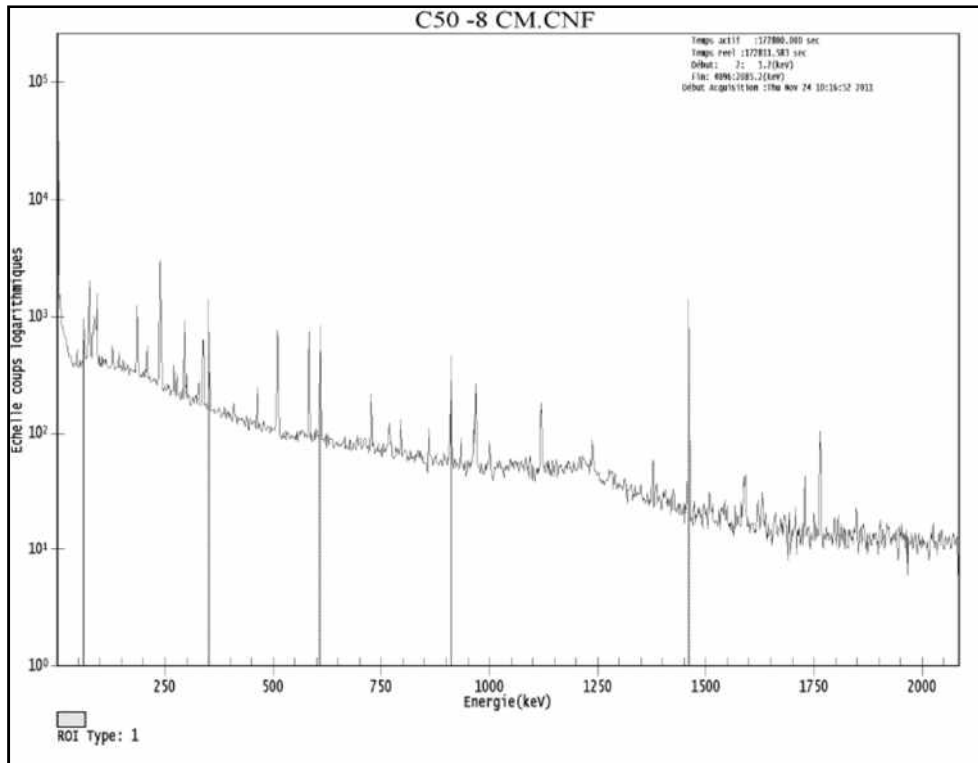
## **2.2. Analyse par la spectrométrie gamma**

### **2.2.1. Principe**

La spectrométrie gamma est une méthode relativement simple qui permet de détecter plusieurs radionucléides émetteurs de rayonnement gamma dans une variété d'échantillons donnés.

Elle présente un intérêt par sa nature non destructive et sa simplicité de mise en œuvre (Le Petit et Granier, 2002).

Un spectre de raies émis dans un échantillon est converti par un spectromètre en une combinaison de pics et de composantes continues constituant le fond. Tant que les pics sont visibles, ils peuvent être utilisés pour déterminer les énergies et le nombre de photons incidents, mais si les pics sont noyés dans une composante continue, il n'est plus possible d'accéder à ces informations (Le Petit et Granier, 2002). Le rayonnement gamma, est émis avec une ou plusieurs énergies bien déterminées et référencées dans une bibliothèque de données nucléaires, et recueillis par un détecteur. La mesure donne un spectre de raies (exemple figure 16) où l'amplitude est proportionnelle à l'activité du radionucléide et l'emplacement sur l'axe des abscisses indique l'énergie du radionucléide (Noureddine, 2007).



**Figure 16:** Exemple d'un spectre de rayonnement gamma : spectre de l'échantillon C<sub>50-8cm</sub> de la première carotte.

En effet, la préparation et l'utilisation des échantillons standards, ayant les mêmes conditions que l'échantillon à analyser, est indispensable pour une quantification fiable des radioéléments émetteurs gamma.

## 2.2.2. Appareillage

La chaîne de spectrométrie gamma est constituée essentiellement de (figure 17) :

### 2.2.2.1. Le détecteur germanium hyper pur (Ge HP) ;

Le choix d'un type de détecteur est fonction des objectifs du laboratoire, type planaire pour les mesures de basses énergies (généralement <200 keV), type coaxial pour des mesures à moyenne et haute énergie (>200 keV). En spectrométrie gamma de détecteur GeHP, le signal détecté dans le cristal peut provenir du rayonnement gamma issu de l'échantillon, du milieu environnant, des matériaux constituant le détecteur (Le Petit et Granier, 2002).

### 2.2.2.2. Alimentation Haute -Tension

La haute tension (dynamique de 0 à  $\pm 5$  ou  $\pm 6$  kV) permet de polariser le semi-conducteur afin d'obtenir une zone désertée dans le cristal GeHP (Le Petit et Granier, 2002).

### 2.2.2.3. Alimentation Basse -Tension

Elle fournit les basses tensions continues ( $\pm 6$ ,  $\pm 12$ , et  $\pm 24$  V) nécessaires à la polarisation des autres éléments de la chaîne électronique (Le Petit et Granier, 2002).

### 2.2.2.4. Le Préamplificateur ;

Le rôle du préamplificateur est de fournir une impulsion de tension qui peut être traitée par l'amplificateur à partir des charges collectées sur les électrodes du détecteur. Le préamplificateur est en général placé à proximité du cristal de germanium<sup>1</sup> sous le même capot ; de cette manière les composants sensibles à la température sont refroidis et le bruit thermique généré par ces composants est minimisé (Le Petit et Granier, 2002).

### 2.2.2.5. L'Amplificateur

L'amplificateur porte l'impulsion fournie par le préamplificateur à plusieurs volts sous une forme quasi gaussienne qui permettra au codeur de quantifier très précisément sa hauteur. De plus, il permet de filtrer bon nombre de parasites de fréquences élevées. Ainsi, les principales caractéristiques d'un amplificateur sont (Le Petit et Granier, 2002):

- La valeur du gain maximal en tension ;
- La plage de réglage des filtres (constante dans le temps) ;
- La dynamique du signal de sortie (amplitude maximale) ;
- Le temps de restitution de la valeur du gain en cas de surcharge du signal d'entrée.

### 2.2.2.6. Le codeur (ou convertisseur) analogique-numérique

La conversion de la crête d'une impulsion en une valeur numérique se fait à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN). Cette valeur est l'adresse à laquelle l'électronique d'acquisition incrémentera le contenu d'un canal de l'analyseur. Les principales caractéristiques d'un CAN sont (Le Petit et Granier, 2002):

- Le domaine de mesure (0 – 5 V ou 0 – 10 V) ;
- Le nombre de pas de conversion (4096, 8192 ou 16384) ;

---

<sup>1</sup> Le cristal de germanium se trouve dans une enceinte qu'on appelle « capot », ce capot est généralement réalisé en aluminium, d'épaisseur conventionnelle comprise entre 0,3 et 1 mm (Le Petit et Granier, 2002).

- La linéarité intégrale et différentielle ;
- Le temps de conversion (temps mort<sup>2</sup>).

### 2.2.2.7. Le système d'acquisition

C'est à ce niveau que « s'élabore » le spectre qui sera ensuite analysé.

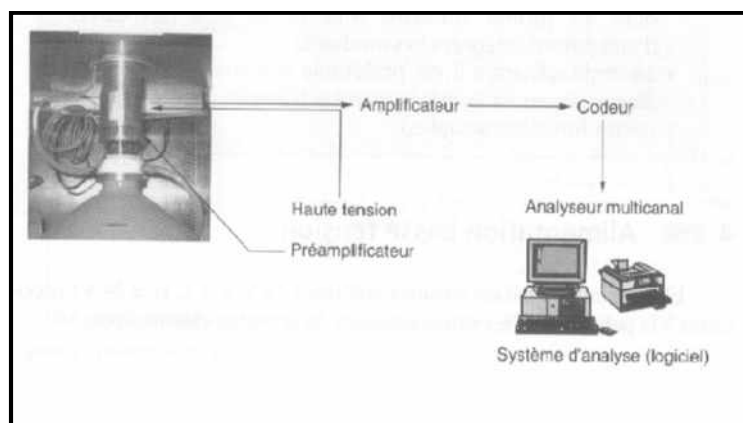
**A. L'électronique d'acquisition (analyseur multicanaux)** qui transmet les données à un ordinateur distant.

**B. Le système d'analyse de spectre (logiciel)**

L'analyseur fait appel à un logiciel dont les fonctions sont (Le Petit et Granier, 2002):

- La gestion des acquisitions ;
- La mesure des paramètres de la chaîne de spectrométrie (résolution, énergie, rendement) ;
- La localisation de pics de l'absorption totale ;
- Le calcul de l'abscisse et de la surface de chaque pic ;
- La prise en compte de facteurs correctifs spécifiques à une mesure donnée (décroissance depuis le prélèvement, décroissance durant le temps de comptage, correction d'atténuation, correction de sommation) ;
- Le calcul d'activité des radioéléments détectés à partir d'une table contenant les données nucléaires, compte tenu des paramètres propres à l'échantillon (masse, géométrie de mesure).

Un blindage approprié en Plomb entoure généralement le système de détection pour réduire la contribution du bruit de fond ambiant (Le Petit et Granier, 2002 ; Nouredine, 2007).

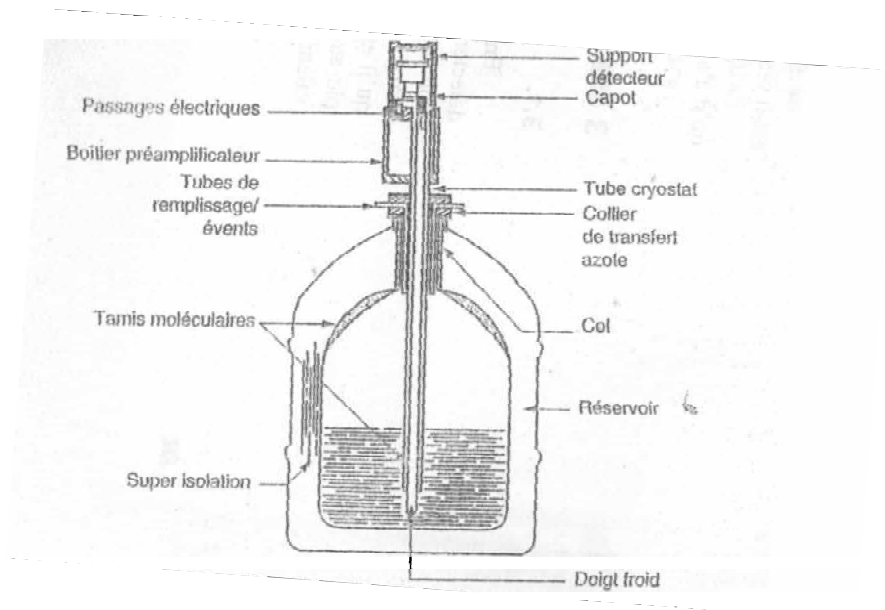


**Figure 17:** Synoptique d'une chaîne de spectrométrie Gamma (Le Petit et Granier, 2002)

<sup>2</sup> Le temps mort : c'est le temps nécessaire au codage durant lequel le codeur ne peut accepter d'autres impulsions (Le Petit et Granier, 2002).

Les détecteurs utilisés sont de Germanium hyper pur (Ge HP) de type coaxial n ou p, d'efficacité déterminée au 2<sup>ème</sup> pic du <sup>60</sup>Co. Chaque détecteur est monté sur un cryostat alimenté en azote liquide pour un refroidissement à 77 K, et le tout est placé dans un château en Plomb de 10 mm d'épaisseur, recouvert à l'intérieur d'une plaque de cuivre de 2 mm d'épaisseur. Le détecteur est alimenté par une haute tension 0-6 kV, le préamplificateur est monté sur le détecteur alimenté par un amplificateur linéaire conventionnel qui amplifie les impulsions en leur donnant une forme gaussienne. Le système de traitement est constitué d'un analyseur multicanaux avec un minimum de 4096 canaux (Noureddine, 2007).

Le refroidissement de la chaîne de comptage est assuré à l'aide d'une canne plongeante généralement dans un réservoir d'azote liquide (Dewar) à 77 K, son enceinte supérieure en cuivre constitue un point froid situé à l'intérieure du capot et à proximité du cristal (figure 18) (Le Petit et Granier, 2002).



**Figure 18:** Détecteur GeHP avec le cryostat et le réservoir à azote (production catalogue, Canberra)  
(Le Petit et Granier, 2002)

Pour le refroidissement de la chaîne de comptage, une dépolarisation de cette chaîne est impérative. Lors de la polarisation à nouveau de la chaîne, il est nécessaire de calibrer celle-ci en énergie. Cette calibration nécessite des sources étalons couvrant la gamme d'énergie d'intérêt de 30 keV à 2000 keV. Il s'agit des sources d'<sup>241</sup>Am, de <sup>137</sup>Cs et de <sup>60</sup>Co. La

calibration en énergie, partie essentielle pour l'identification des pics d'énergie, est exprimée par une équation linéaire :

$$E(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (14)$$

Où  $x$  et  $E(x)$  représentent respectivement le numéro du canal et l'énergie du pic considéré, les  $a_i$  étant des coefficients à déterminer (Bicheron, 1995 in Noureddine, 2007).

L'aptitude d'un détecteur à produire un pic à une énergie donnée est caractérisée par la largeur du pic (résolution) et le rendement de comptage dans le pic. Ces deux paramètres sont les paramètres fondamentaux d'un détecteur pour la spectrométrie gamma. Pour des mesures d'environnement où l'on cherche des faibles niveaux de radioactivité, le niveau du bruit de fond est aussi une caractéristique essentielle de la sensibilité du système de mesure (Le Petit et Garnier, 2002).

### 2.2.3. Résolution en énergie

La résolution en énergie, qui reflète la largeur à mi-hauteur des pics, est fixée par (Le Petit et Granier, 2002):

- Les fluctuations statistiques dans le processus de production des charges ;
- Les défauts de la collection des charges ;
- Le bruit électronique.

La résolution en énergie d'un détecteur est exprimée par l'intermédiaire de la largeur totale à mi-hauteur (LTMH). Pour une distribution gaussienne, la LTMH est égale (Le Petit et Granier, 2002):

$$LTMH = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \quad (15)$$

$\sigma$ : l'écart-type de la distribution.

Si  $(LTMH)_s$  est la contribution des fluctuations statistiques à la largeur totale à mi-hauteur des pics,  $(LTMH)_c$  la contribution des défauts de la collection des charges et  $(LTMH)_e$  la contribution du bruit électronique, alors la largeur totale  $(LTMH)_t$  à mi-hauteur d'un pic s'écrit (Le Petit et Granier, 2002) :

$$(LTMH)_t = \sqrt{(LTMH)_s^2 + (LTMH)_c^2 + (LTMH)_e^2} \quad (16)$$

La résolution en énergie est définie par la largeur de l'impulsion à mi-hauteur et dépend du type de détecteur ainsi que de l'énergie considérée. Elle est souvent exprimée en pourcentage (Noureddine , 2007).

$$R(\%) = \frac{LTMH}{H} \times 100 \quad (17)$$

LTMH : Largeur totale à mi-hauteur

H : Hauteur de l'impulsion

#### 2.2.4. Efficacités de détection

L'efficacité est définie comme étant le rapport entre le nombre de photons mesuré dans le spectre et celui présent dans l'échantillon, et donné par l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Nombre de photons mesurés dans le spectre}}{\text{Nombre de photons émis de l'échantillon}} \quad (18)$$

La calibration en efficacité permet d'établir la relation entre la surface d'un pic et l'activité du nucléide, généralement connue, produisant le pic :

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot I \cdot t} \quad (19)$$

Où :

$\varepsilon$  : efficacité d'absorption totale (%) pour l'énergie E ;

A : activité (Bq) ;

N : comptage du pic (en nombre d'impulsion) ;

I (%) : l'intensité d'émission absolue de la raie  $\gamma$  considérée d'énergie E de ce nucléide ;

t : durée du comptage (en seconde).

L'efficacité du système dépend de plusieurs paramètres, notamment l'énergie du photon, la nature et la géométrie du flacon utilisé, les dimensions du détecteur, la distance source - détecteur, le blindage ainsi que les matériaux entourant la chaîne de spectrométrie gamma.

### 2.2.5. Calcul du rendement de détection

Pour le calcul des rendements de détection **du détecteur 3**, pour chaque masse d'échantillon, deux échantillons standards ont été préparés en utilisant un échantillon de sédiment **traité** (collecté lors de la campagne de 2001 par Nouredine et al) et des sources radioactives liquides d' $^{152}\text{Eu}$  et de  $^{133}\text{Ba}$ .

Chaque échantillon standard a été contaminé séparément par l' $^{152}\text{Eu}$  et de  $^{133}\text{Ba}$ , d'une façon homogène, par couche de 50 g jusqu'à 200 g. les énergies des émetteurs gamma de l' $^{152}\text{Eu}$  et du  $^{133}\text{Ba}$  sont données dans le tableau 7 ci-dessous.

**Tableau 7:** Pics d'énergie des radioéléments émetteurs gamma avec leur probabilité d'émission pour l'Eu-152 et le Ba-133 (Debertin, 1988)

|                   | Pic d'énergie en keV<br>(probabilité d'émission en %) |                 |                |                 |                 |                 |                 |
|-------------------|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                   | $^{152}\text{Eu}$                                     | 121.8<br>(28.4) | 244.7<br>(7.5) | 344.3<br>(26.5) | 444.9<br>(3.1)  | 778.9<br>(12.9) | 964<br>(14.6)   |
| $^{133}\text{Ba}$ | 53.2<br>(2.2)   | 79.6<br>(2.6)   | 81.0<br>(34.1) | 276.4<br>(7.2)  | 302.8<br>(18.3) | 356<br>(62.0)   | 383.85<br>(8.9) |

L'activité totale d' $^{152}\text{Eu}$  et de  $^{133}\text{Ba}$ , injectée séparément dans chacun des deux standards est de 1256 Bq et 1850 Bq, respectivement.

Après comptage des deux échantillons standards (flacon en contact avec le détecteur) et obtention des courbes d'efficacité séparées ( $^{152}\text{Eu}$  et  $^{133}\text{Ba}$ ), et dans le but de couvrir toute la gamme d'énergie d'intérêt et particulièrement la partie des faibles énergies, il a été procédé à une combinaison des deux courbes d'efficacité ( $^{152}\text{Eu}$  et  $^{133}\text{Ba}$ ) pour obtenir à l'aide du logiciel de traitement Génie 2000 une seule courbe d'efficacité ( $^{152}\text{Eu} + ^{133}\text{Ba}$ ).

Le comptage a été fait pour chaque radioélément et pour chaque couche de 50 g durant l'opération de contamination.

Les valeurs de rendement de détection correspondantes aux radioéléments ont été calculées en se basant sur les équations déterminées à partir de courbes d'efficacités tracées par le logiciel de traitement et d'analyse du signal, Génie 2000 de la spectrométrie gamma.

### Equation pour 50 g

Pour les basses énergies (0 à 200 keV)

$$\ln(Eff) = -1.677e^{+001} + 6.338e^{+000} * \ln(E) - 6.969e^{-001} * \ln(E)^2 \quad (20)$$

Pour les énergies >200 keV

$$\ln(Eff) = 9.677e^{+001} - 3.731e^{-001} * \ln(E) - 6.729e^{-002} * \ln(E)^2 - 2.246e^{-004} * \ln(E)^3 \quad (21)$$

### Equation pour 100 g

Pour les basses énergies (0 à 200 keV)

$$\ln(Eff) = -2.513e^{+001} + 1.019e^{+001} * \ln(E) - 1.147e^{+000} * \ln(E)^2 \quad (22)$$

Pour les énergies >200 keV

$$\ln(Eff) = -5.223e^{+000} + 2.810e^{+000} * \ln(E) - 6.293e^{-001} * \ln(E)^2 + 3.256e^{-002} * \ln(E)^3 \quad (23)$$

### Equation pour 150 g

Pour les basses énergies (0 à 200 keV)

$$\ln(Eff) = -2.807e^{+001} + 1.138e^{+001} * \ln(E) - 1.274e^{-000} * \ln(E)^2 \quad (24)$$

Pour les énergies >200 keV

$$\ln(Eff) = -2.134e^{+001} + 1.092e^{+001} * \ln(E) - 1.982e^{+000} * \ln(E)^2 + 1.0703e^{-001} * \ln(E)^3 \quad (25)$$

### Equation pour 200 g

Pour les basses énergies (0 à 200 keV)

$$\ln(Eff) = -2.885e^{+001} + 1.162e^{+001} * \ln(E) - 1.295e^{+000} * \ln(E)^2 \quad (26)$$

Pour les énergies >200 keV

$$\ln(\text{Eff}) = -1.397e^{+001} + 7.231.092e^{+000} * \ln(E) - 1.389e^{+000} * \ln(E)^2 + 7.555e^{-002} * \ln(E)^3 \quad (27)$$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 8 pour les différents couches de 50 g, 100 g, 150 g et 200 g.

**Tableau 8: Rendements de détection des différentes masses.**

|               | Eff (%) – 50 g | Eff (%) – 100 g | Eff (%) – 150 g | Eff (%) – 200 g |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Pb-210</b> | 6.47 ± 0.30    | 5.46 ± 0.10     | 4.30 ± 0.07     | 3.60 ± 0.06     |
| <b>U-238</b>  | 8.57 ± 0.20    | 7.47 ± 0.20     | 6.22 ± 0.10     | 5.31 ± 0.10     |
| <b>Pb-212</b> | 4.71 ± 0.09    | 3.48 ± 0.05     | 3.24 ± 0.05     | 2.70 ± 0.03     |
| <b>Pb-214</b> | 2.84 ± 0.06    | 2.20 ± 0.03     | 2.01 ± 0.02     | 1.68 ± 0.02     |
| <b>Bi-214</b> | 1.32 ± 0.03    | 1.12 ± 0.02     | 0.98 ± 0.02     | 0.83 ± 0.01     |
| <b>Cs-137</b> | 1.18 ± 0.03    | 1.01 ± 0.02     | 0.88 ± 0.02     | 0.75 ± 0.01     |
| <b>Ac-238</b> | 0.78 ± 0.02    | 0.68 ± 0.01     | 0.59 ± 0.01     | 0.51 ± 0.01     |
| <b>K-40</b>   | 0.50 ± 0.02    | 0.38 ± 0.01     | 0.35 ± 0.01     | 0.31 ± 0.01     |

Les échantillons analysés ayant des masses qui varient entre 0 - 50 g, 50 - 100 g, 100 - 150 g et 150 - 200 g, nous avons été obligé d'établir une relation entre le rendement de détection et la masse de l'échantillon pour chaque radioélément d'intérêt par une équation linéaire de première degré :

Pour le Pb-210 : Eff (%) = - 0.0195 x + 7.396 ;

Pour le U-238 : Eff (%) = - 0.022 x + 9.6475 ;

Pour le Pb-212 : Eff (%) = -0.0125x + 5.098 ;

Pour le Pb-214 : Eff (%) = -0.074x + 3.1 ;

Pour le Bi-214 : Eff (%) = -0.0032x + 1.4566 ;

Pour le Cs-137 : Eff (%) = -0.0028x + 1.304 ;

Pour le Ac-228 : Eff (%) = - 0.0018x + 0.867 ;

Pour le K-40 : Eff (%) = -0.0012x + 0.5327 ;

Les valeurs des rendements de détection de chaque radioélément de tous les échantillons sont présentées dans les annexes.

Pour le calcul des rendements de détection **du détecteur 2** pour chaque masse d'échantillon, nous avons procédé à préparer un échantillon standard en utilisant un échantillon de sédiment propre (collecté à partir du barrage de Taksebt en 2012) et une source radioactive liquides d' $^{152}\text{Eu}$ .

Les énergies des émetteurs gamma de l' $^{152}\text{Eu}$  sont données dans le tableau 9 ci-dessous.

**Tableau9:** Pics d'énergie des radioéléments émetteurs gamma pour l'Eu-152 (Debertin,1988)

| Les Onze pics d'énergie en keV |       |       |        |        |        |       |
|--------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| $^{152}\text{Eu}$              | 121,8 | 244,7 | 344,3  | 411,3  | 444    | 778,9 |
|                                | 867,4 | 964   | 1085,8 | 1112,1 | 1408,1 |       |

La préparation de l'échantillon standard était faite en injectant 3 ml de la source d' $^{152}\text{Eu}$  dans un flacon homogène contenant 50 g de sol propre et broyé de Taksebt et ensuite on passe l'échantillon contaminé au comptage par spectrométrie gamma. L'activité totale d' $^{152}\text{Eu}$  injectée est de 1256 Bq à 15/11/1995.

Après un temps de comptage considérable, on fait sortir le nombre de coups dans chaque pic de l' $^{152}\text{Eu}$  et on calcul l'efficacité en utilisant l'**équation 19** de ce chapitre.

Après cette étape, on dresse une courbe d'efficacité d' $^{152}\text{Eu}$  en fonction de leurs énergies et on obtient une équation de puissance très importante.

A partir de cette équation, on change leur X par les différentes énergies des radioéléments d'intérêt et on trouve finalement l'efficacité de chacun de ces radioéléments.

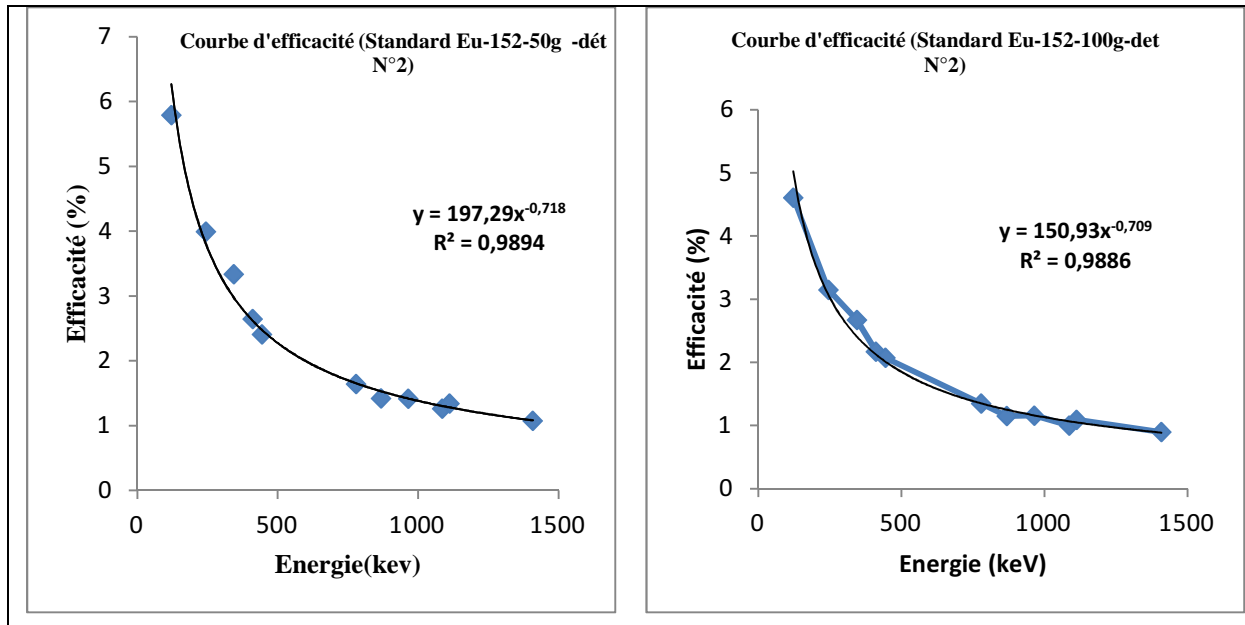
Pour le 100 g, on ajoutant 50 g de sol pulvérisé broyé du Taksebt et on le contaminant d'une manière homogène aussi et on refait le comptage et le calcul de l'efficacité d' $^{152}\text{Eu}$  et enfin on obtient nos efficacités pour chaque radioélément d'intérêt. On opère de la même manière pour les 150 et les 200 g.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 10 et la figure 19, pour les différentes couches de 50 g, 100 g, 150 g et 200 g.

**Tableau 10:** Rendements de détection des différentes masses du standard

|               | Eff(%)-50g | Eff(%)-100g | Eff(%)-150g | Eff(%)-200g |
|---------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Pb-210</b> | 5,40460081 | 4,84402985  | 3,4461738   | 3,02228224  |
| <b>U-238</b>  | 6,82543978 | 6,34850746  | 4,69130999  | 4,17758271  |
| <b>Pb-212</b> | 4,04353213 | 3,26828509  | 2,66184385  | 2,32659175  |
| <b>Pb-214</b> | 3,06866324 | 2,48997939  | 2,02795538  | 1,7863682   |
| <b>Bi-214</b> | 2,07814944 | 1,69553756  | 1,38092489  | 1,22984642  |
| <b>Cs-137</b> | 1,96012654 | 1,6005616   | 1,30357204  | 1,16286994  |
| <b>Ac-228</b> | 1,5617626  | 1,2793607   | 1,04197104  | 0,93547281  |
| <b>K-40</b>   | 1,11698533 | 0,91933905  | 0,74875261  | 0,6786008   |

Pour les masses d'échantillons qui sont incluses dans l'un des intervalles suivants [0-50 g], [50-100 g], [100-150 g], [150-200 g] on procède à une interpolation.



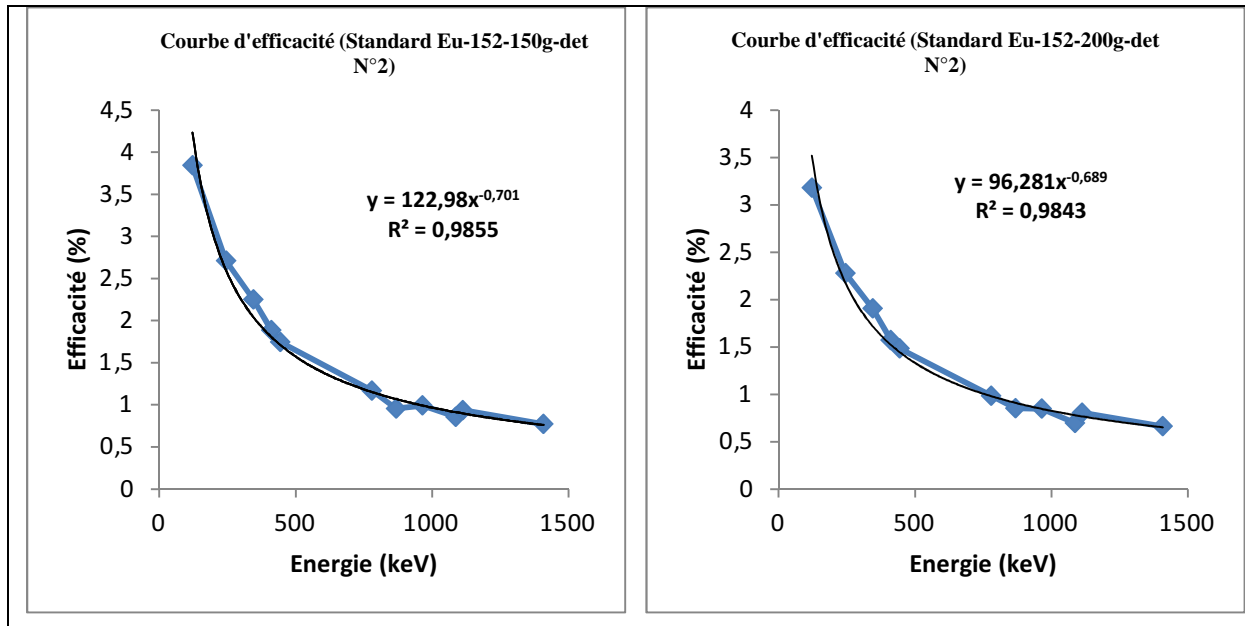


Figure 19 : Courbes d'efficacités du Standard de sol préparé pour le détecteur 2

Les valeurs des rendements de détection de chaque radioélément de tous les échantillons sont présentées dans les annexes.

### 2.2.6. Bruit de fond

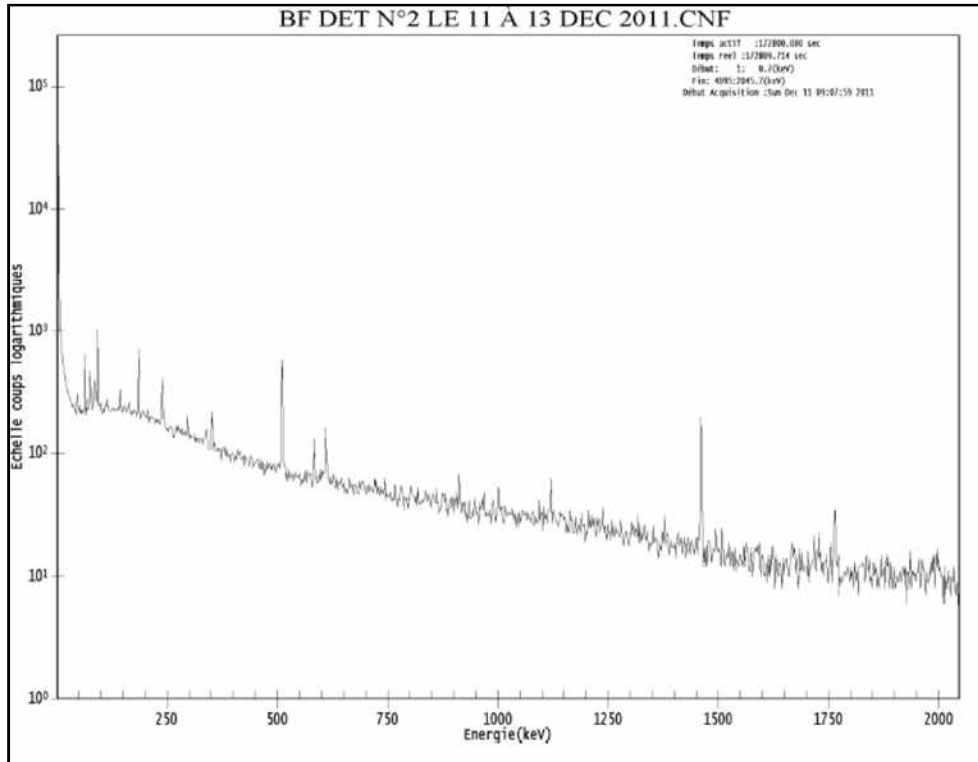
Le bruit de fond est le comptage ou l'enregistrement d'un spectre dans des conditions normales d'utilisation de la chaîne de mesure en l'absence de la source dont on veut mesurer le rayonnement. La connaissance de ce bruit de fond est utile pour améliorer la justesse des résultats de mesure de l'activité, notamment dans le cas des traces (Le Petit et Granier, 2002).

Les composantes du bruit de fond ont essentiellement pour origine le rayonnement cosmique, la radioactivité primordiale et éventuellement la radioactivité artificielle qui est présente dans les matériaux constituant le spectromètre ou dans son environnement immédiat (Le Petit et Granier, 2002).

Il est donc fondamental d'optimiser la protection du spectromètre gamma au regard de la nature du rayonnement ambiant et des interactions possibles de ce rayonnement. Pour diminuer la contribution du bruit de fond, on peut amener à sélectionner des matériaux constituant le détecteur et le blindage (Le Petit et Granier, 2002).

Le spectre mesuré représente le rayonnement absorbé dans le détecteur. Il est constitué de la superposition du spectre produit par le rayonnement gamma issu de l'échantillon analysé et de

la contribution de la radioactivité ambiante apportée par différentes composantes du bruit de fond. Pour le calcul de l'activité, il est nécessaire de soustraire la contribution du bruit de fond dans le pic et d'en tenir compte dans le calcul d'incertitude global, voir figure 20.



**Figure 20:** Spectre de comptage d'un bruit de fond du détecteur N° 2 pendant deux jours.

### 2.2.7. Calcul d'activité

Pour le calcul d'activité on considère toujours le radioélément ayant la probabilité d'émission ou le taux de branchement le plus important, dans le but d'avoir une meilleure statistique de comptage et par conséquent un résultat fiable.

Les énergies en keV correspondant aux radioéléments d'intérêt déterminés dans ce travail ainsi les intensités de ces radioéléments (cités par Debertain, 1988) sont présentées dans le tableau 11 ci-dessous.

$$A = \frac{(Nr.C)}{(\varepsilon.I.m.t)} \quad (28)$$

Où :

$N_r = N_{\text{net}} - N_{\text{BF}}$  : est le comptage réel en coups (cps) ;

$I$  : est la probabilité d'émission en pourcentage (%) ;

$m$  : est la masse en gramme (g) de l'échantillon à analyser ;

$t$  : est le temps de comptage en seconde (s) ;

$C$  : représente les différents termes correctifs (facteurs de décroissance radioactive, correction d'atténuation, correction de coïncidences).

L'incertitude absolue sur l'activité est donnée par :

$$\frac{\sigma A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma N_r}{N_r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t}{t}\right)^2} \quad (29)$$

Avec :

$$\sigma N = \sqrt{N} \quad (30)$$

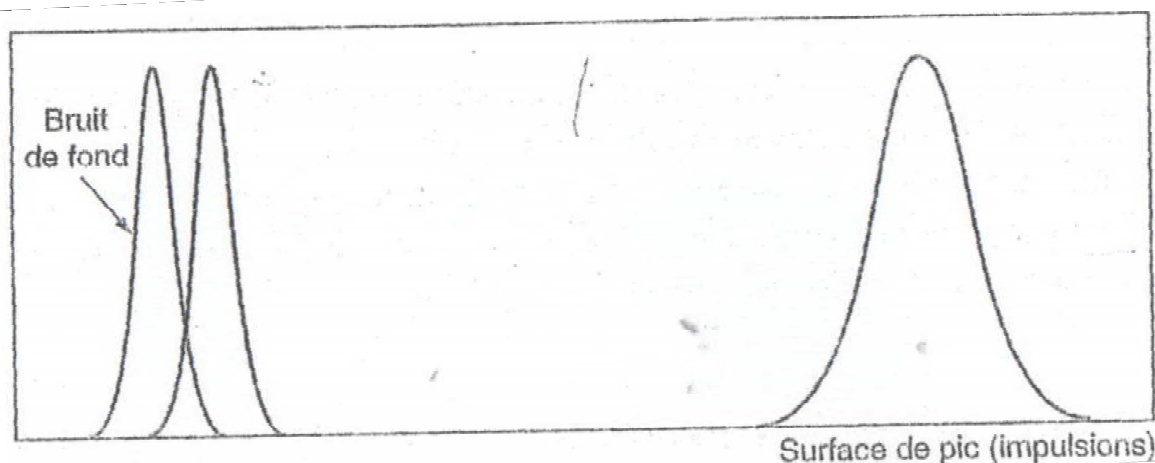
**Tableau 11:** Les énergies en keV correspondant aux radioéléments d'intérêt déterminés dans ce travail (Debertin, 1988)

| Radioéléments     | Energie (keV) | Intensité (%) |
|-------------------|---------------|---------------|
| $^{210}\text{Pb}$ | 46.6          | 4.24          |
| $^{238}\text{U}$  | 63.4          | 3.8           |
| $^{212}\text{Pb}$ | 238.6         | 43.5          |
| $^{214}\text{Pb}$ | 351.9         | 35.1          |
| $^{214}\text{Bi}$ | 609.3         | 44.6          |
| $^{137}\text{Cs}$ | 661.6         | 85.2          |
| $^{228}\text{Ac}$ | 911.1         | 26.6          |
| $^{40}\text{K}$   | 1460.8        | 10.7          |

Les résultats sont présentés dans le chapitre « Résultats et Discussion »

### 2.2.8. Limite de détection

Dans le cas d'une mesure unique d'un échantillon de faible activité, la mesure peut donner un résultat au niveau du bruit de fond. La figure 21 illustre ce problème : pour une activité importante, le détecteur délivre un nombre d'impulsion excédant largement le bruit de fond qui est soustrait du résultat pour le calcul de l'activité. En revanche, le cas d'une activité faible est plus délicat car les fluctuations statistiques du signal et du bruit de fond « brouillent la carte », même dans le cas où la valeur moyenne du signal est au-dessus de la valeur moyenne du bruit de fond. Pour les mesures de bas niveau, comme pour les mesures de l'environnement, le critère décisif est la limite de détection (Le Petit et Granier, 2002).



**Figure 21:** Distribution des nombres d'impulsions et de bruit de fond observés après un nombre infini de mesures de même durée  $t$  (Le Petit et Granier, 2002).

La limite de détection ou activité minimale détectable (AMD) permet d'exprimer la sensibilité d'un système donné qu'on peut atteindre sous certaines conditions de travail. Elle dépend de plusieurs paramètres, dont les plus importants sont (Noureddine, 2007) :

- Les caractéristiques du détecteur (résolution, efficacité) ;
- La radioactivité ambiante (bruit de fond du détecteur, sources externes...) ;
- La géométrie du flacon et la position de l'échantillon par rapport au détecteur ;
- La qualification du personnel ;
- L'assurance de la qualité des résultats.

La limite de détection est calculée à partir du pic correspondant à chaque élément dans les échantillons.

$$L_D = 4,66 \sqrt{N_{BF}} / \varepsilon . I . t . m \quad (31)$$

m est la masse de l'échantillon à analyser

Les résultats sont présentés dans le chapitre « Résultats et Discussion »

### 2.3. Evaluation de la vitesse de sédimentation

Pour distinguer un horizon ancien d'un autre plus récent, il faut soit y reconnaître un vieillissement (information *continue* dans le temps), soit y détecter la présence d'un marqueur qui a disparu (information événementielle) (Bonté, 2006).

Plusieurs radionucléides peuvent être utilisés comme traceur pour l'étude des processus marins, dont la sédimentation, parmi ces radionucléides le plomb 210 et le césium 137.

#### 2.3.1. Evaluation de la vitesse de sédimentation au moyen du $^{210}\text{Pb}$

L'activité du  $^{210}\text{Pb}$  dans le sédiment est composée de l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  provenant de l'apport atmosphérique et du  $^{210}\text{Pb}$  issu de la décroissance in situ du  $^{226}\text{Ra}$ .

$$^{210}\text{Pb}_{total} = ^{210}\text{Pb}_{excès} + ^{226}\text{Ra} \quad (32)$$

Si on tient compte de la décroissance radioactive, l'activité spécifique à une profondeur donnée (x) et à un temps donnée (t), s'exprime par l'équation 10 du chapitre premier.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

Où :

$A_0$  : est l'activité spécifique en surface du sédiment ;

t : est le temps écoulé pour se retrouver à la profondeur (x) ;

$\lambda$  : est la constante de désintégration du  $^{210}\text{Pb}$  ( $= 0,0311 \text{ a}^{-1}$ ).

Pour une sédimentation constante, la distribution du  $^{210}\text{Pb}_{total}$  le long de la carotte de sédiment montre une décroissance en profondeur, en accord avec la décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}$ ,

jusqu'à disparition du  $^{210}\text{Pb}$  d'origine atmosphérique. Il ne reste plus que celui produits in situ. Cette distribution verticale peut être perturbée par plusieurs processus qui peuvent rendre plus compliquée l'évaluation de la datation, notamment les phénomènes de diffusion, de bioturbation, de remobilisation et de granulométrie (Matiscoff, 1987 in Nouredine, 2007).

Pour la détermination du taux de sédimentation au moyen du plomb 210, deux modèles mathématiques principales sont utilisés dans le milieu marin : Le premier modèle s'appelle « Constant Rate Supply » ou le CRS, et le deuxième s'appelle « Constant Initial Concentration » ou le CIC (Appleby, 1983)

Dans le premier modèle on suppose un apport de  $^{210}\text{Pb}$  de l'atmosphère constant dans le temps, fournissant un apport constant au sédiment, indépendamment de tout changement lié au taux de sédimentation. Ce dernier peut varier selon qu'il y a une dilution ou une concentration du  $^{210}\text{Pb}$ . Dans le modèle CRS, l'activité A du  $^{210}\text{Pb}$  cumulée, en dessous du sédiment à une profondeur (x) est calculée à partir de l'équation (Nouredine, 2007) :

$$t = \frac{1}{\lambda} \text{Ln} \frac{A_0}{A} \quad (33)$$

Dans le deuxième modèle, on suppose une concentration initiale en  $^{210}\text{Pb}$  constante, indépendamment de tout changement dans le taux de sédimentation. Autrement dit, l'activité au niveau de l'interface eau-sédiment est toujours la même (Allen, 1993).

Dans ce modèle CIC, le contenu du  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  (C) est donné par l'équation :

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t} \quad (34)$$

Où  $C_0$  est le contenu du  $^{210}\text{Pb}$  au niveau de l'interface eau-sédiment et l'âge du sédiment sera alors donné par :

$$t = \frac{1}{\lambda} \text{Ln} \frac{C_0}{C} \quad (35)$$

Où :

t : est le temps écoulé pour se retrouver à la profondeur (x) ;

$\lambda$  : est la constante de désintégration du  $^{210}\text{Pb}$  ( $= 0,0311 \text{ a}^{-1}$ ).

La datation par la méthode du plomb 210 est limitée aux dépôts de sédiments sur une durée comprise entre 120 et 150 ans (Appleby, 1992).

### **2.3.2. Evaluation de la vitesse de sédimentation au moyen du $^{137}\text{Cs}$**

Pour évaluer les intervalles de temps (information événementielle), on dispose des retombées de  $^{137}\text{Cs}$  des essais thermonucléaires, dont on connaît très bien le calendrier, entre 1954 et 1970 avec un pic en 1963 et aussi de l'apport par l'accident de Tchernobyl, en Avril 1986. La quantité de  $^{137}\text{Cs}$  dans le sédiment et son profil de répartition en fonction de la profondeur dans le sol dépendra donc de l'histoire du site depuis les années 60 (Bonté, 2006).

La distance au niveau du profil qui sépare les deux pics de 1963 et 1986 permet le calcul du taux de sédimentation moyen.

Cette méthode de datation permet aussi la validation de la chronologie du  $^{210}\text{Pb}$  dans une colonne de sédiment (Anna DI Laura, 2004, Radakovitch, 1999 in Nouredine, 2007).

### **2.4. Analyse par spectromètre d'émission des rayons X (Fluorescence X)**

Depuis 1895, date de la découverte du rayonnement X par W. Röntgen, les nombreuses travaux concernant aussi bien l'émission de ce rayonnement que son interaction avec la matière ont conduit au développement de puissantes méthodes d'analyse, utilisables en laboratoire de recherche ou de contrôle, et même dans certain cas in situ. La diffusion des rayons X par la matière permet, notamment par l'observation de phénomènes d'interférence (diffraction), de connaître l'organisation interne de celle-ci, et d'étudier la structure des cristaux et des molécules (Despujols, 2000).

On appelle Rayon X les radiations électromagnétiques comprise entre 0.1 et 0.5Å. Le domaine de ces rayons recouvre celui des rayons gamma mais avec une grande différence dans la production des rayons gamma et de rayons X ; L'émission de rayons gamma est fait depuis le noyau de l'atome tandis que les rayons X viennent des processus qui se produisent dans les orbitales des électrons (Centre SPIN).

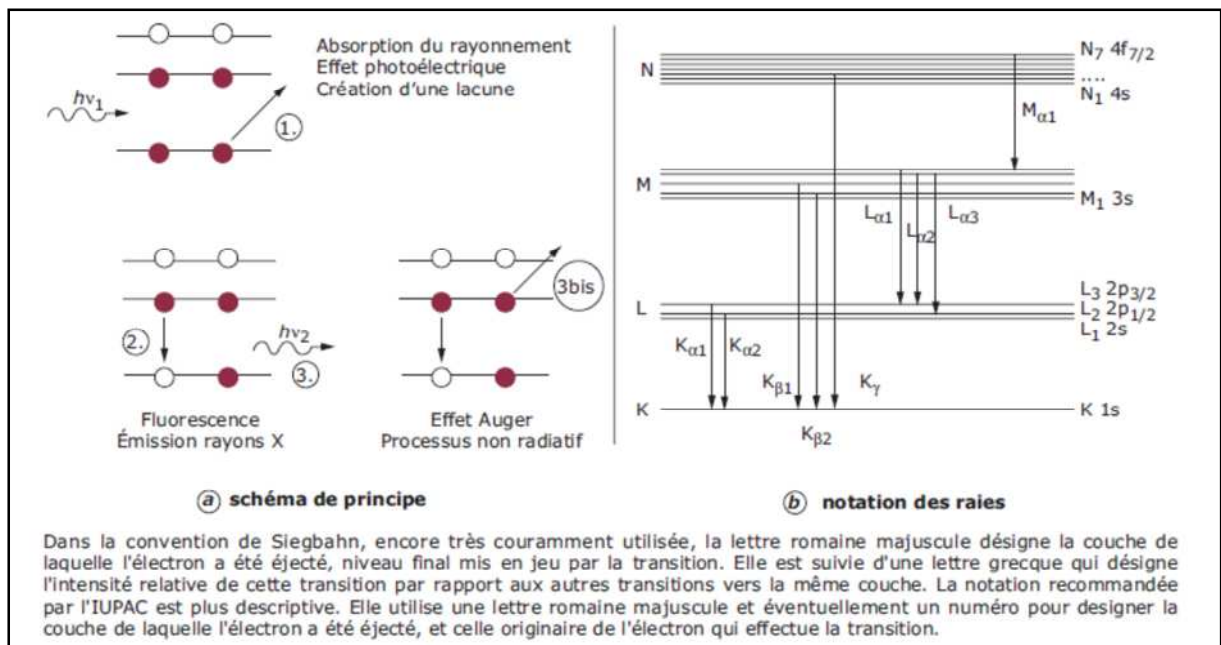
La spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueurs d'ondes (WD-XRF) est une technique d'analyse multi-élémentaire non destructive. Cette méthode permet de déterminer avec précision la composition chimique globale d'un échantillon en éléments majeurs et en éléments traces. Son domaine d'investigation s'étend du Bore (Z=5) à l'Uranium (Z=92). Elle a pour avantages une préparation simple des échantillons, la rapidité des analyses et une bonne reproductibilité. Elle est utilisée pour déterminer la composition élémentaire d'un

échantillon car le spectre de fluorescences X obtenu dépend très peu de l'arrangement chimique des éléments (Athmani, 2008).

La fluorescence X est l'émission de rayons X consécutive à une excitation des couches atomiques profondes. Le principe physique qui régit cette technique est un processus atomique en trois étapes (figure 22) (De Viguerie et al, 2011):

- 1) L'ionisation en couche profonde de l'atome cible par le faisceau de rayons X incident ;
- 2) Le remplissage de lacune électronique ainsi créée par un électron d'une couche plus externe : le retour à l'état d'équilibre se fait par transition d'un électron d'une couche « supérieure » vers la couche présentant la lacune, et se caractérise par une diminution de l'énergie potentielle de l'atome.
- 3) Le relâchement de l'excédent d'énergie par émission d'un rayon X caractéristique. On parle alors de fluorescence X.

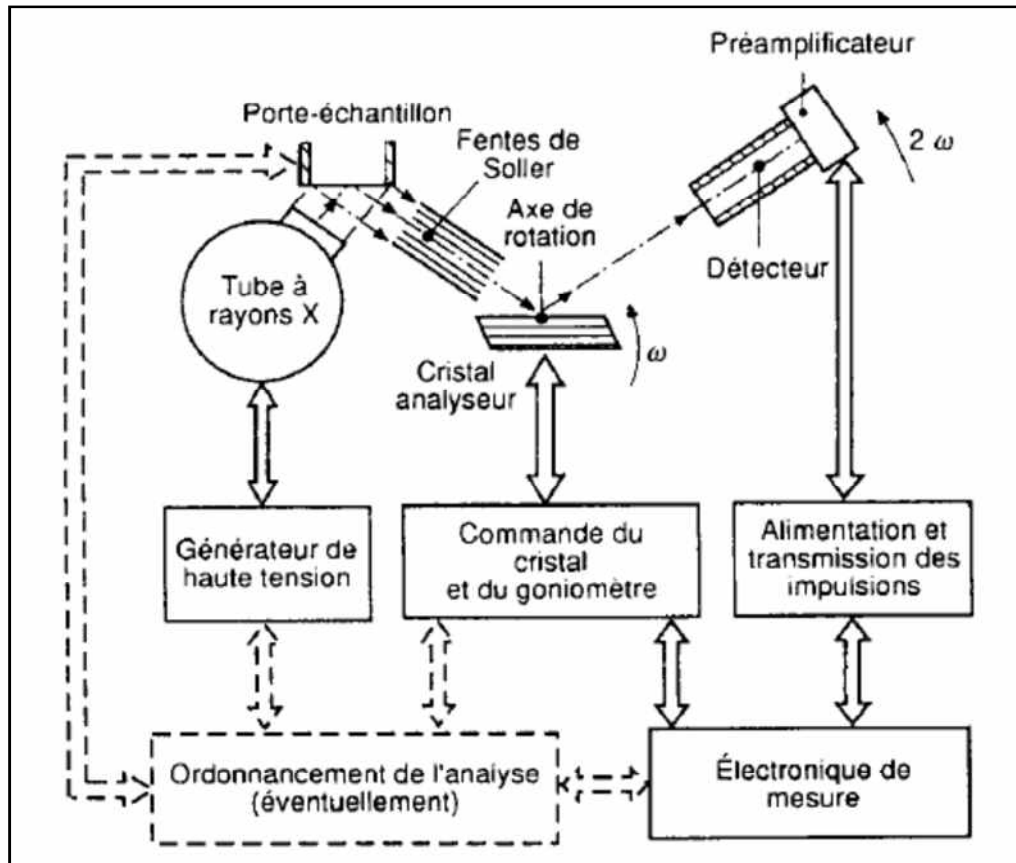
**3 bis)** cette énergie peut aussi être transférée à un électron périphérique qui est alors éjecté. Il s'agit de l'effet Auger, processus non radiatif, qui entre en compétition avec l'émission X.



**Figure 22:** Schéma de principe de la fluorescence X en compétition avec l'effet Auger (a). Notation des raies (b) (De Viguerie et al, 2011).

Les spectromètres à dispersion de longueur d'onde comprennent (figure 23) (Despujols, 2000) :

- Une source de rayonnement X primaire ;
- Un porte échantillon ;
- Un système dispersif à cristal ;
- Un détecteur ;
- L'électronique et l'informatique associées.



**Figure 23:** Constitution d'un spectromètre de fluorescence X séquentiel à dispersion en longueur d'onde (Despujols, 2000)

La longueur d'onde et l'angle de diffraction sont reliés par la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2 d \sin\theta \quad (36)$$

$n$  : ordre de diffraction

$\lambda$  : longueur d'onde (Å)

$d$  : distance interreticulaire (Å)

$\theta$  : l'angle de diffraction (Bragg) en degré

### 2.4.1. La source (Despujols, 2000).

La source est constituée par un tube à rayon X. Ces tubes sont universellement utilisés ; ils sont constitués par une enceinte vidée, dans laquelle un faisceau d'électrons, accélérés par une tension électrique continue  $V$ , donc d'énergie  $W=eV$  ( $e$ =valeur absolue de la charge de l'électron), frappe une cible métallique. Cette cible est appelée « anode » parce qu'elle est portée à un potentiel positif par rapport à la source d'électrons (« cathode ») ; elle est aussi appelée « anticathode ».

Les électrons sont ralentis dans la cible, en émettant un rayonnement de freinage (Bremsstrahlung), dont le spectre est continu et dont l'énergie maximale est  $W$ . ce rayonnement est d'autant plus intense que le numéro atomique du métal constituant la cible est plus élevé.

Le rapport entre l'énergie émise sous forme de rayonnement et l'énergie fournie au tube (produit de la tension  $V$  appliquée par l'intensité du faisceau électronique, figure 24) est approximativement égal à :

$$1,1 \times 10^{-9} ZV \quad (37)$$

Avec :

**Z** : numéro atomique de l'élément constituant l'anode ;

**V** : tension appliquée en volts.

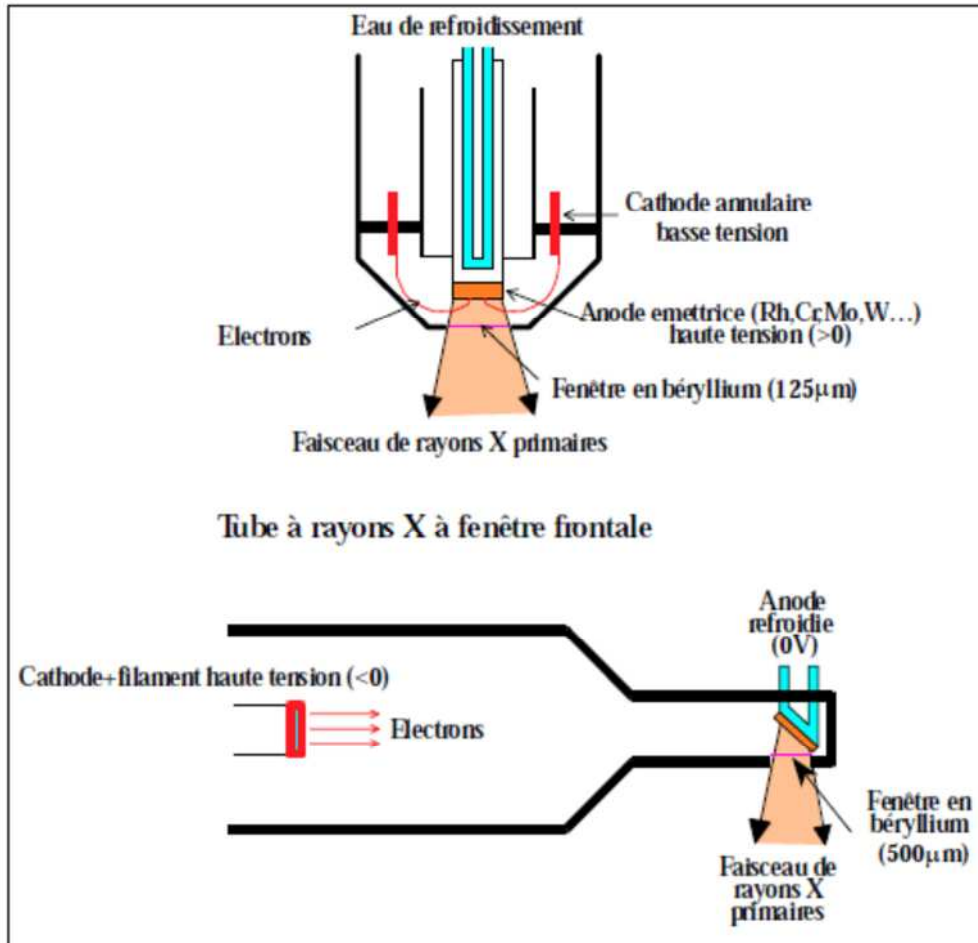
Ce rendement est faible (0,4 % pour une anode de tungstène et une tension de 50 kV). L'énergie restante est dissipée sous forme de chaleur, et l'anode doit donc être refroidie, en général par une circulation d'eau.

Si l'énergie  $W$  est suffisante pour extraire des électrons atomiques de la cible, le spectre caractéristique de celle-ci est également émis. Le rayonnement issu d'un tube à rayons X comprend donc à la fois un rayonnement continu, dont la longueur d'onde minimale est

$\lambda$  (nm) =  $1240/W$  (eV), et un spectre de raies.

Le rapport entre l'intensité contenue dans les raies et l'intensité totale émise par le tube augmente d'abord rapidement quand la tension appliquée  $V$  croît à partir de  $|E_x|/e$ , puis ne

varie plus guère à partir d'une certaine valeur de  $V$  (voisine de  $3 |E_x|/e$  dans le cas du cuivre). Ce rapport vaut environ, pour  $V= 40$  kV, 38 % pour le tungstène, et 72 % pour le chrome.



**Figure 24:** Tube à rayon X (Centre SPIN)

**24.2. La porte-échantillon (Despujols, 2000)** doit permettre le passage, éventuellement automatique, d'un échantillon à un autre.

**24.3. Système dispersif, détecteur et électronique de mesure (Despujols, 2000)**

Le cristal analyseur est en général plan (spectromètre de Bragg) ; il est interchangeable, le fluorure de lithium est très souvent employé, ainsi que certains cristaux organiques [PET (pentaérythritol), KAP (phtalate acide de potassium)] ; les systèmes multicouches sont utiles pour l'analyse des éléments légers et très légers.

L'électronique de mesure constitue un sous-ensemble comprenant les alimentations des compteurs, les organes de traitement des impulsions (préamplification, discrimination

d'amplitude, mise en forme, amplification, comptage, intégration), les organes de commande sont pilotés par un microprocesseur, l'enregistreur graphique ou l'imprimante, éventuellement l'interface avec un système informatique.

Dans le cas de l'analyse quantitative, le calcul des concentrations à partir des résultats de comptage ou d'intégration des impulsions peut se faire à la main ou à l'aide d'un micro-ordinateur.

Le calcul manuel repose sur la mesure de l'intensité  $N_{brute}$  de la raie choisie, exprimée souvent en Cps (coups par seconde) fournie par le détecteur ; on lui soustrait l'intensité  $N_{bf}$  du fond continu correspondant, en tenant compte éventuellement des corrections. On obtient

$$N_{net} = N_{brute} - N_{bf} \quad (38)$$

#### 2.4.4. Pratique de l'analyse

##### 2.4.4.1. Préparation des échantillons

L'échantillon doit offrir au rayonnement primaire une surface plane de quelques centimètres carrés de manière à bien utiliser le faisceau incident. Cette surface peut cependant être réduite dans certains cas jusqu'à une fraction de millimètre carrée. On admet que le produit de l'épaisseur de l'échantillon par son coefficient d'absorption linéaire moyen doit être supérieur à 3 pour que le rayonnement primaire soit bien absorbé, et on opère en général avec des épaisseurs de plusieurs millimètres. On peut cependant étudier des couches minces.

En première approximation, l'intensité des raies X est indépendante de l'état physique de l'échantillon, qui peut donc être sous forme liquide, pulvérulent, ou solide. Cependant, des précautions, concernant essentiellement l'homogénéité et l'état de surface, sont à prendre si l'on désire une bonne précision (Despujols, 2000).

On prend de chaque couche des deux carottes prélevées dans la baie de Bou-Ismaïl 5 à 12 g de sédiments (selon la masse de l'échantillon : annexe) et on leur fait subir un broyage très fin à l'aide d'un mortier en agate. On pèse 8 g de poudre d'échantillon et 2 g de liant (cellulose). Après mélange, on l'introduit dans un moule et on presse l'échantillon sous les conditions suivantes : 25 tonnes pendant 20 secondes ( $2T/cm^2$ ), puis on obtient une pastille compacte prête à l'analyse de 04cm de diamètre.

Les analyses de ces pastilles sont faites au Laboratoire d'Analyse Minéralogique du Département des Techniques de Spectroscopie d'Analyse de la Division des Techniques Nucléaires du CRNA Alger.

Le spectromètre de fluorescence X utilisé est de type **Magixpro** (Panalytical ex. Philips) équipé de (figure 25):

1. Un tube à anticathode en Rhodium pour l'excitation des échantillons.
2. Un générateur 04 kW
3. Une série de 08 cristaux analyseurs couvrant la gamme des éléments du B à U.
4. Trois détecteurs :
  - Un détecteur à flux gazeux
  - Un détecteur proportionnel sellé au Xénon
  - Et un détecteur à scintillation
5. Trois collimateurs (150 – 550 – 4000  $\mu\text{m}$ ).
6. Un système de vide pour l'analyse des échantillons solides.
7. Un système à Hélium pour l'analyse des échantillons liquides et en poudres
8. Le système exploite un logiciel « le SuperQ » pour la collection des données, l'interprétation et l'analyse quantitative et l'IQ+ pour l'analyse semi quantitative.



**Figure 25:** Le spectromètre de fluorescence X de type MagixPro

Pour la détermination des proportions des minéraux abondantes dans les échantillons de la carotte I, nous avons mélangés les échantillons entre eux selon leur composition chimique. L'analyse de ces nouveaux échantillons qui sont de l'ordre de six (06) a été faite au **Centre de Recherche Nucléaire de Birine (CRNB)**, tableau 12.

**Tableau 12 : Les échantillons de l'étude minéralogique**

| Echantillon                    | Hauteur |
|--------------------------------|---------|
| C <sub>50</sub> -(1-4 cm)      | 3 cm    |
| C <sub>50</sub> -(4-8 cm)      | 4 cm    |
| C <sub>50</sub> -(8-12 cm)     | 4 cm    |
| C <sub>50</sub> - (12-16 cm)   | 4 cm    |
| C <sub>50</sub> - (16 - 20 cm) | 4 cm    |
| C <sub>50</sub> - (20 - 22 cm) | 2 cm    |

## QUATRIEME CHAPITRE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

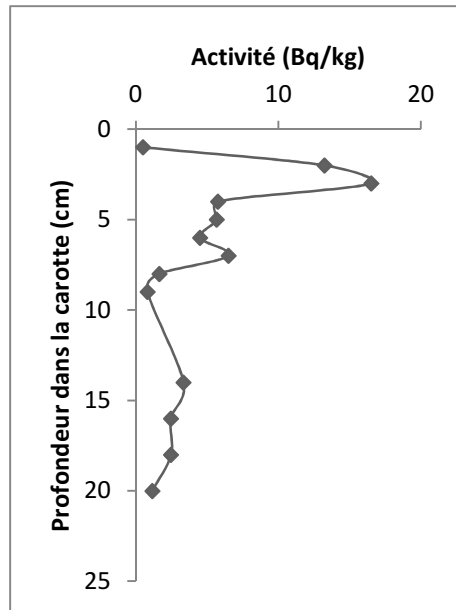
### I. Les éléments radioactifs

L'analyse de tous les échantillons des deux carottes par spectrométrie gamma et le traitement des spectres de ces échantillons et du bruit de fond ainsi le traitement numérique, nous permettent de présenter les distributions des concentrations des radioéléments d'intérêt identifiés en fonction de la profondeur dans les deux carottes prélevées pour comprendre le comportement de ces radioéléments à l'égard du milieu marin. Les données relatives aux échantillons et aux calculs de l'activité de chaque radioélément sont présentées dans les annexes.

#### 1. Processus dans la Carotte I

##### 1.1. Le Plomb 210

L'allure de la courbe de distribution des concentrations du Plomb 210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) en fonction de la profondeur dans la Carotte I montre que ces concentrations à la couche de surface sont très faibles (0,5 Bq/kg), Celles-ci peuvent être dues à une « carence » dans les apports contenant du Plomb 210. Les deux couches suivantes (1-3 cm), les concentrations sont les plus importantes (13-17 Bq/kg) dans leur distribution verticale dans la carotte cela est peut être due à un apport de Plomb 210 à partir de la désintégration in situ du Radium 226. De 3 cm à 20 cm de profondeur, les concentrations diminuent, probablement, à cause de la désintégration continue du Radium 226 (figure 26).

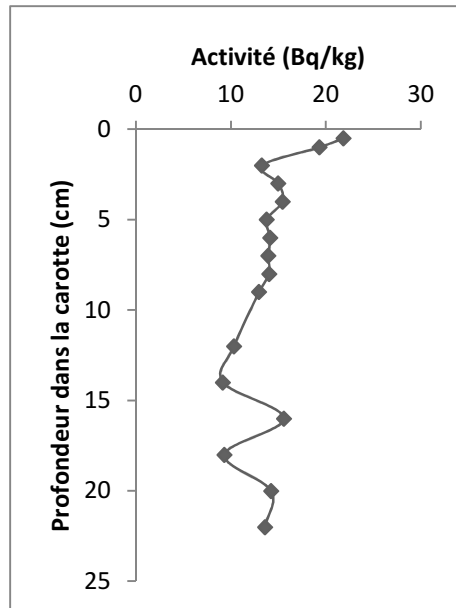


**Figure 26 :** Distribution des concentrations du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

### 1.2.L'Uranium 238

Les concentrations de l'Uranium 238 en fonction de la profondeur dans la carotte I évoluent entre 9 Bq/kg et 22 Bq/kg.

Les concentrations les plus élevées sont trouvées au niveau des deux premières couches qui dues à un apport d'Uranium. De 2 à 20 cm de profondeur, les concentrations évoluent autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 13 Bq/kg (figure 27).

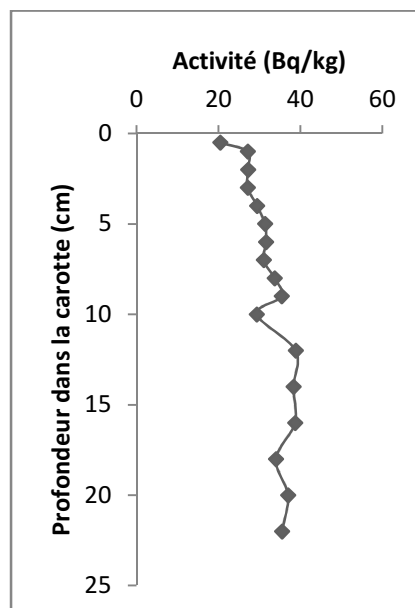


**Figure 27 :** Distribution des concentrations de l' $^{238}\text{U}$  en fonction de la profondeur

### 1.3. Le Plomb 212

Les concentrations du plomb 212 dans les différentes couches sédimentaires de la carotte I sont comprises entre  $20 \pm 0,065$  et  $40 \pm 0,050$  Bq/kg.

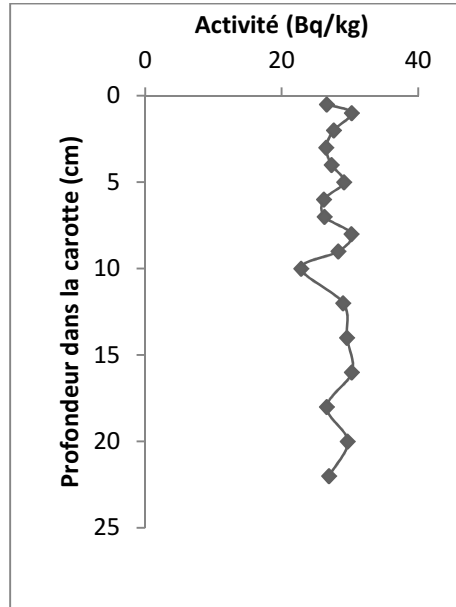
Ces concentrations augmentent légèrement de la surface jusqu'à 14 cm de profondeur et ensuite elles évoluent autour d'une valeur moyenne qui est de l'ordre de 37 Bq/kg (figure 28).



**Figure 28:** Distribution des concentrations du  $^{212}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

#### 1.4. Le Plomb 214

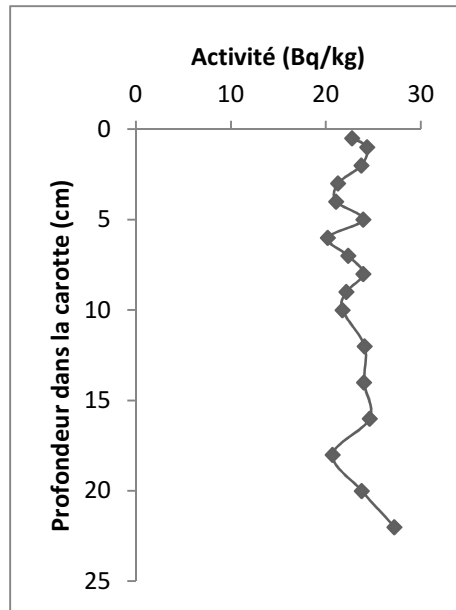
Les concentrations du plomb 214 en fonction de la profondeur dans la carotte I évoluent entre  $20 \pm 0,053$  et  $31 \pm 0,051$  Bq/kg. Cette évolution est autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 27,85 Bq/kg en moyenne (figure 29).



**Figure 29:** Distribution des concentrations du  $^{214}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

#### 1.5. Le Bismuth 214

Les concentrations du Bismuth 214 dans les différentes la carotte I évoluent d'une manière plus ou moins stable autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 23 Bq/kg. Ces concentrations varient entre  $20 \pm 0,056$  Bq/kg et  $28 \pm 0,054$  Bq/kg (figure 30).



**Figure 30:** Distribution des concentrations du  $^{214}\text{Bi}$  en fonction de la profondeur

### 1.6. Le Césium 137

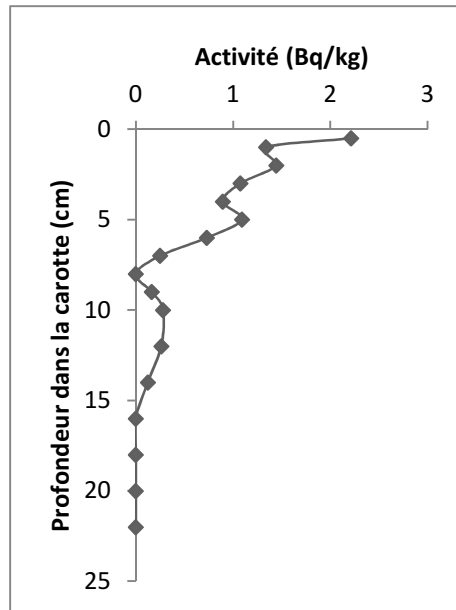
Les concentrations du Césium 137 diminuent de la surface jusqu'à 8 cm de profondeur pour être ré-augmentées très légèrement vers 16 cm de profondeur. A partir de cette couche, le Césium 137 est absent.

Au terme d'intensité des concentrations, le Césium 137 présente des valeurs très faibles, la plus forte concentration dans la distribution est vers  $2,5 \pm 0,105$  Bq/kg (figure 31). Nous sommes content par ces valeurs faibles qui signifient que la zone d'étude n'est pas polluée radio-activement.

Les deux pics référenciés dans l'histoire de cet élément qui sont liées aux accidents nucléaires et aux rejets des usines de combustibles nucléaires et aussi aux essais d'armes nucléaires. Ces deux pics sont été bien apparus.

Le pic de 1986 est à 2 cm de profondeur, tandis que celui de 1963 est identifié au niveau de la couche de 4-5cm de profondeur.

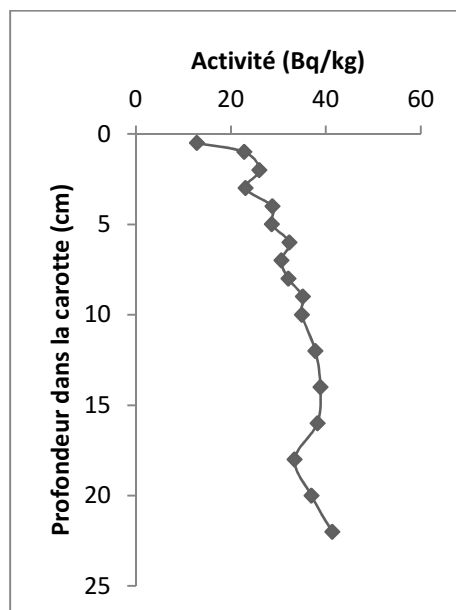
Une estimation de la vitesse de sédimentation était faite à partir de ces deux pics : la différence temporaire est de 23 ans pour 3 cm d'épaisseur c'est-à-dire **0,13 cm/an** dans ce point représentatif de la région.



**Figure 31:** Distribution des concentrations du  $^{137}\text{Cs}$  en fonction de la profondeur

### 1.7. L'Actinium 228

L'Actinium 228 est un radioélément naturel qui l'on trouve partout dans les différentes compartiments de l'environnement. Leurs concentrations dans cette carotte est faible, elles varient de  $12 \pm 0,119$  Bq/kg à  $42 \pm 0,057$  Bq/kg et avec une valeur moyenne de l'ordre de 31 Bq/kg. Ces concentrations augmentent légèrement en fonction de la profondeur dans la carotte.

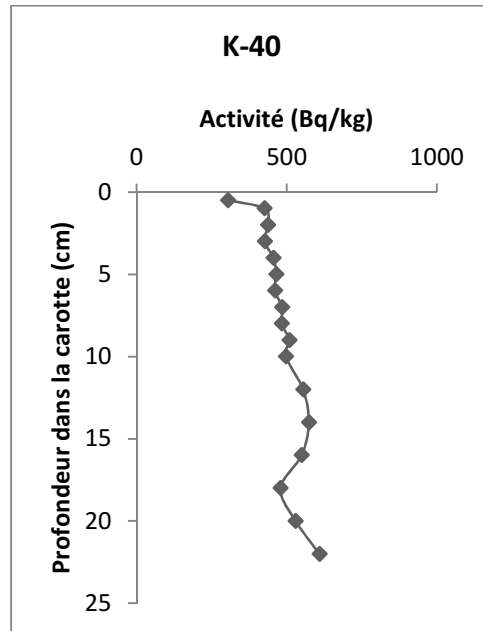


**Figure 32:** Distribution des concentrations de l' $^{228}\text{Ac}$  en fonction de la profondeur

### 1.8. Le Potassium 40

Les concentrations du Potassium dans la carotte I varie entre  $300 \pm 0,065$  Bq/kg et  $610 \pm 0,052$  Bq/kg. La valeur moyenne de la distribution est de l'ordre de 485 Bq/kg (figure 32).

On peut dire qu'il n'y a pas de changements significatifs dans l'évolution des concentrations de cet élément.



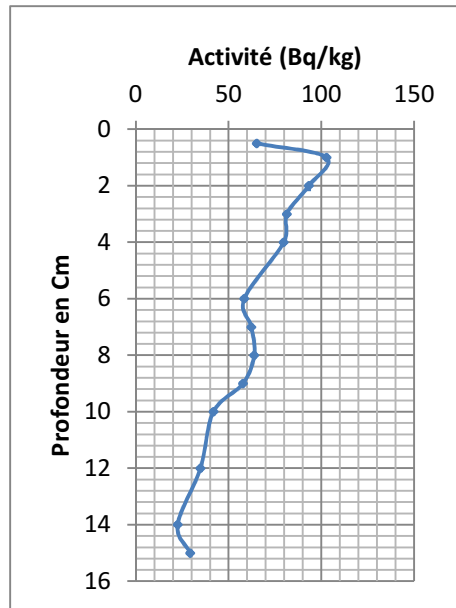
**Figure 32:** Distribution des concentrations du  $^{40}\text{K}$  en fonction de la profondeur

## 2. Processus dans la Carotte II

### 2.1. Le Plomb 210

La concentration du Plomb 210 varie de 22,54 Bq/kg (à la couche du 13-14 cm de profondeur) à 102,77 Bq/kg (à la couche du 0,5-1 cm de profondeur).

Le profil de distribution des concentrations du plomb 210 en fonction de la profondeur montre une décroissance continue de la surface au fond de la carotte (figure 33).



**Figure 33:** Distribution des concentrations du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

La distribution du plomb 210 en excès dans les différentes couches de la carotte II, nous permet d'estimer la vitesse de sédimentation dans cette région.

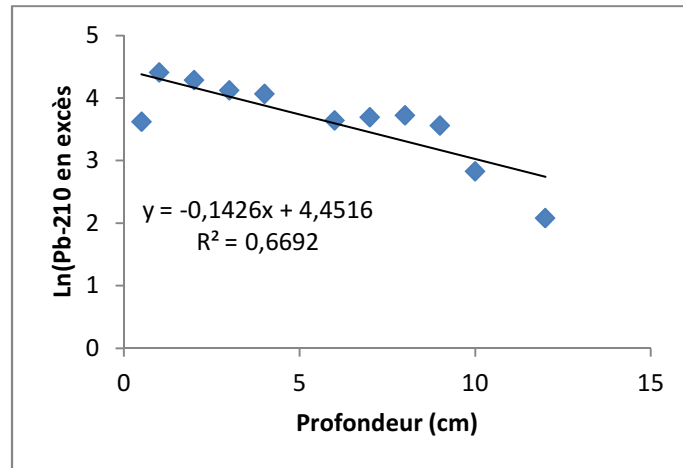
En effet, l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  dans le sédiment est composée de l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  provenant de l'apport atmosphérique et du  $^{210}\text{Pb}$  issu de la décroissance in situ du  $^{226}\text{Ra}$ .

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{excès}} + ^{226}\text{Ra}$$

La concentration du Radium 226 est la moyenne entre la concentration du plomb 214 et celle du bismuth 214, voir tableau 13.

**Tableau 13:** Résultats des activités de Radium 226 et du Pb-210 en excès

| Radioélément | Prof (cm) | $^{210}\text{Pb}$ | $^{214}\text{Pb}$ | $^{214}\text{Bi}$ | $^{226}\text{Ra}$ | $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ | $\text{Ln}(\text{Pb}_{\text{excès}})$ |
|--------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| C30-0.5 cm   | 0,5       | 65,19             | 25,66             | 29,74             | 27,70             | 37,49                            | 3,62                                  |
| C30-1 cm     | 1         | 102,77            | 20,93             | 19,67             | 20,30             | 82,47                            | 4,41                                  |
| C30-2 cm     | 2         | 93,28             | 21,37             | 19,41             | 20,39             | 72,88                            | 4,28                                  |
| C3-03 cm     | 3         | 81,40             | 20,59             | 18,38             | 19,49             | 61,91                            | 4,12                                  |
| C3-04 cm     | 4         | 79,70             | 22,83             | 19,71             | 21,27             | 58,43                            | 4,06                                  |
| C30-6 cm     | 6         | 58,44             | 21,76             | 18,83             | 20,30             | 38,14                            | 3,64                                  |
| C30-7 cm     | 7         | 62,26             | 22,95             | 21,01             | 21,98             | 40,28                            | 3,69                                  |
| C30-8 cm     | 8         | 63,82             | 24,17             | 20,58             | 22,38             | 41,44                            | 3,72                                  |
| C30-9 cm     | 9         | 57,80             | 24,38             | 20,77             | 22,57             | 35,23                            | 3,56                                  |
| C30-10 cm    | 10        | 41,84             | 28,14             | 21,67             | 24,91             | 16,93                            | 2,82                                  |
| C30-12 cm    | 12        | 34,81             | 28,86             | 24,67             | 26,76             | 8,04                             | 2,08                                  |



**Figure 34:** Distribution de  $\text{Ln} (^{210}\text{Pb}_{\text{exc}})$  en fonction de la profondeur

La pente de l'équation de corrélation entre  $\text{Ln} (^{210}\text{Pb}_{\text{exc}})$  et la profondeur est le rapport entre la constante de désintégration du plomb 210 et la vitesse de sédimentation (figure 34).

**La pente =  $-\lambda/S$**

S : vitesse de sédimentation

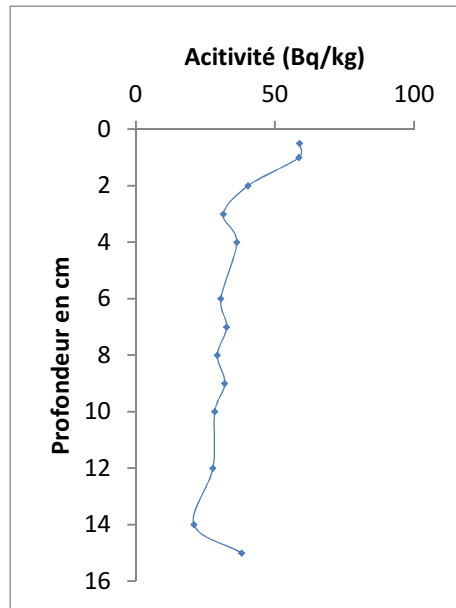
On applique l'équation et on trouve que la vitesse de sédimentation est de 0,22 cm/an.

Cette valeur de la vitesse de sédimentation est vérifiée par celle estimée à partir des concentrations du  $^{137}\text{Cs}$ .

Aussi, cette vitesse de sédimentation est identique à celle trouvée par Taib Errahmani en baie d'Alger (2012) et très proche à celle calculée par Noureddine dans la baie de Bou-Ismaïl (2003) (**0,18 cm/an**).

## 2.2.L'Uranium 238

La concentration de l'Uranium 238 varie de 20,90 Bq/kg (à la couche du 12-14 cm de profondeur) à 58,82 Bq/kg (à la couche du 0-0,5 cm de profondeur).



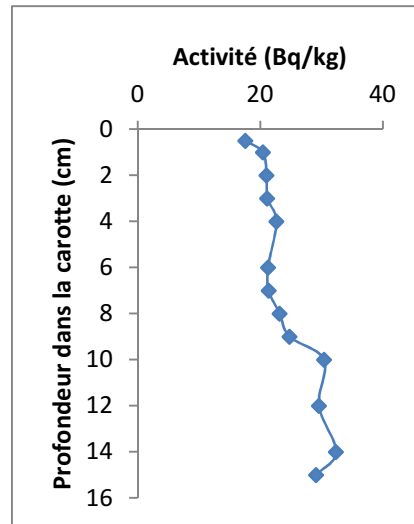
**Figure 35:** Distribution des concentrations de  $^{238}\text{U}$  en fonction de la profondeur

Les concentrations en  $^{238}\text{U}$  diminuent rapidement de la surface jusqu'à la couche de 2-3 cm de profondeur. Entre 3 et 14 cm de profondeur, les concentrations évoluent d'une manière constante. De 14 à 15 cm on remarque une augmentation de 18 Bq (figure 35).

### 2.3.Le Plomb 212

Les concentrations du Plomb 212 gardent presque la même valeur qui est de l'ordre de 24 Bq/kg de la surface jusqu'à 9 cm de profondeur. Une légère augmentation s'aperçoit entre 9 et 15 cm de profondeur qui ne traduit pas d'un phénomène certain, elle est peut être liée aux processus d'analyse des échantillons par ce que nous avons passés l'analyse des échantillons en deux détecteur qui sont totalement différents dans leurs caractéristiques et surtout celle de l'efficacité de détection.

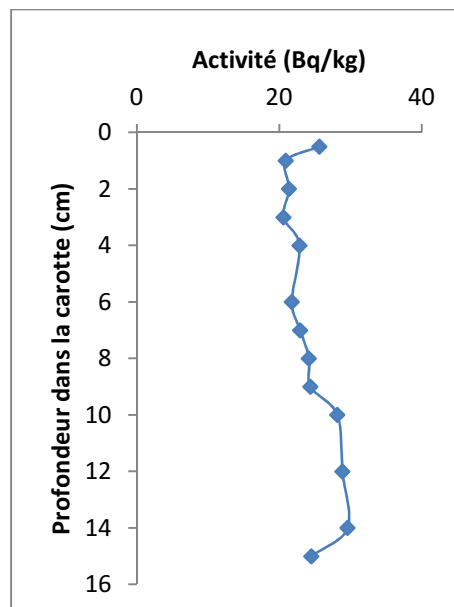
La gamme de variation des concentrations du plomb 212 est vers 15 Bq/kg (figure 36).



**Figure 36:** Distribution des concentrations du  $^{212}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

#### 2.4. Le Plomb 214

Les concentrations du Plomb 214 de la carotte II évoluent autour d'une valeur moyenne qui est de l'ordre de 24 Bq/kg (figure 37). Ces concentrations ne présentent pas de grandes variations qu'on peut dire que le processus à la verticale quelque soit de sédimentation ou de désintégration du Plomb 214 soit constantes dans la région d'échantillonnage.

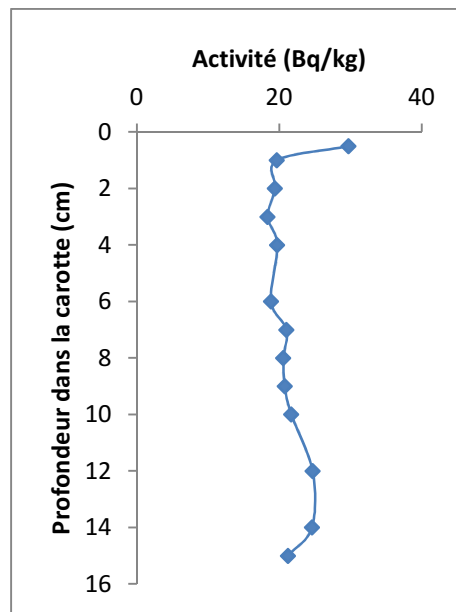


**Figure 37:** Distribution des concentrations du  $^{214}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur

## 2.5. Le Bismuth 214

De la surface jusqu'au fond de la carotte II le Bismuth 214 présente des concentrations stables. Une seule valeur qui est en dehors de la logique de distribution de cet élément radioactif ; c'est la valeur de la première couche qui est en contact directe avec la masse d'eau. Cette valeur est la plus importante dans la distribution cela peut être lié à un apport soit atmosphérique ou soit terrigène à travers l'embouchure d'Oued Mazafran.

Les concentrations du Bismuth 214 sont variées de  $18 \pm 0,057$  Bq/kg à  $29 \pm 0,085$  Bq/kg avec une valeur moyenne de l'ordre de 21 Bq/kg (figure 38).



**Figure 38:** Distribution des concentrations du  $^{214}\text{Bi}$  en fonction de la profondeur

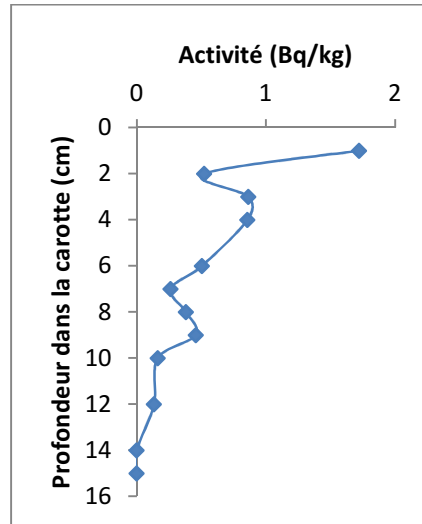
## 2.6. Le Césium 137

La distribution des concentrations du Césium 137 de cette carotte II est similaire à celle de la carotte I dans son allure. Ces concentrations sont aussi faibles, le maximum de celle-ci est de  $1,72 \pm 0,13$  Bq/kg (figure 39).

Les deux fameux pics sont très identifiés. L'un à 4 cm de profondeur et l'autre est à 9 cm de profondeur.

La vitesse de sédimentation dans cette région est de **0,21 cm/an**.

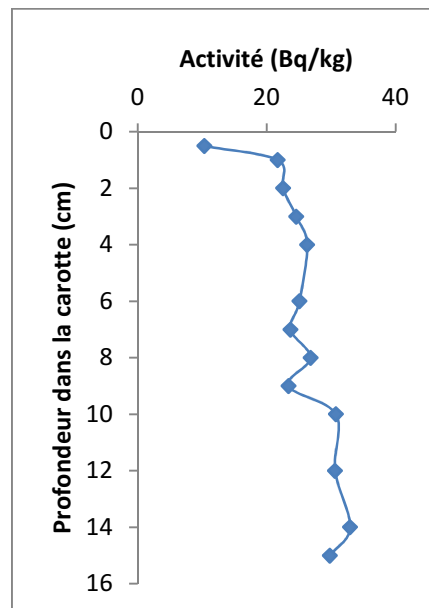
Cette vitesse de sédimentation trouvée à partir des distributions du Césium 137 des deux carottes est comparable à celle trouvée par Noureddine et al (2003) qui est de l'ordre de **0,18 cm/an**.



**Figure 39:** Distribution des concentrations du  $^{137}\text{Cs}$  en fonction de la profondeur

### 2.7.L'Actinium 228

La distribution des concentrations de l'Actinium 228 est très similaire à celles du Plomb 214. Les concentrations sont presque identiques dans toutes les couches sédimentaires de la carotte (25 Bq/kg au moyenne) à l'exception de la couche superficielle qui présente un minimum d'activité ( $10 \pm 0,206$  Bq/kg) qui peut dû aux anomalies liées à la détection (figure 40).

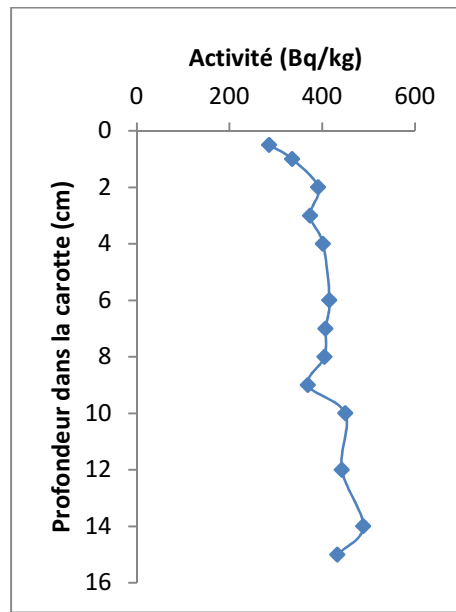


**Figure 40:** Distribution des concentrations de l' $^{228}\text{Ac}$  en fonction de la profondeur

## 2.8. Le Potassium 40

Les concentrations du Potassium dans la carotte I varie entre  $285 \pm 0,088$  Bq/kg et  $488 \pm 0,050$  Bq/kg. La valeur moyenne de la distribution est de l'ordre de 400 Bq/kg (figure 41)

On constate qu'il n'y a pas de changements significatifs dans l'évolution des concentrations de cet élément dans cette carotte.



**Figure 41:** Distribution des concentrations du  $^{40}\text{K}$  en fonction de la profondeur

Les valeurs de concentrations trouvées dans nos échantillons des deux carottes sédimentaires sont assez comparables entre eux, à l'exception du Plomb 210 et l'Uranium 238 où ses concentrations dans la carotte II sont fortes par rapport à celles de la carotte I. Aussi pour le Potassium 40 mais ses concentrations dans la carotte I est légèrement forte par rapport à celles de la carotte II, et le (tableau 14).

Outre, les concentrations des radioéléments d'intérêt identifiés dans nos deux carottes sont comparables à celles d'une carotte prélevée et analysée par Nouredine et al (2003) (carotte-pub) dans la baie de Bou-Ismaïl (figure 46 à 50). Cette comparaison est admise entre le Plomb 212, l'Actinium 228. Pour le Potassium, leur concentration dans la carotte-pub est un peu plus forte que celle trouvée dans nos carottes. Les concentrations du Plomb 210 dans cette carotte-pub est comparable avec celles de la carotte I mais très différentes à celles de la carotte II. (Tableau 14).

Le Césium 137 dans la carotte-pub est très élevé par rapport nos échantillons qui peut être expliqué par leur désintégration radioactive et peut être aussi que les concentrations les plus intenses sont au large ou sont migrées dans les couches sédimentaires profondes (tableau 14).

A partir de cette comparaison nous constatons qu'il n'y a pas de changement significatif dans les apports et le comportement des radioéléments naturels d'intérêts à l'exception du Plomb 210. Pour le Césium 137 peut être que la zone de prélèvement a jouée un grand effet sur leur décantation et leur fixation du fait que les eaux sont mélangées et dynamisée par les courants marins et le courant généré par les eaux de l'Oued du Mazafran. Aussi que le sédiment est grossier, le Césium 137 n'est pas suffisamment fixé sur les particules sédimentaires (tableau 14).

Aussi, d'autres carottes prélevées le long du littoral algérien<sup>1</sup> ont aussi une même « intensité » d'activité de radioéléments d'intérêt : le Plomb 212, le Plomb 214, le Bismuth 214, l'Actinium 228, le Potassium 40 (tableau 11). Pour le Plomb 210, les valeurs des concentrations dans ces carottes sont très élevées par rapport nos carotte sauf pour le carotte prélevée en 1999 à Annaba où ses concentrations en Plomb 210 sont voisines de celles de la carotte II.

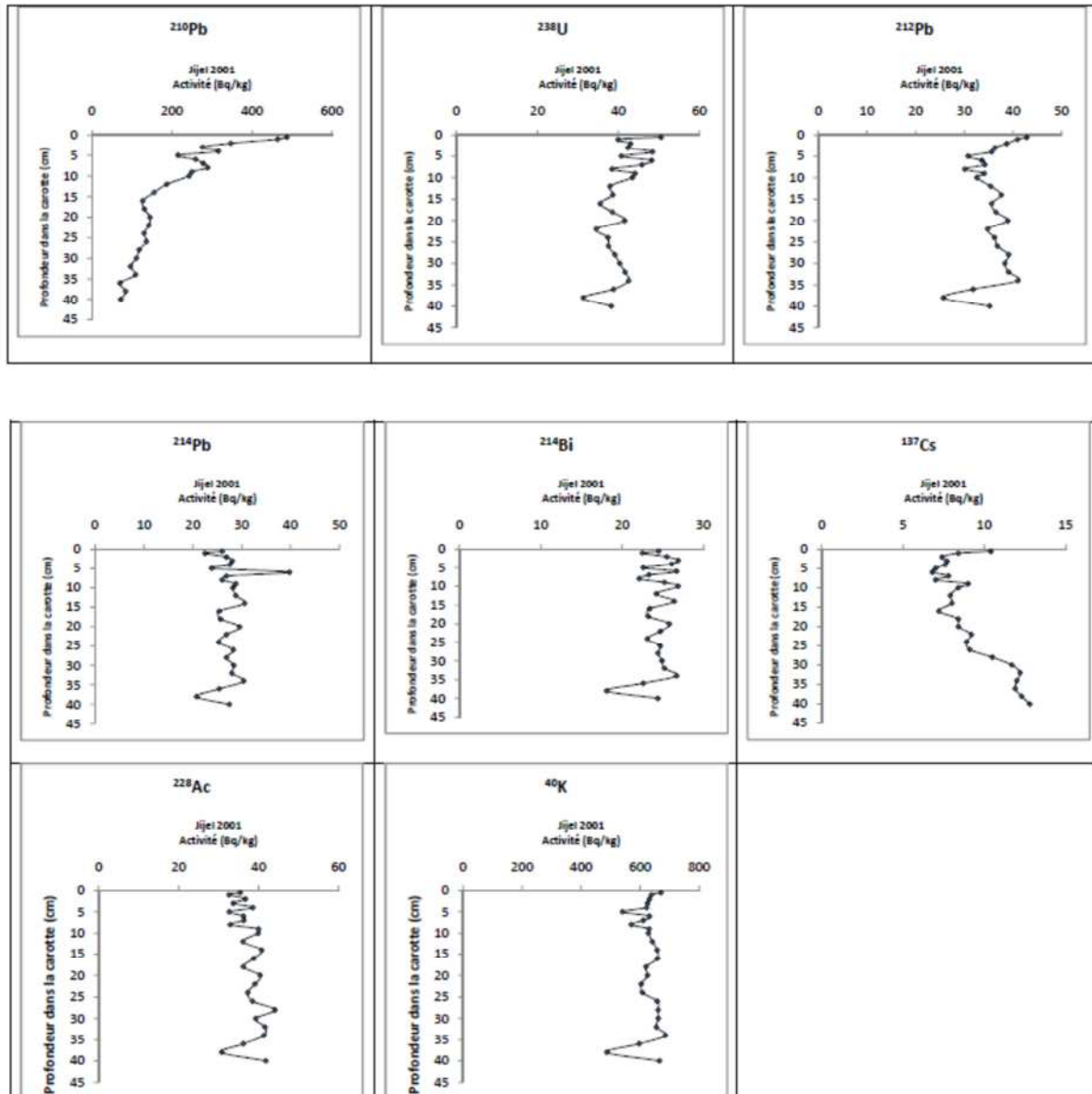
Ce qui concerne l'Uranium 238, les concentrations sont quasi-identiques entre toutes les carottes à l'exception du carotte I qui présente de faibles concentrations.

Pour le Césium 137, toutes les carottes ont des concentrations différentes avec celles des deux nos carottes (tableau 14).

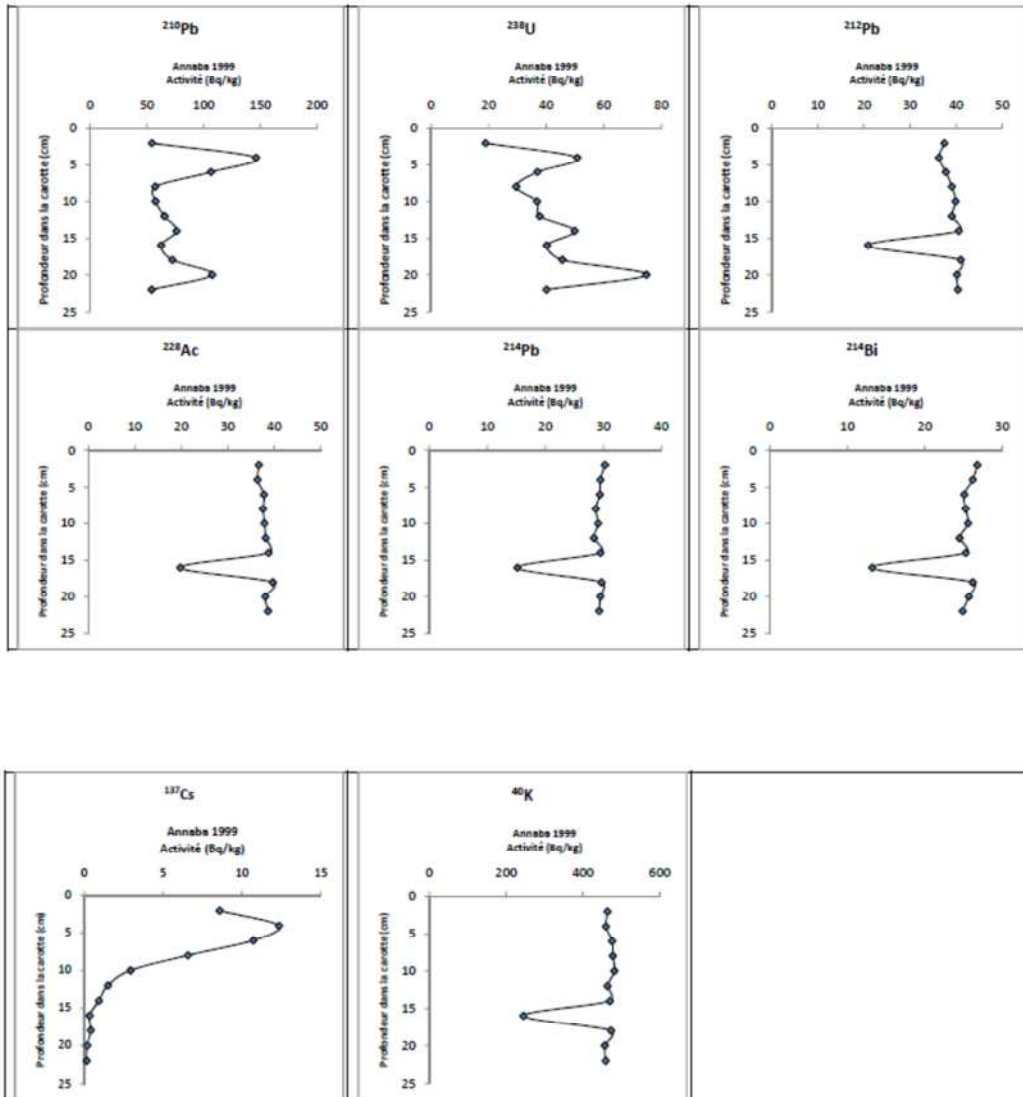
---

<sup>1</sup> L'une prélevée à Annaba (Est d'Alger) en Octobre 1999, une à Jijel (Est d'Alger) en 2001, une à Alger en 2001, l'une à Annaba en Juin 2004 ; toutes ces carottes sont prélevées par Nouredine, figure 42 à 45.

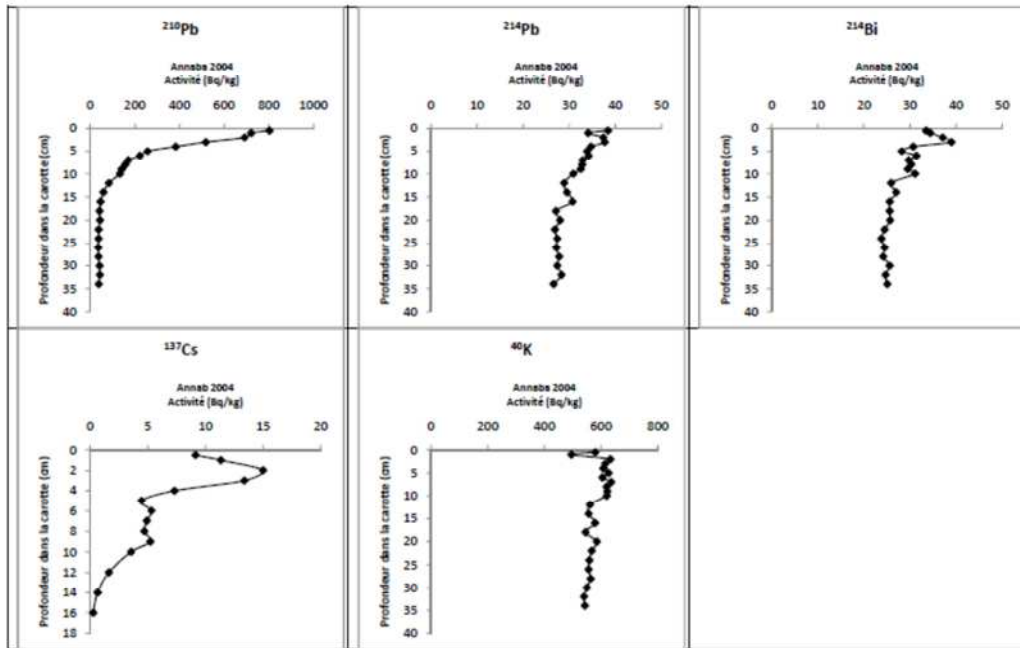
|   | Radioélément | Activité (Bq/kg)  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                 |
|---|--------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|   |              | <sup>210</sup> Pb | <sup>238</sup> U | <sup>212</sup> Pb | <sup>214</sup> Pb | <sup>214</sup> Bi | <sup>137</sup> Cs | <sup>228</sup> Ac | <sup>40</sup> K |
| Carotte I                                       | moyenne      | 4,97              | 13,61            | 32,14             | 27,85             | 23,06             | 0,58              | 31,41             | 485,11          |
|   | max          | 16,51             | 21,86            | 38,85             | 30,29             | 27,21             | 2,21              | 41,33             | 608,95          |
|   | min          | 0,51              | 5,37             | 20,47             | 22,86             | 20,19             | 0                 | 12,85             | 304,04          |
| Carotte II                                      | moyenne      | 61,01             | 35,78            | 24,23             | 24,29             | 21,56             | 0,48              | 25,29             | 399,90          |
|   | max          | 102,77            | 58,82            | 32,38             | 29,60             | 29,74             | 1,72              | 32,96             | 488,43          |
|   | min          | 22,54             | 20,90            | 17,58             | 20,60             | 18,38             | 0                 | 10,36             | 285,27          |
| Noureddine et al, 2003<br>(large de Bou-Ismaïl) | moyenne      | 2,02              | /                | 31,77             | /                 | /                 | 3,47              | 28,80             | 600,58          |
|   | max          | 3,70              | /                | 36,50             | /                 | /                 | 6,29              | 34,40             | 690,00          |
|   | min          | 0,60              | /                | 27,80             | /                 | /                 | 0,10              | 21,30             | 568,00          |
| Jijel 2001                                      | moyenne      | 201,42            | 40,68            | 35,83             | 27,41             | 24,38             | 9,15              | 37,58             | 626,46          |
|   | max          | 487,00            | 50,50            | 42,80             | 39,80             | 26,90             | 12,80             | 44,10             | 686,00          |
|   | min          | 70,00             | 31,30            | 25,70             | 20,80             | 18,10             | 6,80              | 30,80             | 487,00          |
| Alger 2001                                      | moyenne      | 294,80            | 35,82            | 32,91             | 23,05             | 21,49             | 6,25              | 34,54             | 579,85          |
|   | max          | 895,00            | 48,00            | 45,60             | 31,00             | 31,50             | 11,70             | 39,00             | 760,00          |
|   | min          | 57,00             | 28,60            | 28,00             | 19,30             | 18,50             | 1,30              | 29,20             | 515,00          |
| Annaba 2004                                     | moyenne      | 206,66            | /                | /                 | 31,10             | 28,57             | 6,20              | /                 | 581,08          |
|   | max          | 803,50            | /                | /                 | 38,40             | 39,00             | 15,01             | /                 | 636,00          |
|   | min          | 36,40             | /                | /                 | 26,60             | 23,80             | 0,26              | /                 | 495,00          |
| Annaba 1999                                     | moyenne      | 78,27             | 41,96            | 37,52             | 28,05             | 24,43             | 4,07              | 36,33             | 448,00          |
|   | max          | 146,20            | 74,80            | 41,00             | 30,30             | 26,80             | 12,36             | 39,70             | 482,00          |
|   | min          | 54,20             | 19,00            | 20,90             | 15,20             | 13,20             | 0,16              | 19,80             | 245,00          |



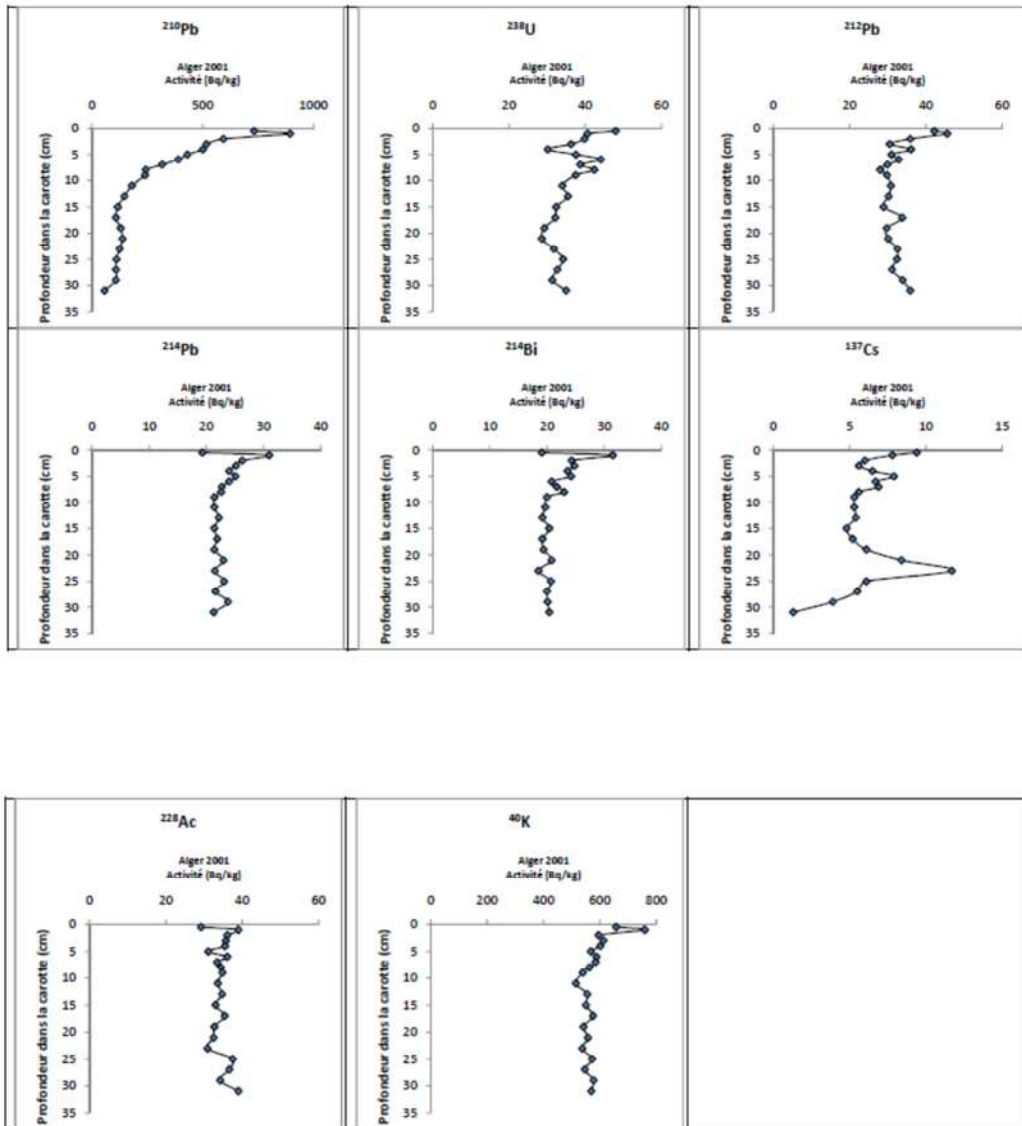
**Figure 42:** Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Jijel en 2001



**Figure 43:** Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Annaba en 1999



**Figure 44:** Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Annaba en 2004



**Figure 45:** Distribution de quelques radionucléides d'intérêt de la Carotte prélevée à Alger en 2001

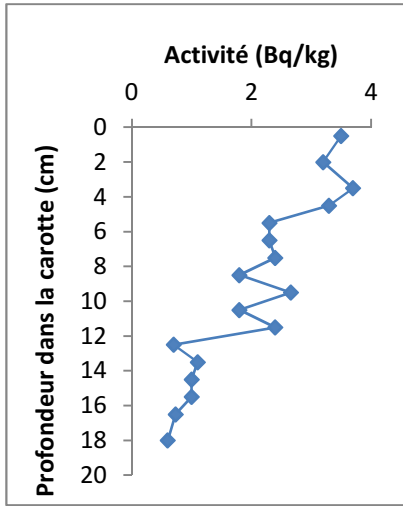


Figure 46 : Distribution des concentrations du  $^{210}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.

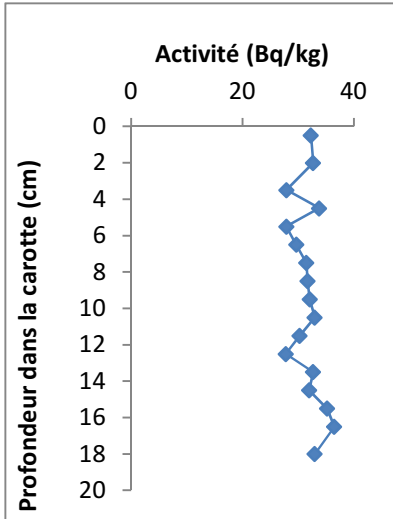


Figure 47 : Distribution des concentrations du  $^{212}\text{Pb}$  en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.

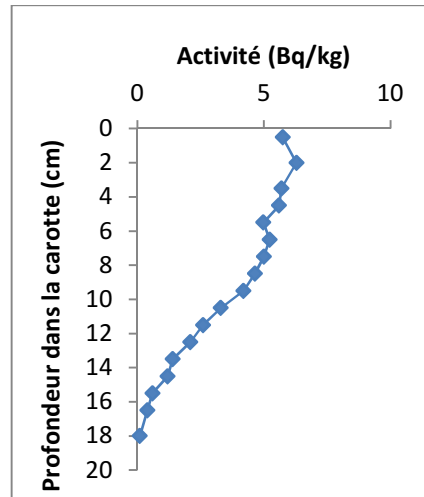


Figure 48 : Distribution des concentrations du  $^{137}\text{Cs}$  en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.

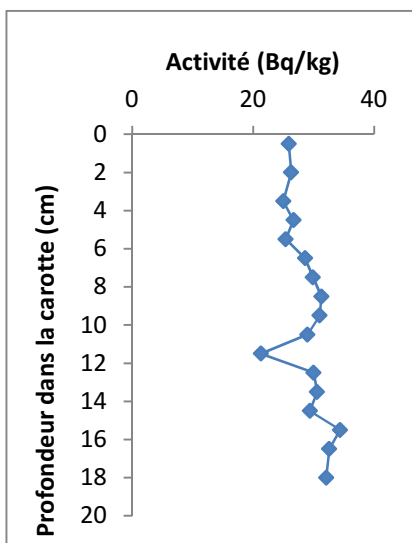


Figure 49 : Distribution des concentrations du  $^{228}\text{Ac}$  en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.

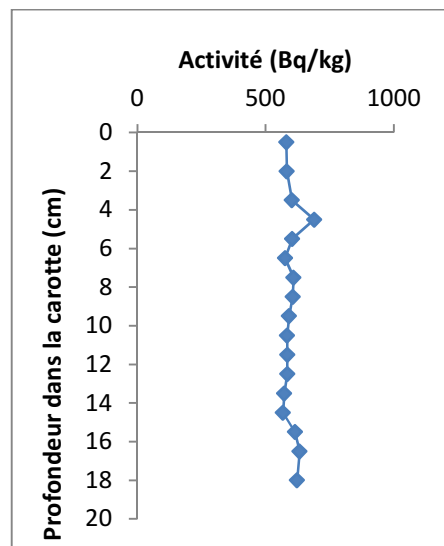


Figure 50 : Distribution des concentrations du  $^{40}\text{K}$  en fonction de la profondeur dans la carotte-pub.

## II. Les constituants chimiques de la carotte I

L'analyse par XRF des différentes couches de la carotte I (de 50 mètre de profondeur) nous a permis d'identifier les différents constituants chimique du sédiment avec leur pourcentage massique à travers plusieurs sections de la carotte I.

Onze composés sous forme d'oxyde sont identifiés qui sont : le Na<sub>2</sub>O, le MgO, l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, le SiO<sub>2</sub>, le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, le K<sub>2</sub>O, le CaO, le TiO<sub>2</sub>, le MnO, le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et le SO<sub>3</sub>.

La variation du taux de chaque composé dans les différentes couches est présentée par des graphiques (figures 52 à 61).

La teneur de la matière volatile (perte au feu) dans toutes les couches de la carotte est presque constante (autour de 17,74%) sauf pour la couche de 2-3 cm de profondeur où la perte au feu à un taux supérieure à 21% ce qui peut être due à un apport de matériau sédimentaire contenant plus de matière volatile par l'oued du Mazafran (figure 51).

La méthode de détermination (la perte au feu) est basée sur le protocole suivant : on prend une masse initiale de 1 g (P1) de chaque échantillon et le met dans un creuset résistant à 1000 °C. On met le tout dans un four à 1000 °C pendant 1 heure et on pèse le reste de l'échantillon (P2), masse finale. La perte au feu est donnée donc par l'équation suivante :

$$\text{PAF} = 100 \% - 100 * (\text{P2/P1}) \quad (39)$$

La distribution verticale des proportions de ces composés en fonction de la profondeur montre qu'il y a une grande similitude dans leur évolution. En effet, le K<sub>2</sub>O, le CaO, le TiO<sub>2</sub> évoluent de la même manière mais avec des proportions différentes, les proportions du K<sub>2</sub>O évoluent de 0,338% à 1,652% ; le CaO se trouve entre 3,044% et 12,088% ; le TiO<sub>2</sub> évolue entre 0,081% et 0,559%. On remarque la présence de deux pics significatifs de « valeur minimale » à 5 cm et à 14 cm de profondeur. Le pic « min » de 14 cm de profondeur est vérifié aussi dans l'évolution verticale des proportions des oxydes MnO, Na<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et SO<sub>3</sub>. Aussi le « pic » de 5 cm de profondeur est « présent » dans l'allure de distributions des proportions du MgO et du Na<sub>2</sub>O en fonction de la profondeur mais avec une faible valeur. L'évolution est entre 0,034% et 0,021% pour le MnO, de 0,791% à 1,329% pour le Na<sub>2</sub>O, de 3,735% à 4,306% pour le MgO, de 0,125% à 0,454% pour le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et entre 0,247% à 0,47% pour le SO<sub>3</sub>.

Les graphes de variation des proportions des composés MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et SO<sub>4</sub> en fonction de la profondeur dans la carotte I montre une évolution similaire pour les couches de 0 à 5 cm de profondeur. Deux pics très importants, l'un à 1-2 cm et l'autre à 2-3 cm de profondeur pour le MgO et le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et un pic à 2-3 cm de profondeur pour le SO<sub>3</sub> ; cela peut être lié au taux de la matière organique.

Le SiO<sub>2</sub> et l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, évoluent inversement aux TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO. L'évolution d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est entre 13,53 % et 17,61 % et de 40,55 % à 51,31 % pour le SiO<sub>2</sub>. Le pic à 12-14 cm de profondeur est bien identifié dans les graphes de ces deux oxydes, mais le pic à 4-5 cm de profondeur est « présent » pour le SiO<sub>2</sub> et inexistant pour l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les teneurs de ces deux oxydes montrent un facteur de corrélation assez significatif, il est de 0,84 (figure 67).

Les teneurs du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en fonction de la profondeur dans la carotte évoluent entre 4,43 % et 4,75 % avec la présence d'un pic significatif à 12-14 cm de profondeur où on observe une teneur maximale de (4,75 %). L'oxyde de fer représente le troisième principal constituant dans le sédiment analysé.

L'étude de corrélation entre tous ces éléments nous montre qu'il y a une forte corrélation entre le TiO<sub>2</sub> et le K<sub>2</sub>O, le facteur de corrélation est de 0,967. Des moyennes de corrélation sont remarquées entre TiO<sub>2</sub> et CaO, entre K<sub>2</sub>O et CaO, et entre le MgO et le SO<sub>3</sub> (figures 63 à 66).

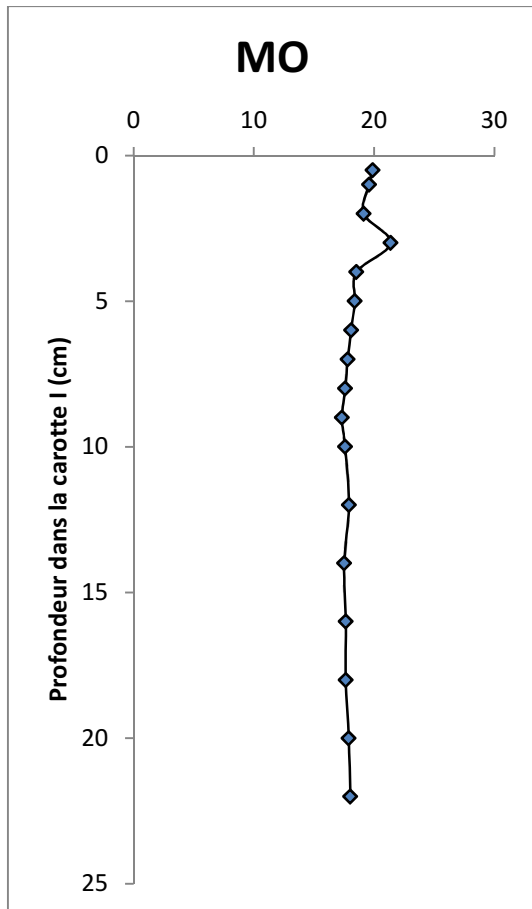


Figure 51 : Distribution des pourcentages de la matière brûlée en fonction de la profondeur dans la carotte I

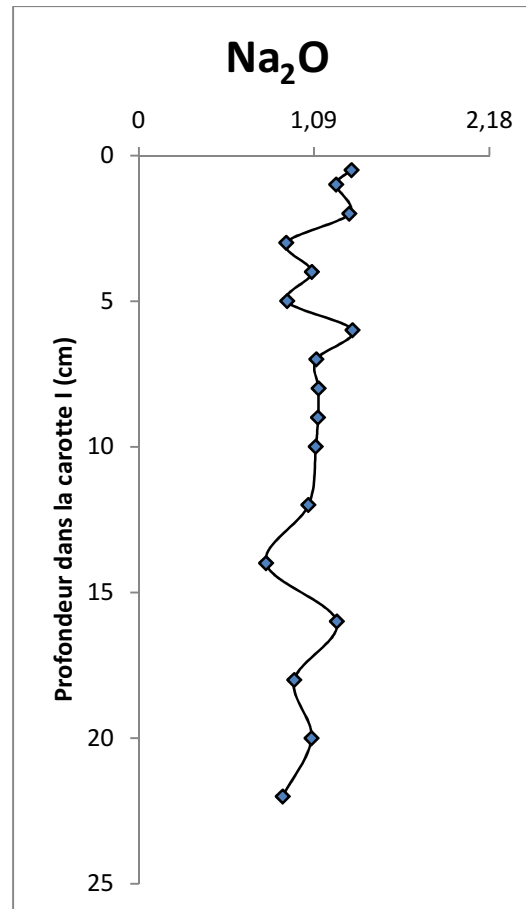


Figure 52 : Distribution des pourcentages de l'oxyde de sodium en fonction de la profondeur dans la carotte I

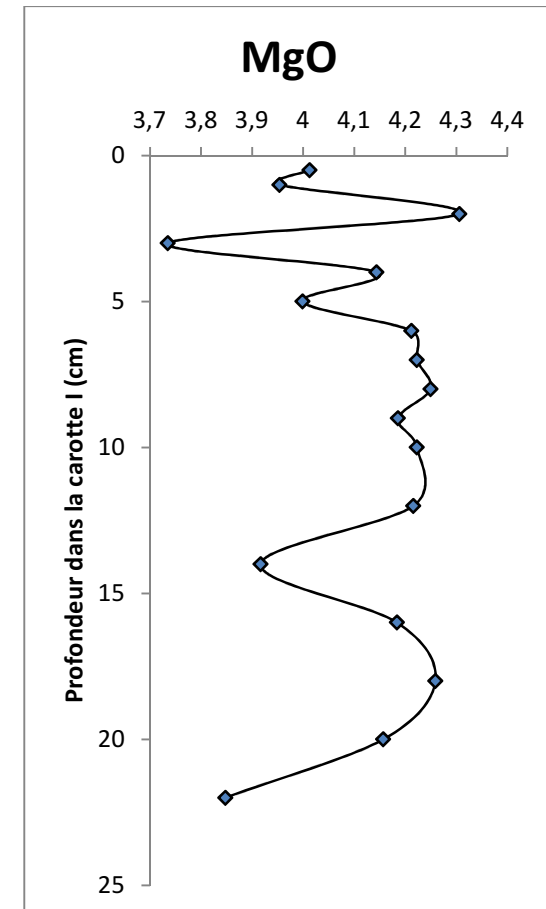
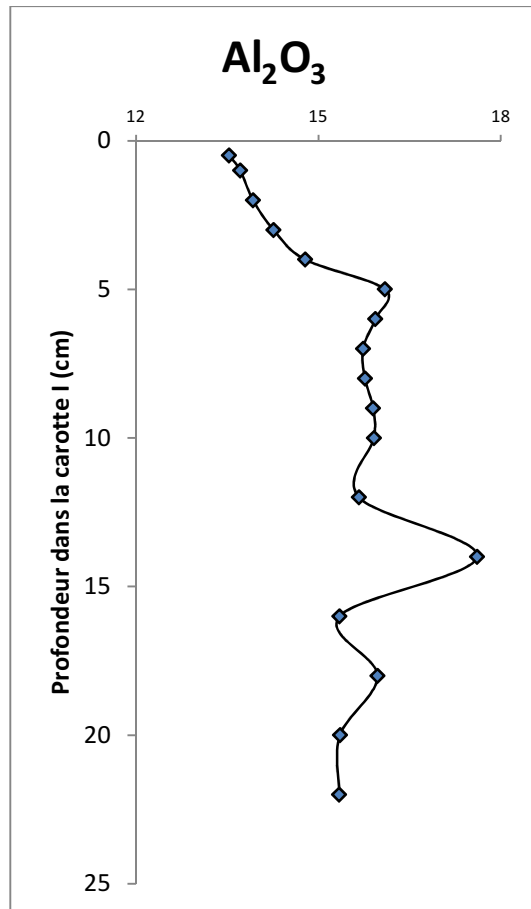
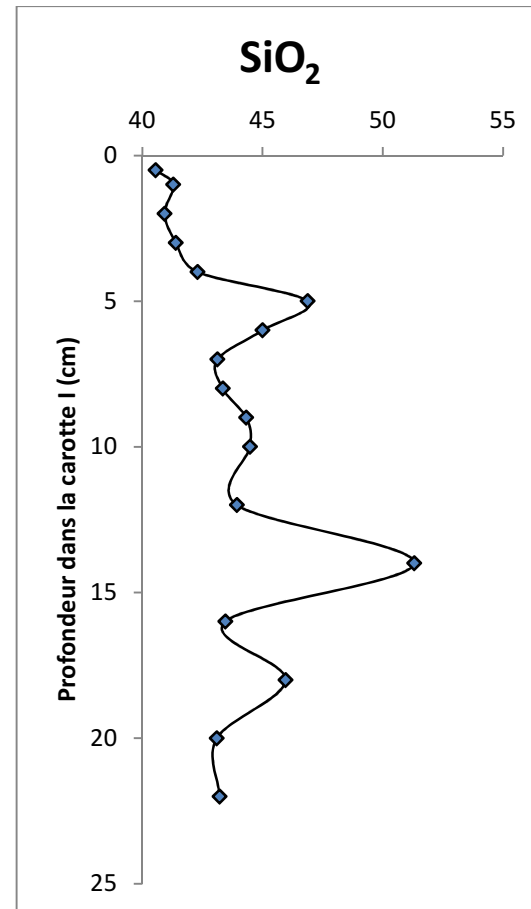


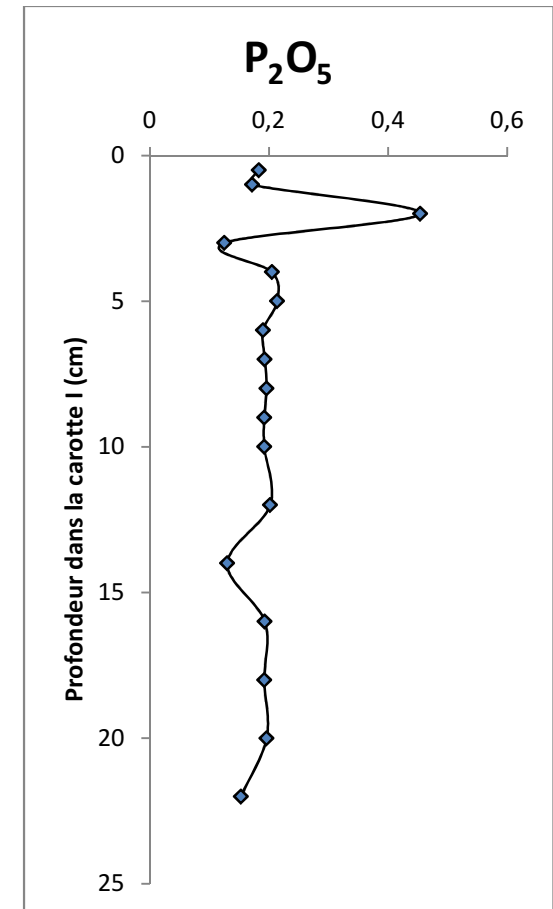
Figure 53: Distribution des pourcentages de l'Oxyde du magnésium en fonction de la profondeur dans la carotte I



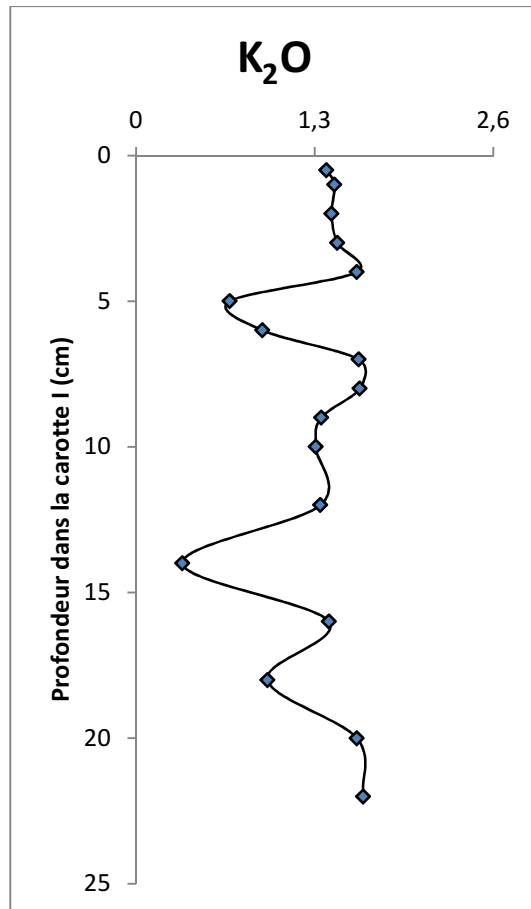
**Figure 54:** Distribution des pourcentages de l'oxyde d'Aluminium en fonction de la profondeur dans la carotte I



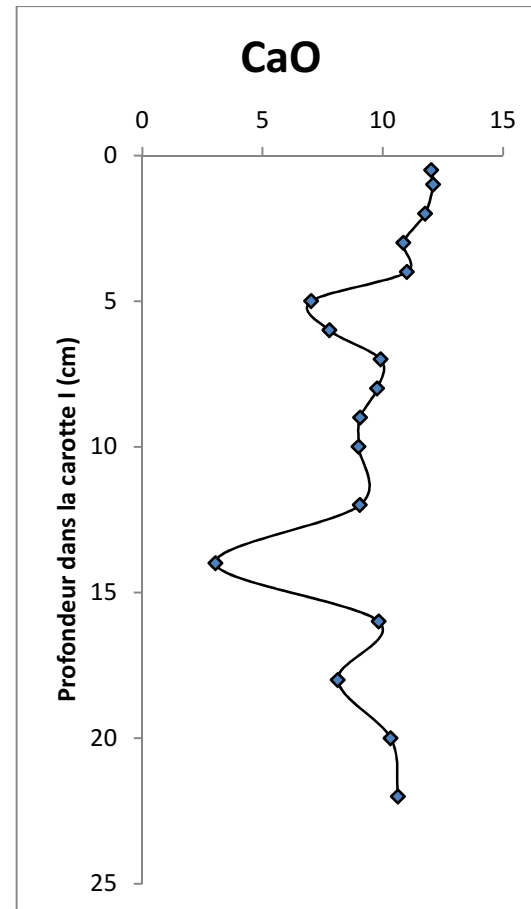
**Figure 55:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Silicium en fonction de la profondeur dans la carotte I



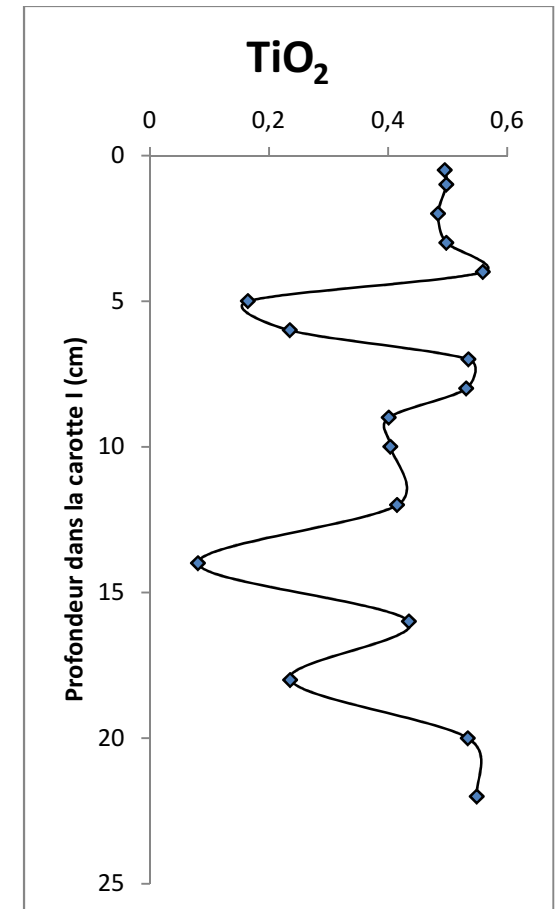
**Figure 56:** Distribution des pourcentages de Pentoxyde de Phosphore en fonction de la profondeur dans la carotte I



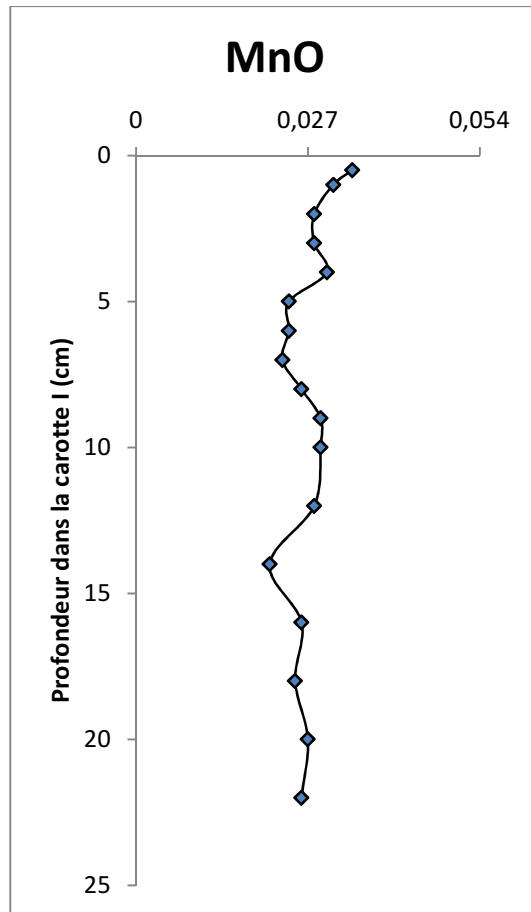
**Figure 57:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Potassium en fonction de la profondeur dans la carotte I



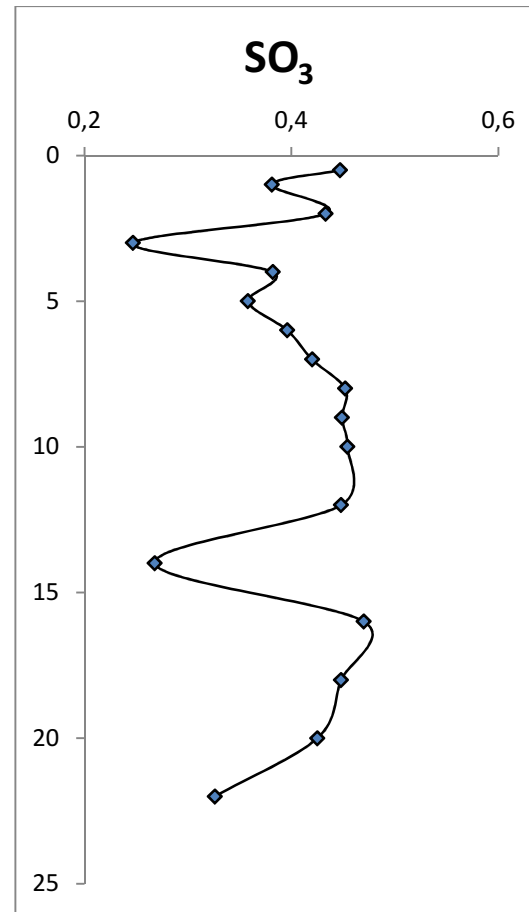
**Figure 58:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Calcium en fonction de la profondeur dans la carotte I



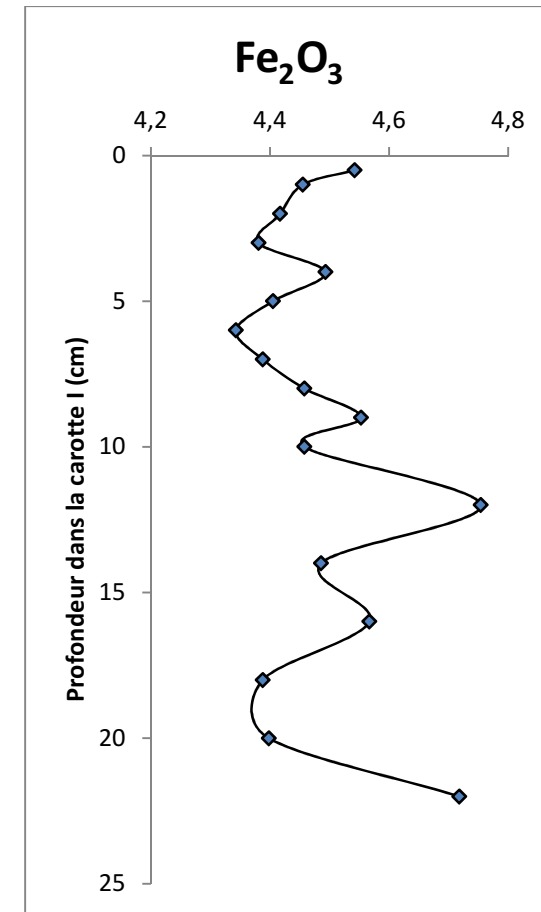
**Figure 59:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Titane en fonction de la profondeur dans la carotte I



**Figure 60:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Manganèse en fonction de la profondeur dans la carotte I



**Figure 61:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Soufre en fonction de la profondeur dans la carotte I



**Figure 62:** Distribution des pourcentages de l'oxyde de Fer en fonction de la profondeur dans la carotte I

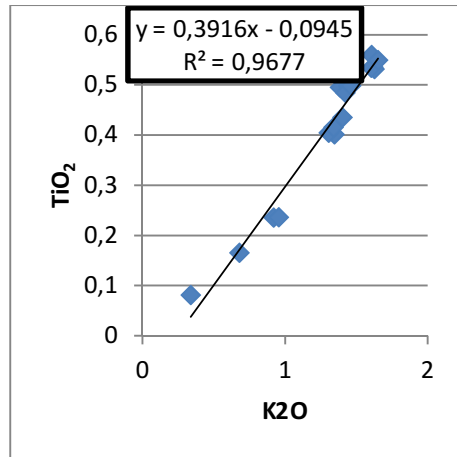


Figure 63: Corrélation entre TiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O

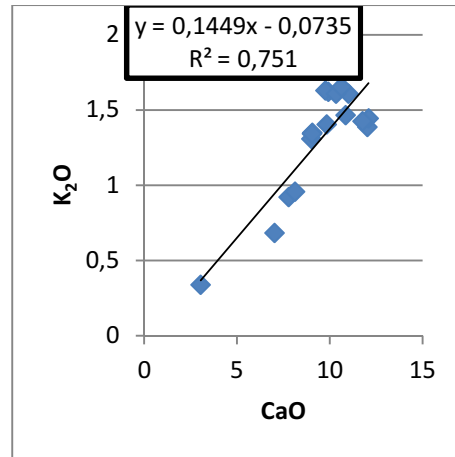


Figure 64: Corrélation entre K<sub>2</sub>O et CaO

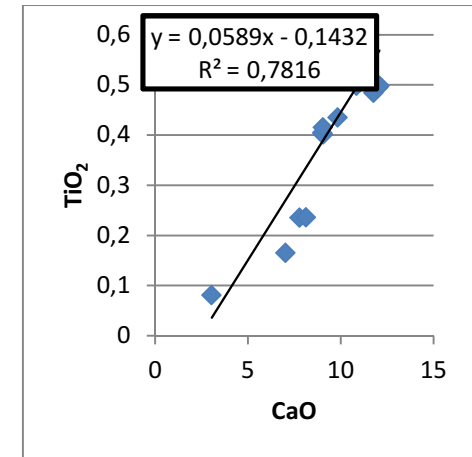


Figure 65: Corrélation entre TiO<sub>2</sub> et CaO

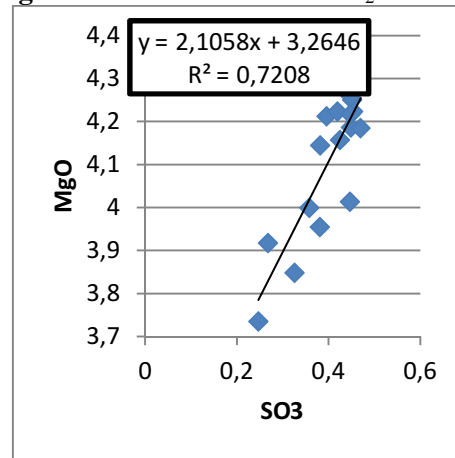


Figure 66: Corrélation entre MgO et SO<sub>3</sub>

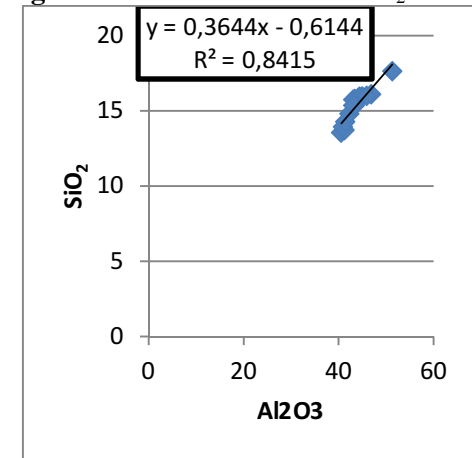


Figure 67: Corrélation entre SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Le classement des ces composés en fonction de leur abondance dans la carotte est donné par le tableau 15.

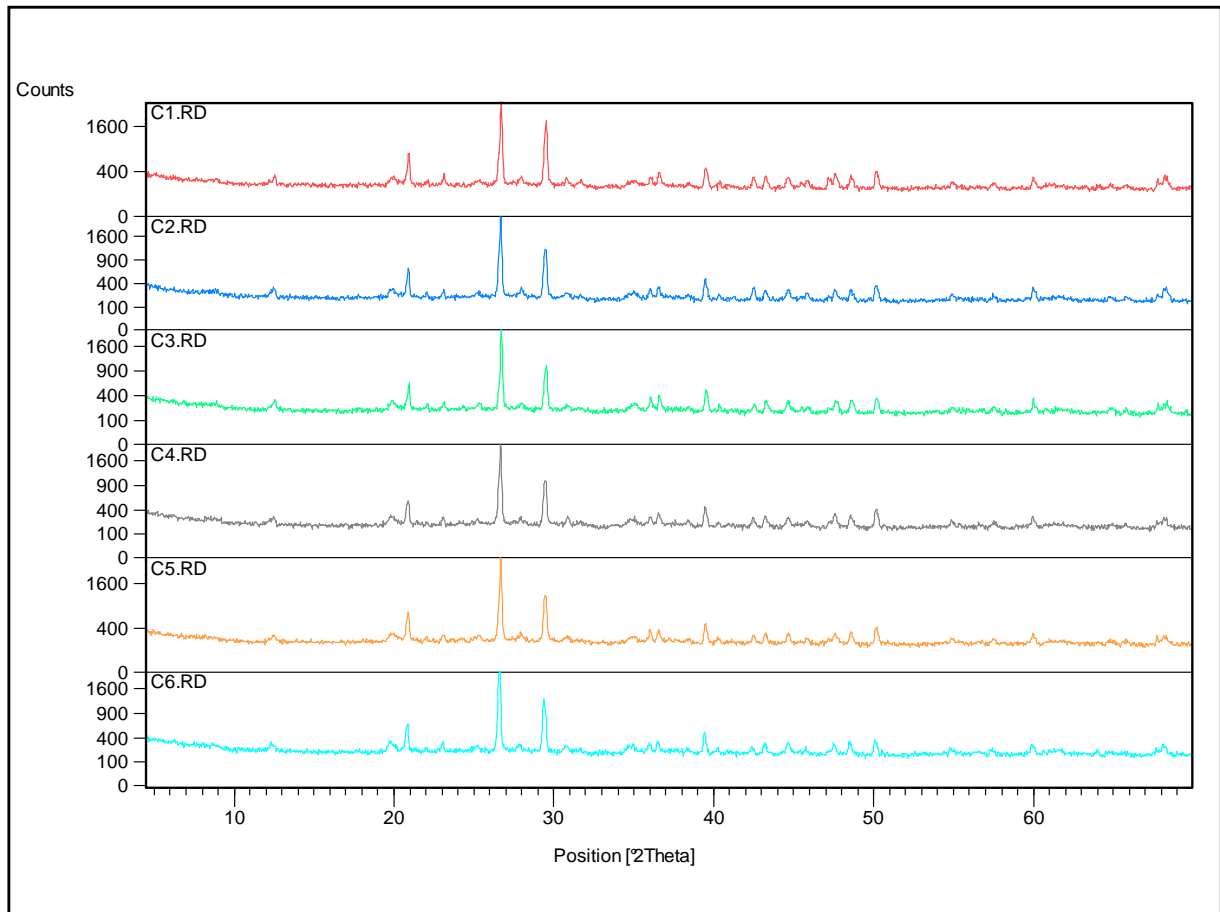
En général, la dominance de ces acides est comme suit : le  $\text{SiO}_2$  (moyenne = 43,8 %), l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,34%), le  $\text{CaO}$  (9,48%), le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4,48%), le  $\text{MgO}$  (4,10%), le  $\text{K}_2\text{O}$  (1,30%), le  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,09%), le  $\text{TiO}_2$  (0,41%), le  $\text{SO}_3$  (0,400%), le  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,19%) et enfin le  $\text{MnO}$  (0,027%).

**Tableau 15:** Abondances des différents acides dans chaque couche sédimentaire de la carotteI

| Echantillon       | Abondance (%)  |                         |                         |                         |              |                       |                       |                |                        |                        |              |
|-------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------|------------------------|------------------------|--------------|
|                   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-0.5 cm</b> | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-1 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-2 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-3 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-4 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-5 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{SO}_3$  | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{TiO}_2$         | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-6 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-7 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-8 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-9 cm</b>   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-10 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-12 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-14 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$            | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{SO}_3$  | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{TiO}_2$         | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-16 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-18 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{SO}_3$  | $\text{TiO}_2$         | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-20 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |
| <b>C50-22 cm</b>  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$            | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$  | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SO}_3$          | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{MnO}$ |

### III. Les constituants minéralogiques de la carotte I

D'après les spectres des différentes couches sédimentaires de la carotte I (figure 36), cette dernière a les mêmes compositions minéralogiques, et par conséquent les concentrations des radioéléments d'intérêts identifiés et présentés dans ce travail n'apparaient pas qu'ont des relations avec cette composition minéralogique.



**Figure 63:** Spectres des six échantillons de la carotte I analysée par diffraction X au CRNB

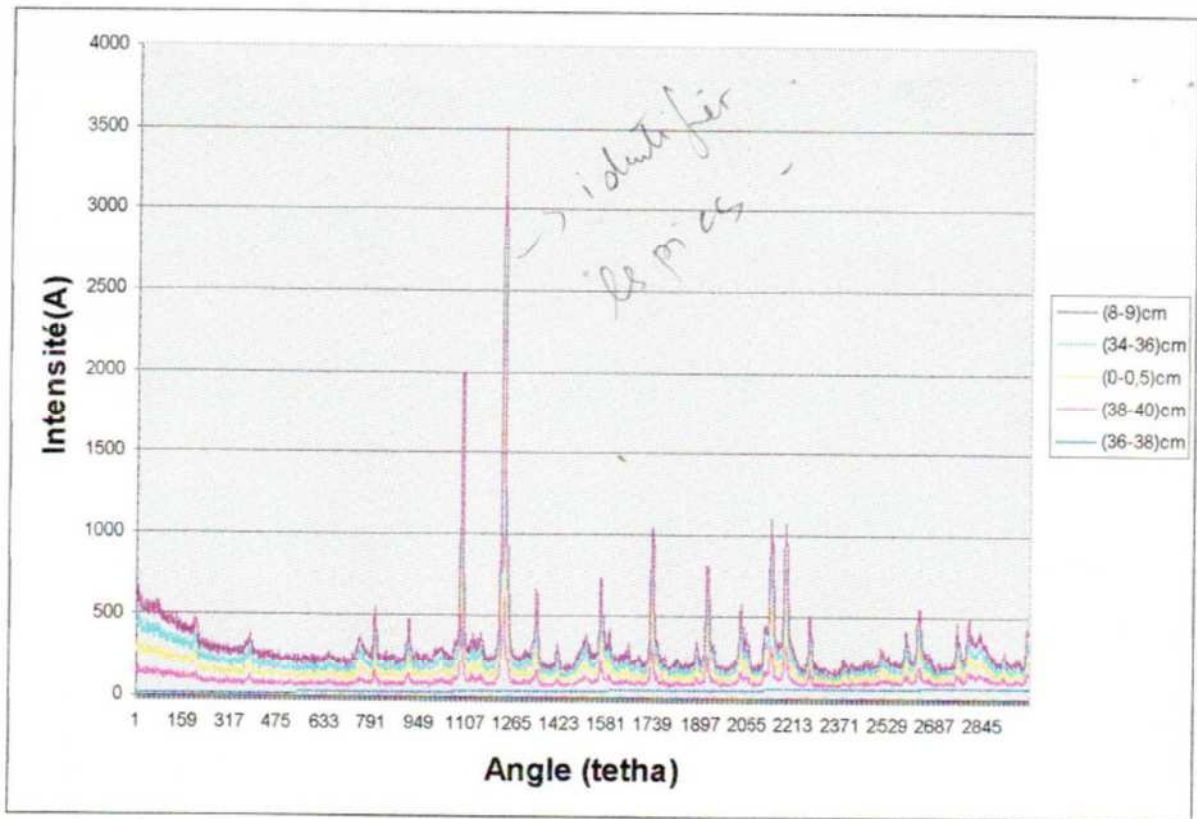
Les spectres présentés ci-dessus sont traités par un logiciel spécifique et lui nous donnant, si la chaîne de mesure est très bien calibrée, toute une liste de minéraux existants dans les couches sédimentaires à titre qualitatif. Il signale la présence des minéraux suivants :

1. Quartz
2. Calcite
3. Argiles

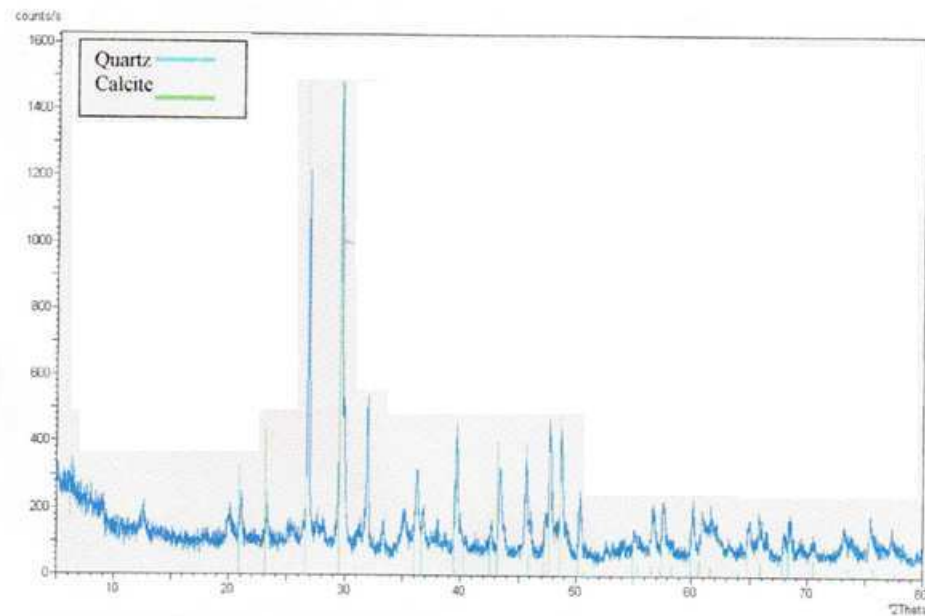
Les spectres de diffraction X de la carotte I sont très comparables à ceux d'une carotte prélevée au sud de la Sardaigne (figure 64 et 65). Les spectres enregistrés ont montrés la dominance de deux phases : la calcite et le quartz. Ce qui nous aidé à confirmer l'existence et la dominance de ces deux minéraux dans nos échantillons.

Cette dominance peut être due à un dépôt de tests calcaires et siliceux d'organismes marins à partir de la colonne d'eau ou peut être aussi due à des conditions géochimiques favorisant le phénomène de calcification et de silicification.

L'argile dans la carotte de Sardaigne est contenue dans le sédiment à faible pourcentage qui peut être aussi le cas dans nos échantillons. Ce qui implique selon Athmani (2008) que le prélèvement de la carotte a été effectué dans une zone de lente sédimentation qui est liée peut être à la présence de courants de fond qui gênent ou empêchent la décantation des particules. L'extrapolation de cette interprétation pour notre carotte on peut dire que la zone de prélèvement est soumise à un « courant » généré par les eaux de l'Oued Mazafran qui perturbe la sédimentation « calme et continue » des particules.



**Figure 64:** Les différents spectres des cinq échantillons analysés par diffraction de la carotte du Sud de la Sardaigne (Athmani, 2008)



**Figure 65 :** Spectres des phases dominantes à la profondeur (0-0.5cm) cm de la carotte sédimentaire du Sud de la Sardaigne (Athmani, 2008)

## CONCLUSION

Les concentrations du Plomb 210 dans les deux carottes augmentent de la surface à 2 cm de profondeur et ensuite elles décroissent vers les couches profondes.

Les concentrations de l'Uranium 238 diminuent légèrement d'une façon continue dans les deux carottes avec des fluctuations plus ou moins importantes dans les couches profondes de la carotte I (14-22cm de profondeur).

Les concentrations du Plomb 212 dans la carotte I augmentent légèrement de la surface jusqu'à 14 cm de profondeur et ensuite elles évoluent d'une manière plus ou moins stable. Pour la carotte II, les concentrations du Plomb 212 gardent une tendance d'augmenter d'une façon très légère.

Ce qui concerne le Plomb 214, leurs concentrations au niveau des différentes couches de la carotte I sont plus ou moins similaires. Même distribution est observée dans la carotte II. Cette constatation était vérifiée aussi pour le Bismuth 214.

Pour le Césium 137, leur distribution est similaire dans les deux carottes avec des faibles concentrations et parfois nulles dans quelques couches.

Les concentrations de l'Actinium 228 dans les deux carottes augmentent de la surface vers les couches profondes mais avec des valeurs plus ou moins distinctes.

Le Potassium 40 comporte en gardant une certaine homogénéité dans leur variation verticale qui est jugée faible voire quasi-constante.

Tout ces distributions ne signent pas l'existence d'un ou des phénomènes particuliers à travers les couches sédimentaires des deux carottes. Outre, les concentrations de tous ces radioéléments d'intérêts sont très comparables entre eux et aussi avec des données d'une carotte sédimentaire prélevée en septembre 1997 ce qu'on constate que les processus des flux et de comportement des radioéléments d'intérêts ainsi présentés dans ce travail n'ont pas significativement changés.

La vitesse de sédimentation dans la région d'étude est de 0,22 cm/an. Cette vitesse de sédimentation est similaire à celle estimée en baie d'Alger par Taib Errahmani (2012) et

comparable à celle déterminée par Nouredine et al (2003) dans la même région de notre étude (0,18 cm/an).

Des analyses par spectrométrie de fluorescence X des échantillons de la carotte I nous ont permis d'identifier onze oxydes entrant dans la composition chimique de cette carotte qui sont : l'Oxyde de Sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), l'Oxyde du Magnésium ( $\text{MgO}$ ), le Trioxyde d'Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), le Dioxyde de Silicium ( $\text{SiO}_2$ ), le Pentoxyde de Phosphore ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), l'Oxyde de Potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ), l'Oxyde de Calcium ( $\text{CaO}$ ), le Dioxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ), l'Oxyde du Manganèse, le Trioxyde du Fer et l'Oxyde du Soufre.

Ces oxydes sont classés au terme de dominance comme suit : le  $\text{SiO}_2$  (moyenne = 43,8 %), l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,34%), le  $\text{CaO}$  (9,48%), le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4,48%), le  $\text{MgO}$  (4,10%), le  $\text{K}_2\text{O}$  (1,30%), le  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,09%), le  $\text{TiO}_2$  (0,41%), le  $\text{SO}_3$  (0,40%), le  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,19%) et enfin le  $\text{MnO}$  (0,03%).

Une analyse des échantillons de la carotte I par diffraction X était faite pour avoir des informations sur les constituants minéralogiques de cette carotte et pour bien attacher aux constituants chimiques leur vraie contribution dans la formation des minéraux.

Les spectres enregistrés donnent des informations purement qualitatives qui demandent une authentification par d'autres travaux.

Les spectres signalent la présence du Quartz, de la Calcite, et des types d'Argiles. Ces résultats sont vérifiés aussi dans l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée au Sud de la Sardaigne.

La dominance du Quartz et de la Calcite dans la carotte est peut être due à un dépôt de tests calcaires et siliceux d'organismes marins à partir de la colonne d'eau ou peut être aussi due à des conditions géochimiques favorisant le phénomène de calcification et de silicification.

Pour les argiles, dans la carotte de Sardaigne est contenue dans le sédiment à faible pourcentage qui peut être aussi le cas dans nos échantillons. Ce qui implique selon Athmani (2008) que le prélèvement de la carotte a été effectué dans une zone de lente sédimentation qui est liée peut être à la présence de courants de fond qui gênent ou empêchent la décantation des particules. L'extrapolation de cette interprétation pour notre carotte on peut dire que la zone de prélèvement est soumise à un « courant » généré par les eaux de l'Oued Mazafran qui perturbe la sédimentation « calme et continue » des particules.

**BIBLIOGRAPHIE**

**Allen J.R, Rae J.E, Longworth G, Hasler S.E, Ivanovich M, 1993**, A comparison of the  $^{210}\text{Pb}$  dating technique with three other independent dating methods in an oxic estuarine salt-marsh sequence, *Estuaries* Vol. 16, N° 3B, 670-677.

**Amiard et Amiard-Triquet, 1980**, *Radiologie des milieux aquatiques*, Masson.

**Ancellin J, Guegueniat P et Germain P, 1979**, Radioécologie marine, Etude du devenir des radionucléides rejetés en milieu marin et applications à la radioprotection, Ed Eyrolles.

**Anna DI Laura, Froinçois Fernex, Giuliano Fierro, Jean-Luc Ferrand, Jean-Pierre Pupin, Joël Gasparro, 2004**, Geochemical approach to the sedimentary evolution of the bay of Nice (NW Mediterranean sea), *Continental shelf research* 24, 223-239.

**Appleby P.G and Oldfield F, 1983**, The assessment of  $^{210}\text{Pb}$  data from sites with varying sediment accumulation rates, *Hydrobiologia* 103, 29-35.

**Appleby P.G and Oldfield F, 1992**, Applications of  $^{210}\text{Pb}$  to sedimentation studies. In: M. Ivanovich and R.S Harmon, Editors, Uranium-Séries disequilibrium, Applications to earth, Marine and environmental sciences (2<sup>nd</sup> Ed), Oxford sciences, Oxford, 731-778.

**Arabi, 1997**, *Evaluation de la vitesse de sédimentation par le Cs-137 et les métaux lourds dans une colonne de sédiment au site d'El Kittani (Baie d'Alger)*, mémoire d'ingénieur en génie de l'environnement, université de Blida.

**Athmani H, 2008**, Géochimie et pollution par les métaux lourds dans les sédiments profonds de la Mer Méditerranée, Mémoire de Magister en Environnement et Ecosystèmes littoraux, ISMAL.

**Bicheron G, 1995**, Développement d'un système d'aide à l'interprétation des spectres gamma : application aux mesures de l'environnement, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier.

**Bonté P, 2006**, Optimisation des systèmes d'irrigation et de la gestion des eaux de surface, « Utilisation des techniques radio-isotopiques pour l'étude des problèmes d'envasement des retenues de barrage », Rapport de mission d'expert, IAEA-TCR-03123, projet N° : C3--ALG/5/021 03 01.

**Burton J, 1975**, Radioactive nuclides in the marine environment. In: Chemical oceanography 2<sup>nd</sup> Ed. 3, pp. 91-191. Riley J et Skirrow G, Ed. Londres : Academic Press.

**Caillot, 2002**, La radioactivité au service de l'industrie et de l'environnement, Ed Tec et Doc, Paris.

**Centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne**, Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation, Axe : « Génie des Procédés ».

**Charles, 2007**, Energie nucléaire, fission et fusion, Ed. Ellipses.

**Charlie Fisher, 1980**, Les radioéléments et leurs utilisations, Série de synthèse, Commissariat à l'Energie Atomique, Eyrolles, Paris.

**Colle C, Adam C, Garnier-Laplace J, Roussel-Debet S, Beaugelin-Seiller K, Germain P, 2005**, Césium 137 et environnement, Fiche radionucléide, Direction de l'environnement et de l'intervention, Service des comportements des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, France.

**De Viguerie L, Solé V.A., et Walter P, 2011**, Analyse de tableaux de Léonard de Vinci par spectrométrie de fluorescence des rayons X, Techniques de l'Ingénieur.

**Debertin K and Helmer R.G, 1988**, Gamma and X-ray spectrometry with semiconductors, North Holland.

**Despujols J, 2000**, Spectrométrie d'émission des rayons X. Fluorescence X, Traité Analyse et Caractérisation, Technique d'Ingénieur.

**Eisenbud, 1973**, Environmental radioactivity, 2<sup>ème</sup> Ed, Academic Press.

**Friedlander G, Kennedy JW, Macias ES, Miler JM, 1981**, Nuclear and radiochemistry, 3rd Edition, a Wiley-interscience publication, Ed John Wiley.

**Granier-Laplace J, Colle C, Morello M, Bonin B, 2001**, Uranium naturel et environnement, Fiche radionucléide, Direction de l'environnement et de l'intervention, Service des comportements des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, France.

**Grimes S, 2003**, Biodiversité marine et littorale algérienne, Ed. Djazaïr.

**Grimes S, 2004**, Bilan et diagnostic, Protection des sites sensibles naturels marins du secteur Cap Djinet au Mont Chenoua.

**Hammadi, 1996**, *Détermination du niveau de référence de la radioactivité autour du réacteur de recherche (NUR)*, mémoire post-graduation spécialisée en génie nucléaire (Radioprotection), CDTN.

**Henner P, Garcia-Sanchez L, Colle C, 2003**, Bismuth 210 et environnement, Fiche radionucléide, Direction de l'environnement et de l'intervention, Service des comportements des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, France.

**Henner P, Garcia-Sanchez L, Colle C, 2002**, Thorium 232 et environnement, Fiche radionucléide, Direction de l'environnement et de l'intervention, Service des comportements des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, France.

**Holm, 1994**, *Radioecology, lectures in the environmental radioactivity*. World scientific.

**Houma F., 2009**. Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. *Thèse de doctorat, université du Val de Marne Paris XII France* : 272 P.

**IAEA, 1981**, Dispersion atmosphérique et choix des sites des centres nucléaires, Collection sécurité N° 50 SG-S3, Vienne.

**IAEA, 2005**, Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS), Radionuclide levels in oceans and seas, Final report of a coordinated research project, ISSN 1011-4289, Tec et Doc.

**INAL A, 2011**, Les métaux traces dans les sédiments de la baie de Bou-Ismaïl : Surveillance de la pollution et étude des processus géochimiques, Thèse de Magister en Sciences de la mer, ENSSMAL.

**Jean-Pierre ROUCAN, 1994**, Minéraux naturels, Traité Constantes physico-chimiques, Techniques de l'Ingénieur.

**Johnsen Ole, 2002**, L'encyclopédie des minéraux, Ed. Delchaux et Niestlé, Paris.

**Joseph A, Gustafson P, Russell I, Schuert E, Volchok H, Tamplin A, 1971**, Sources of radioactivity and their characteristics. In: Radioactivity in the marine environment, pp 6-41. Washington: National Academy of Sciences.

**Kathren R. L, 1984**, *Radioactivity in the environmental, sources distribution and surveillance*, Harwood Academic Publishers.

**Le Petit G et Granier G, 2002**, Spectrométrie gamma appliqué aux échantillons de l'environnement, dossier de recommandation pour l'optimisation des mesures, CETAMA, Lavoisier.

**Leclaire L, 1972**, *La sédimentologie holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares*, mémoire du Muséum National d'Histoire Naturelle.

**LEM., 1998**. Laboratoire d'Etudes Maritime, Etude de délimitation d'une zone d'extraction de sable en baie d'Alger.

**Masticoff G, Robbins J.A, 1987**, A model for biological mixing of sediments, J. Geolog. Educ., 35, 144-149.

**Mokrani, 1998**, Aménagement du port de Bou-Haroun : contribution à l'étude d'envasement et dragage. Mémoire d'ingénieur en Sciences de la mer, ISMAL.

**Noureddine, 2007**, *Distribution de la radioactivité artificielle, Cs-137, Am-241, et isotopes du Plutonium, et de la radioactivité naturelle, Pb-210, dans des colonnes d'eau et des carottes de sédiments le long du littoral algérien*, Thèse de doctorat en physique nucléaire, USTHB.

**Noureddine A, Benkrid M, Hammadi A, Boudjenoun R, Menacer M, Khaber A et Kecir M.S, 2003**, Radioactivity distribution in surface and core sediment of the central part of the Algerian coast: an estimation of the recent sedimentation rate, Mediterranean Marine Science, Vol. 4/2,p: 53-58.

**Paakola O, 1989**, Assessing *environmental radioactivity, international symposium*, Vienna.

**Radakovitch O, Guillen J, Arnaud M, Bouisset P, 1999**,  $^{210}\text{Pb}$  and Caesium accumulation in the Rhone delta sediments, Estuarine coastal shelf science 48 (1), 77-92.

**Riley JP, Skirrow G, 1975**, Chemical oceanography, 3, 2<sup>nd</sup> Edition. Academic Press, London, New-York, San Francisco.

**Samari N, 2008**, Qualité physico-chimique, sels nutritifs et bactériologique dans la baie de Bou-Ismaïl et le port de Bou-Haroun, Thèse d'Ingénieur en Sciences de la mer, Ismaïl.

**Saxena D.P, Joos P, Van Grieken R, Subramanian V, 2002**, Sedimentation rate of the floodplain sediments of the Yamuna river basin (tributary of the river Ganges, India) by using <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs techniques, Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, Vol 251, N° 3, 399-408.

**Zeghdoudi E, 2006**, Modélisation bioéconomique des pêcheries méditerranéennes, Application aux petits pélagiques de la baie de Bou-Ismaïl (Algérie), mémoire de Master, université de Barcelone, Espagne.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Conditionnement des échantillons

**Tableau 1:** Volet conditionnement des échantillons de la Carotte I (de 50 mètre)

| <b>Couches</b> | <b>Poids total (g) (Ech et tare)</b> | <b>Hauteur (cm)</b> | <b>Poids frais (g)</b> | <b>Poids sec (g) (échantillon broyé)</b> | <b>Pourcentage (% : rapport * 100)</b> | <b>Observation</b> |
|----------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------|--|--|--------------------|
| C50-0.5 cm     | 21.47                                | 0.5                 | 19.46                  | 9  | 46.25                                  |                    |
| C50-1 cm       | 56.40                                | 0.5                 | 54.39                  | 29                                       | 53.32                                  |                    |
| C50-2 cm       | 78.23                                | 1                   | 76.22                  | 43                                       | 56.42                                  |                    |
| C50-3 cm       | 87.31                                | 1                   | 85.3                   | 51                                       | 59.79                                  |                    |
| C50-4 cm       | 119.42                               | 1                   | 117.41                 | 71                                       | 60.47                                  |                    |
| C50-5 cm       | 97.28                                | 1                   | 95.27                  | 61                                       | 64.03                                  |                    |
| C50-6 cm       | 88.52                                | 1                   | 86.51                  | 57                                       | 65.89                                  |                    |
| C50-7 cm       | 105.33                               | 1                   | 103.32                 | 71                                       | 68.72                                  | Ver                |
| C50-8 cm       | 92.57                                | 1                   | 90.56                  | 61                                       | 67.36                                  |                    |
| C50-9 cm       | 120.56                               | 1                   | 118.55                 | 81                                       | 68.33                                  |                    |
| C50-10 cm      | 92.19                                | 1                   | 90.18                  | 63                                       | 69.86                                  |                    |
| C50-12 cm      | 194.59                               | 2                   | 192.58                 | 133                                      | 69.06                                  |                    |
| C50-14 cm      | 194.908                              | 2                   | 192.898                | 135                                      | 69.99                                  |                    |
| C50-16 cm      | 211.07                               | 2                   | 209.06                 | 145                                      | 69.36                                  |                    |
| C50-18 cm      | 186.76                               | 2                   | 184.75                 | 131                                      | 70.91                                  |                    |
| C50-20 cm      | 204.21                               | 2                   | 202.2                  | 141                                      | 69.73                                  |                    |
| C50-22 cm      | 196.70                               | 2                   | 194.69                 | 135                                      | 69.34                                  |                    |

**Tableau 2:** Volet conditionnement des échantillons de la carotte II (de 30 mètre)

| <b>Couche s</b> | <b>Poids total (g) (Ech et tare)</b> | <b>Hauteur (cm)</b> | <b>Poids frais (g)</b> | <b>Poids sec (g) (échantillon broyé)</b> | <b>Pourcentage (% : rapport * 100)</b> | <b>Poids sec à analyser</b> | <b>Observation</b>         |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------|--|--|-----------------------------|----------------------------|
| C30-0.5 cm      | 18.935                               | 0.5                 | 16.925                 | 7  | 41.36                                  | 6                           | Néant                      |
| C30-1 cm        | 39.29                                | 0.5                 | 37.28                  | 21                                       | 56.33                                  | 20                          | Néant                      |
| C30-2 cm        | 97.16                                | 1                   | 95.15                  | 61                                       | 64.11                                  | 60                          | Débris de coquilles        |
| C3-03 cm        | 101.582                              | 1                   | 99.572                 | 69                                       | 69.30                                  | 70                          | =                          |
| C30-4 cm        | 105.78                               | 1                   | 103.77                 | 75                                       | 72.28                                  | 74                          | =                          |
| C30-6 cm        | 211.1                                | 2                   | 209.09                 | 155                                      | 74.13                                  | 156                         | Débris et le (gastéropode) |
| C30-7 cm        | 101.844                              | 1                   | 99.834                 | 75                                       | 75.12                                  | 74                          | Moins de débris            |
| C30-8 cm        | 96.27                                | 1                   | 94.26                  | 71                                       | 75.32                                  | 70                          | =                          |
| C30-9 cm        | 108.45                               | 1                   | 106.44                 | 81                                       | 76.10                                  | 80                          | =                          |
| C30-10 cm       | 128.58                               | 1                   | 126.57                 | 97                                       | 76.64                                  | 96                          | =                          |
| C30-12 cm       | 229.44                               | 2                   | 227.43                 | 167                                      | 73.43                                  | 166                         | =                          |
| C30-14 cm       | 209.22                               | 2                   | 207.21                 | 151                                      | 72.87                                  | 150                         | =                          |
| C30-fin         | 57.374                               | Le reste            | 55.364                 | 39                                       | 70.44                                  | 38                          | Néant                      |

**Annexe 2 : Conditionnement pour la XRF**

**Tableau 1 : Masses des échantillons de la Carotte I utilisés pour analyse XRF**

| <b>Couches</b> | <b>Hauteur (cm)</b> | <b>Masse (g)</b> |
|----------------|---------------------|------------------|
| C50-0.5 cm     | 0.5                 | 8                |
| C50-1 cm       | 0.5                 | 10               |
| C50-2 cm       | 1                   | 10               |
| C50-3 cm       | 1                   | 10               |
| C50-4 cm       | 1                   | 9                |
| C50-5 cm       | 1                   | 8                |
| C50-6 cm       | 1                   | 10               |
| C50-7 cm       | 1                   | 10               |
| C50-8 cm       | 1                   | 10               |
| C50-9 cm       | 1                   | 8                |
| C50-10 cm      | 1                   | 8                |
| C50-12 cm      | 2                   | 10               |
| C50-14 cm      | 2                   | 12               |
| C50-16 cm      | 2                   | 10               |
| C50-18 cm      | 2                   | 8                |
| C50-20 cm      | 2                   | 10               |
| C50-22 cm      | 2                   | 10               |

**Annexe 3 : Résultats pour calcul des activités des radioéléments recherchés**

**Tableau 1 : Valeurs des efficacités des différents radioéléments d'intérêt en fonction de la masse des échantillons de la carotte I.**

| Echantillon  | Masse (g) | Efficacités carotte I |       |        |        |        |        |        |      |
|--------------|-----------|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|              |           | Pb-210                | U-238 | Pb-212 | Pb-214 | Bi-214 | Cs-137 | Ac-228 | K-40 |
| C50 - 0.5 cm | 42        | 7,32                  | 9,49  | 5,73   | 3,37   | 1,48   | 1,32   | 0,87   | 0,58 |
| C50 - 1 cm   | 22        | 6,91                  | 9,05  | 5,24   | 3,12   | 1,40   | 1,25   | 0,82   | 0,54 |
| C50 - 2 cm   | 8         | 6,63                  | 8,74  | 4,90   | 2,94   | 1,35   | 1,20   | 0,79   | 0,51 |
| C50 - 3 cm   | 50        | 6,47                  | 8,57  | 4,71   | 2,84   | 1,32   | 1,18   | 0,78   | 0,49 |
| C50 - 4 cm   | 61        | 6,24                  | 8,32  | 4,44   | 2,69   | 1,27   | 1,14   | 0,76   | 0,46 |
| C50 - 5 cm   | 52        | 6,42                  | 8,52  | 4,66   | 2,81   | 1,31   | 1,17   | 0,77   | 0,48 |
| C50 - 6 cm   | 2         | 6,51                  | 8,61  | 4,75   | 2,86   | 1,32   | 1,18   | 0,78   | 0,49 |
| C50 - 7 cm   | 70        | 6,06                  | 8,13  | 4,22   | 2,58   | 1,23   | 1,11   | 0,74   | 0,44 |
| C50 - 8 cm   | 54        | 6,38                  | 8,48  | 4,61   | 2,78   | 1,30   | 1,16   | 0,77   | 0,48 |
| C50 - 9 cm   | 74        | 5,98                  | 8,04  | 4,12   | 2,53   | 1,22   | 1,09   | 0,73   | 0,44 |
| C50 - 10 cm  | 54        | 6,38                  | 8,48  | 4,61   | 2,78   | 1,30   | 1,16   | 0,77   | 0,48 |
| C50 - 12 cm  | 123       | 4,92                  | 6,89  | 3,37   | 2,10   | 1,05   | 0,94   | 0,63   | 0,37 |
| C50 - 14 cm  | 123       | 4,92                  | 6,89  | 3,37   | 2,10   | 1,05   | 0,94   | 0,63   | 0,37 |
| C50 - 16 cm  | 138       | 4,57                  | 6,51  | 3,30   | 2,05   | 1,00   | 0,90   | 0,60   | 0,36 |
| C50 - 18 cm  | 123       | 4,92                  | 6,89  | 3,37   | 2,10   | 1,05   | 0,94   | 0,63   | 0,37 |
| C50 - 20 cm  | 133       | 4,69                  | 6,64  | 3,32   | 2,07   | 1,02   | 0,92   | 0,61   | 0,36 |
| C50 - 22 cm  | 128       | 7,40                  | 9,18  | 3,34   | 2,08   | 1,03   | 0,93   | 0,62   | 0,36 |

**Tableau 2:** Valeurs des efficacités des différents radioéléments d'intérêt en fonction de la masse des échantillons de la carotte II.

| Echantillon | Masse (g) | Efficacité |       |        |        |        |        |        |      |
|-------------|-----------|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|             |           | Pb-210     | U-238 | Pb-212 | Pb-214 | Bi-214 | Cs-137 | Ac-228 | K-40 |
| C30-0.5 cm  | 6         | 7,36       | 9,53  | 5,78   | 3,40   | 1,49   | 1,33   | 0,87   | 0,59 |
| C30-1 cm    | 20        | 7,07       | 9,22  | 5,44   | 3,22   | 1,44   | 1,28   | 0,84   | 0,56 |
| C30-2 cm    | 60        | 6,26       | 8,35  | 4,46   | 2,71   | 1,27   | 1,14   | 0,76   | 0,47 |
| C3-03 cm    | 70        | 6,06       | 8,13  | 4,22   | 2,58   | 1,23   | 1,11   | 0,74   | 0,44 |
| C30-4 cm    | 74        | 5,98       | 8,04  | 4,12   | 2,53   | 1,22   | 1,09   | 0,73   | 0,44 |
| C30-6 cm    | 156       | 4,21       | 6,11  | 3,17   | 1,96   | 0,95   | 0,86   | 0,57   | 0,34 |
| C30-7 cm    | 74        | 5,98       | 8,04  | 4,12   | 2,53   | 1,22   | 1,09   | 0,73   | 0,44 |
| C30-8 cm    | 70        | 6,06       | 8,13  | 4,22   | 2,58   | 1,23   | 1,11   | 0,74   | 0,44 |
| C30-9 cm    | 80        | 6,06       | 8,13  | 3,97   | 2,45   | 1,19   | 1,07   | 0,72   | 0,42 |
| C30-10 cm   | 80        | 5,76       | 7,80  | 3,97   | 2,45   | 1,19   | 1,07   | 0,72   | 0,42 |
| C30-12 cm   | 166       | 4,22       | 6,12  | 3,06   | 1,90   | 0,93   | 0,83   | 0,56   | 0,33 |
| C30-14 cm   | 150       | 4,43       | 6,36  | 3,24   | 2,00   | 0,97   | 0,87   | 0,58   | 0,35 |
| C30-fin     | 38        | 6,87       | 9,00  | 5,00   | 2,99   | 1,36   | 1,22   | 0,80   | 0,52 |

**Tableau 3 : Comptage du bruit de fond du détecteur N° 2**

| <b>BF</b> | <b>Pb-210</b>        | <b>U-238</b>         | <b>Pb-212</b>       | <b>Pb-214</b>       | <b>Bi-214</b>       | <b>Cs-137</b> | <b>Ac-228</b>        | <b>K-40</b>          |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------------|
| <b>2j</b> | <b>269 ± 15.22 %</b> | <b>768 ± 7.04 %</b>  | <b>488 ± 9.44 %</b> | <b>304 ± 8.48 %</b> | <b>314 ± 9.97 %</b> | -             | <b>152 ± 15.32 %</b> | <b>845 ± 4.25 %</b>  |
| <b>3j</b> | <b>357 ± 3.97 %</b>  | <b>1226 ± 5.06 %</b> | <b>689 ± 6.42 %</b> | <b>503 ± 9.05 %</b> | <b>449 ± 8.41 %</b> | -             | <b>228 ± 12.04 %</b> | <b>1149 ± 3.36 %</b> |

**Tableau 4: Comptage du bruit de fond du détecteur N° 3**

| <b>BF</b> | <b>Pb-210</b>       | <b>U-238</b>         | <b>Pb-212</b>       | <b>Pb-214</b>        | <b>Bi-214</b>       | <b>Cs-137</b> | <b>Ac-228</b>       | <b>K-40</b>          |
|-----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------|---------------------|----------------------|
| <b>1j</b> | <b>16</b>           | <b>45</b>            | <b>15</b>           | <b>39</b>            | <b>32</b>           | -             | <b>4</b>            | <b>56</b>            |
| <b>2j</b> | <b>33</b>           | <b>91</b>            | <b>31</b>           | <b>78</b>            | <b>65</b>           | -             | <b>9</b>            | <b>113</b>           |
| <b>3j</b> | <b>49 ± 68.47 %</b> | <b>136 ± 25.03 %</b> | <b>46 ± 62.44 %</b> | <b>117 ± 22.14 ±</b> | <b>98 ± 17.85 %</b> | -             | <b>13 ± 85.20 %</b> | <b>170 ± 10.78 %</b> |

**Tableau 5:** Erreurs sur les activités des radioéléments d'intérêts identifiés dans la carotte I

| Radioélément        | Les erreurs sur les activités |            |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | Pb-210                        | U-238      | Pb-212     | Pb-214     | Bi-214     | Cs-137     | Ac-228     | K-40       |
| <b>C50 - 0.5 cm</b> |                               | 0,12061589 | 0,06503925 | 0,06840065 | 0,07394159 |            | 0,11943494 | 0,0650623  |
| <b>C50 - 1 cm</b>   |                               | 0,08062258 | 0,05384423 | 0,05554401 | 0,05785722 | 0,10510475 | 0,06723245 | 0,05363043 |
| <b>C50 - 2 cm</b>   | 0,07400129                    | 0,07168349 | 0,05182942 | 0,05290937 | 0,0539013  | 0,07876359 | 0,05766944 | 0,05168029 |
| <b>C50 - 3 cm</b>   | 0,07751627                    | 0,07400129 | 0,0523676  | 0,05389826 | 0,05555947 | 0,09461296 | 0,06086723 | 0,05221935 |
| <b>C50 - 4 cm</b>   | 0,11462241                    | 0,07002747 | 0,05187682 | 0,05325962 | 0,05482533 | 0,09551187 | 0,05768721 | 0,05178023 |
| <b>C50 - 5 cm</b>   | 0,0906327                     | 0,06770032 | 0,05133696 | 0,05236312 | 0,05357712 | 0,08123029 | 0,05592978 | 0,05132702 |
| <b>C50 - 6 cm</b>   | 0,15883096                    | 0,07601769 | 0,05210662 | 0,05407484 | 0,05603023 | 0,15568921 | 0,05822776 | 0,0521286  |
| <b>C50 - 7 cm</b>   | 0,10066572                    | 0,06966305 | 0,05161254 | 0,05306558 | 0,05413731 | 0,15419661 | 0,05657102 | 0,05151274 |
| <b>C50 - 8 cm</b>   |                               | 0,0738822  | 0,05180238 | 0,05323534 | 0,05468269 |            | 0,05757024 | 0,051847   |
| <b>C50 - 9 cm</b>   |                               | 0,07002747 | 0,05136246 | 0,05274399 | 0,05401423 | 0,18371173 | 0,05555637 | 0,05138665 |
| <b>C50 - 10 cm</b>  | 0,0556032                     | 0,05519193 | 0,05119763 | 0,05309694 | 0,05536219 | 0,16775287 | 0,05909368 | 0,05269587 |
| <b>C50 - 12 cm</b>  |                               | 0,06269462 | 0,05063322 | 0,05133464 | 0,05184871 | 0,11006991 | 0,05259709 | 0,05062459 |
| <b>C50 - 14 cm</b>  | 0,08810878                    | 0,06413192 | 0,05062549 | 0,05130946 | 0,05185282 | 0,15135443 | 0,05253002 | 0,05060407 |
| <b>C50 - 16 cm</b>  | 0,1474136                     | 0,06237644 | 0,05088004 | 0,05181119 | 0,05255656 |            | 0,05362121 | 0,05089461 |
| <b>C50 - 18 cm</b>  | 0,1355471                     | 0,06796061 | 0,0509387  | 0,0519327  | 0,05284476 |            | 0,05387858 | 0,05096255 |
| <b>C50 - 20 cm</b>  | 0,50249378                    | 0,06304702 | 0,05090097 | 0,05180923 | 0,05258968 |            | 0,05366507 | 0,05090867 |
| <b>C50 - 22 cm</b>  |                               | 0,06702262 | 0,05099206 | 0,05263962 | 0,05432741 |            | 0,05778344 | 0,052211   |

**Tableau 6:** Erreurs sur les activités des radioéléments d'intérêts identifiés dans la carotte II

| <b>Radioélément</b> | <b>Pb-210</b> | <b>U-238</b> | <b>Pb-212</b> | <b>Pb-214</b> | <b>Bi-214</b> | <b>Cs-137</b> | <b>Ac-228</b> | <b>K-40</b> |
|---------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| <b>C30-0.5 cm</b>   | 0,08508429    | 0,0838146    | 0,06840065    | 0,07513091    | 0,08575762    | 0             | 0,20615528    | 0,08858664  |
| <b>C30-1 cm</b>     | 0,0586352     | 0,06250176   | 0,05565724    | 0,06100001    | 0,06919776    | 0,13373337    | 0,09174508    | 0,06276025  |
| <b>C30-2 cm</b>     | 0,0537504     | 0,05704016   | 0,05230588    | 0,05453584    | 0,05805447    | 0,14617772    | 0,06789481    | 0,05466082  |
| <b>C3-03 cm</b>     | 0,05380469    | 0,05788212   | 0,05208465    | 0,05424642    | 0,05756448    | 0,11225422    | 0,064835      | 0,05439795  |
| <b>C3-04 cm</b>     | 0,05393358    | 0,05697115   | 0,05199559    | 0,05391968    | 0,05717202    | 0,11317808    | 0,06413192    | 0,05418413  |
| <b>C30-6 cm</b>     | 0,00035511    | 0,00052192   | 0,00012602    | 0,00024704    | 0,00046062    | 0,01          | 0,00095969    | 0,00023889  |
| <b>C30-7 cm</b>     | 0,05319805    | 0,05497448   | 0,05134198    | 0,05249341    | 0,05435763    | 0,15419661    | 0,06022786    | 0,05264171  |
| <b>C30-8 cm</b>     | 0,05476997    | 0,05836624   | 0,0518921     | 0,05361074    | 0,05675368    | 0,15883096    | 0,06364266    | 0,05404349  |
| <b>C30-9 cm</b>     | 0,0601028     | 0,06459289   | 0,0512343     | 0,05202922    | 0,05274098    | 0,09793977    | 0,05528547    | 0,05120761  |
| <b>C30-10 cm</b>    | 0,05622222    | 0,05747358   | 0,05103285    | 0,05176265    | 0,0526292     | 0,15          | 0,05406654    | 0,05099413  |
| <b>C30-12 cm</b>    | 0,06079615    | 0,0604765    | 0,05054097    | 0,05087626    | 0,0511843     | 0,12122344    | 0,05211554    | 0,05050568  |
| <b>C30-14 cm</b>    | 0,06670321    | 0,06429609   | 0,05101843    | 0,05179913    | 0,05248473    |               | 0,05405828    | 0,05097637  |
| <b>C30-fin</b>      | 0,0838146     | 0,0738822    | 0,05276296    | 0,05523828    | 0,05693233    |               | 0,06064533    | 0,05274776  |

**Tableau 7: Limites de détection pour chaque radioélément d'intérêt dans la carotte I**

| Radioélément        | Limite de détection |            |            |            |            |            |            |
|---------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                     | Pb-210              | U-238      | Pb-212     | Pb-214     | Bi-214     | Ac-228     | K-40       |
| <b>C50 - 0.5 cm</b> | 17,8093056          | 25,8986326 | 2,98288576 | 4,95516008 | 8,99061022 | 17,9442702 | 156,149501 |
| <b>C50 - 1 cm</b>   | 5,38678198          | 7,75859145 | 0,93181185 | 1,53219541 | 2,71606468 | 5,38521818 | 48,2362807 |
| <b>C50 - 2 cm</b>   | 2,87613752          | 4,50992879 | 0,56340842 | 0,92945756 | 1,5038706  | 3,03849235 | 26,5053625 |
| <b>C50 - 3 cm</b>   | 3,22461728          | 4,58974297 | 0,58152973 | 0,94337315 | 1,62340997 | 3,19264455 | 29,6612741 |
| <b>C50 - 4 cm</b>   | 2,7375161           | 3,87120077 | 0,50559308 | 0,81372518 | 1,37702371 | 2,69600456 | 25,566086  |
| <b>C50 - 5 cm</b>   | 2,39630823          | 3,73645547 | 0,47898037 | 0,78496623 | 1,25206978 | 2,51996226 | 22,3710285 |
| <b>C50 - 6 cm</b>   | 3,33805032          | 4,75660536 | 0,59952306 | 0,97387434 | 1,68076374 | 3,30802859 | 30,6241469 |
| <b>C50 - 7 cm</b>   | 2,45734754          | 3,45547594 | 0,46360952 | 0,74082526 | 1,23518696 | 2,40893703 | 23,260273  |
| <b>C50 - 8 cm</b>   | 3,02366708          | 4,29377192 | 0,549895   | 0,88958129 | 1,52178775 | 2,98802462 | 27,9627168 |
| <b>C50 - 9 cm</b>   | 2,35603325          | 3,30439201 | 0,448976   | 0,71499644 | 1,18385841 | 2,30469259 | 22,44227   |
| <b>C50 - 10 cm</b>  | 0,8603291           | 1,20458252 | 0,11255312 | 0,36791756 | 0,56677546 | 0,58256286 | 8,36150033 |
| <b>C50 - 12 cm</b>  | 1,32286468          | 1,95314338 | 0,27980172 | 0,44279306 | 0,65985974 | 1,30241651 | 12,4942329 |
| <b>C50 - 14 cm</b>  | 1,32286468          | 1,95314338 | 0,27980172 | 0,44279306 | 0,65985974 | 1,30241651 | 12,4942329 |
| <b>C50 - 16 cm</b>  | 1,65166828          | 2,18590438 | 0,30069603 | 0,47321593 | 0,76901249 | 1,48488681 | 14,6681684 |
| <b>C50 - 18 cm</b>  | 1,65166828          | 2,18590438 | 0,30069603 | 0,47321593 | 0,76901249 | 1,48488681 | 14,6681684 |
| <b>C50 - 20 cm</b>  | 1,65166828          | 2,18590438 | 0,30069603 | 0,47321593 | 0,76901249 | 1,48488681 | 14,6681684 |
| <b>C50 - 22 cm</b>  | 0,68130004          | 1,74752798 | 0,09239734 | 0,30040343 | 0,46158818 | 0,4847216  | 6,81708913 |

**Tableau 8 : Limites de détection pour chaque radioélément d'intérêt dans la carotte I**

| Radioélément | Pb-210     | U-238      | Pb-212     | Pb-214     | Bi-214     | Ac-228     | K-40       |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| C30-0.5 cm   | 8,2711777  | 11,831801  | 0,99392587 | 3,32138407 | 5,42463498 | 5,79410057 | 75,5685696 |
| C30-1 cm     | 2,58088228 | 3,6677865  | 0,31696104 | 1,0519515  | 1,69125755 | 1,79831714 | 23,9184521 |
| C30-2 cm     | 0,97164694 | 1,35120346 | 0,12884307 | 0,41706667 | 0,63494852 | 0,665131   | 9,46068922 |
| C3-03 cm     | 0,8606913  | 1,18945484 | 0,11684854 | 0,37525483 | 0,56198478 | 0,58617178 | 8,5060058  |
| C3-04 cm     | 0,87236036 | 1,2024453  | 0,11962659 | 0,38286712 | 0,56941027 | 0,5928518  | 8,67583592 |
| C30-6 cm     | 0,55561508 | 0,7102211  | 0,06963831 | 0,22127241 | 0,32600868 | 0,33672754 | 4,91822892 |
| C30-7 cm     | 0,67036612 | 0,9270201  | 0,0918969  | 0,29571187 | 0,44091687 | 0,44933643 | 6,71075881 |
| C30-8 cm     | 0,85386238 | 1,18001744 | 0,11403641 | 0,37227747 | 0,55752586 | 0,58152096 | 8,47577352 |
| C30-9 cm     | 1,19861699 | 1,6728751  | 0,36506739 | 0,58495397 | 0,89064064 | 1,77091261 | 16,6362059 |
| C30-10 cm    | 0,74031623 | 1,01281068 | 0,36506739 | 0,58495397 | 0,89064064 | 1,77091261 | 16,6362059 |
| C30-12 cm    | 0,77618656 | 1,00234224 | 0,1974481  | 0,31564215 | 0,47927951 | 0,94530224 | 8,75886234 |
| C30-14 cm    | 0,81896743 | 1,0677535  | 0,2816168  | 0,44541641 | 0,73231534 | 1,41642058 | 13,758375  |
| C30-fin      | 2,46680291 | 3,52279484 | 0,72021462 | 1,17740224 | 2,06039313 | 4,07058924 | 37,0463856 |

